

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1974

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»



6

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА
СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ, ЦП НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА ЭНЕРГЕТИКИ
И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.311-52

Автоматизированные системы управления в энергетике

АВРАМЕНКО А. В., БОГДАНОВ В. А., МАХАРАДЗЕ О. П., СЕМЕНОВ В. А.,
СОВАЛОВ С. А., ЧЕРНЯ Г. А.
ЦДУ ЕЭС СССР

Успешное завершение формирования объединенных энергосистем и создание Единой энергетической системы СССР требует дальнейшего совершенствования форм и методов управления, основным направлением которого является создание отраслевой автоматизированной системы управления (ОАСУ) «Энергия». При этом под ОАСУ «Энергия» понимается совокупность математических, экономических и административных методов, реализуемых на базе современных средств вычислительной, организационной и информационной техники, обеспечивающая наиболее эффективное управление энергетикой как отраслью народного хозяйства страны в целом.

В настоящее время основным звеном системы управления энергетикой СССР является районное энергетическое управление (РЭУ). Энергетическая система, включающая все электростанции, тепловые и электрические сети, расположенные на определенной территории и связанные единым технологическим процессом, является сложным энергетическим предприятием (комбинатом). РЭУ, охватывающие весь цикл производства, распределения и реализации энергии, имеют в своем составе ремонтные и вспомогательные подразделения и находятся на полном хозяйственном расчете.

На среднем и высшем уровне управление энергетикой построено в соответствии с существующим статусом союзно-республиканского Министерства энергетики и электрификации СССР. В трех республиках (Украинской, Казахской и Узбекской) функционируют республиканские министерства энергетики и электрификации. Энергосистемы областей РСФСР подчинены Главным эксплуатационным управлением Минэнерго СССР, а энергосистемы других союзных республик — Главным производственным управлениям энергетики и электрификации, также подчиненным непосредственно Минэнерго СССР.

Оперативно-диспетчерское управление Единой энергетической системы страны строится по территориальному иерархическому принципу:

Центральное диспетчерское управление (ЦДУ ЕЭС СССР);

объединенные диспетчерские управления (ОДУ) объединенных энергосистем (ОЭС);

диспетчерские пункты районных энергосистем (ДП РЭУ);

диспетчерские пункты предприятий и районов электрических сетей;

электрические станции и подстанции.
На уровне энергосистем хозяйственное и опера-

тивно-диспетчерское управление сосредотачиваются в одном органе — районном энергетическом управлении. Начиная с уровня энергетических объединений, хозяйственное и оперативно-диспетчерское управление разделены: хозяйственное управление, как было указано выше, сосредотачивается в Главных эксплуатационных управлениях, Главных производственных управлениях энергетики и электрификации Минэнерго СССР и Министерствах энергетики и электрификации Украины, Казахстана, Узбекистана, а оперативно-диспетчерское управление — в ОДУ. Координацию и руководство оперативно-диспетчерским управлением осуществляют ЦДУ ЕЭС СССР, которому подчинены объединенные диспетчерские управления.

В Минэнерго ССР имеются строительно-монтажные тресты союзного подчинения и приравненные к ним управления строительством, в том числе

тресты по строительству тепловых и атомных электростанций;

тресты по сооружению линий электропередачи и подстанций;

тресты по строительству сельских электросетей
тресты по монтажу тепломеханического и элек-
тroteхнического оборудования.

Специальные управления строительства осуществляют руководство строительством комплексов

энергетических объектов и промышленных предприятий для других отраслей народного хозяйства.

Таким образом, деятельность структурных подразделений Минэнерго СССР характеризуется двумя главными направлениями:

капитальное строительство (энергетическое и промышленное), стройиндустрия, энергоремонтные машиностроительные и другие предприятия;

производство и распределение электрической и тепловой энергии (эксплуатация).

В соответствии с этим в текущем пятилетии предусмотрено создание первой очереди автоматизированных систем на разных уровнях управления в энергетике:

первой очереди ОАСУ «Энергия» в составе двух основных специализированных подсистем, соответствующих двум главным направлениям производственной деятельности (управления производством, распределением и реализацией электрической и тепловой энергии; управления капитальным строительством, предприятиями стройиндустрии и промышленными предприятиями) и девяти функциональных подсистем, являющихся типовыми для промышленных министерств;

автоматизированной системы диспетчерского управления (АСДУ) Единой энергосистемы (ЕЭС) СССР и объединенными энергосистемами (ОЭС);

автоматизированных систем управления предприятиями (АСУП) — энергосистемами;

автоматизированных систем управления строительно-монтажными трестами (АСУС), обеспечивающими решение задачи хозяйственного и оперативного управления энергетическим и промышленным строительством;

автоматизированных систем управления крупными электростанциями;

автоматизированных систем управления крупными энергоблоками на тепловых электростанциях.

Поскольку основные вопросы создания АСУ в энергетическом строительстве изложены в [Л. 1], в настоящей статье рассматриваются только АСУ производством и распределением электрической и тепловой энергии.

АСУ всех уровней управления, кроме низших, являются сложными интегрированными системами [Л. 2], в которых сочетается решение задач технологического и организационного управления.

В диспетчерском управлении существуют четыре временных уровня:

текущее (долгосрочное) планирование на месяц — год вперед;

оперативное (краткосрочное) планирование на сутки — неделю вперед;

оперативное автоматизированное управление в темпе процесса;

автоматическое управление.

АСДУ включает персонал, технические средства, экономико-математические методы и обеспечивает решение основных задач управления ЕЭС и ОЭС. АСДУ является интегрированной системой, которая включает в себя автоматизированную систему планирования технологических процессов (АСПП), обеспечивающую решение задач двух первых временных уровней и автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУТП),

решающую задачи двух последних временных уровней.

АСУП энергосистем — интегрированная система, которая включает в себя АСДУ и автоматизированную систему организационного управления (АСОУ). АСОУ так же, как и в других отраслях промышленности, включает в себя персонал, технические средства, экономико-математические методы и обеспечивает на всех временных уровнях, включая планирование, решение задач организационного (административного) управления.

ОАСУ «Энергия» — интегрированная система, которая включает в себя АСОУ, автоматизированную систему управления строительством (АСУС) и АСДУ ЕЭС СССР на высшем уровне управления.

Упомянутые выше АСУС и АСОУ на каждом уровне управления в значительной мере подобны аналогичным системам управления, функционирующими и создаваемым в строительстве, а также в добывающих и транспортных отраслях промышленности. Основной технической базой, на которой в текущем пятилетии будут решаться задачи АСОУ и АСУС, являются ЦВМ второго поколения. В 1974—1975 гг. начнется применение для этих целей ЦВМ третьего поколения серии ЕС ЭВМ.

Наиболее специфичной и характерной для энергетики является АСДУ. Создание АСДУ на всех уровнях управления осуществляется на основе комплексного использования средств автоматики, телемеханики, связи и вычислительной техники в три этапа.

На первом, осуществляемом в настоящее время этапе создания АСДУ, базирующемся на использовании ЦВМ второго поколения, автоматизируются функции планирования режимов. В ЦДУ ЕЭС СССР, ОДУ и в ряде наиболее крупных энергосистем находится в эксплуатации несколько десятков ЦВМ второго поколения, главным образом типов БЭСМ-4, М-220 и М-222. Для производства расчетов на этих ЦВМ разработано специальное математическое обеспечение, позволяющее автоматизировать наиболее важные и трудоемкие расчеты. Разработка алгоритмов и программ ведется в основном научно-исследовательскими институтами с участием Центрального диспетчерского управления и объединенных диспетчерских управлений.

В настоящее время освоены и широко применяются программы прогнозирования нагрузок, расчета установившихся режимов, оптимизации режимов по активной и реактивной мощности, расчета токов короткого замыкания, динамической устойчивости, планирования работы каскадов ГЭС и др. Таким образом, используемые в системе диспетчерского управления ЦВМ позволяют решать основные задачи планирования режимов энергосистем. Однако они не приспособлены для информационных задач, решение которых возможно только при наличии развитых средств оперативного (в темпе поступления) ввода — вывода, отображения и регистрации информации.

На втором этапе, который будет осуществлен к концу 70-х годов, применение ЦВМ третьего поколения, современных средств сбора, передачи, обработки информации позволит использовать АСДУ в режиме «советчика» диспетчера при оперативном

ведении режима. Таким образом, начнется применение ЦВМ в контуре оперативного управления, что обеспечит диспетчеру оценку текущего или прогнозируемого режима на основании информации, подготовляемой ЦВМ. При этом предусматривается первоочередное решение задач сбора, передачи, приема и первичной обработки информации, необходимой диспетчеру для управления энергосистемой.

К информационным задачам относятся:

прием информации, поступающей от устройств телемеханики и аппаратуры передачи данных, работающей в режиме «память — память»;

статистическая обработка принятой информации;

сигнализация диспетчеру об отключении (включении) основного оборудования (межсистемные линии, трансформаторы связи и т. п.);

проверка соответствия значений основных режимных параметров допустимым пределам и сигнализация диспетчеру в случае их превышения;

ежечасная регистрация основных параметров режима в диспетчерской ведомости;

проверка наличия у диспетчера запроса на ввод — вывод информации и реализация операций ввода — вывода;

выдача затребованной диспетчером информации на одно из устройств отображения или регистрации информации, входящих в состав технических средств ОИК;

статистическая обработка алфавитно-цифровой информации, передаваемой аппаратурой передачи данных (АПД).

Наряду с информационными задачами на втором этапе АСДУ предусматривается решение задач оперативного прогнозирования, расчета установившихся и коррекции текущих режимов, в том числе:

оперативный расчет параметров текущего режима с целью формирования полной информационной модели электрической сети в памяти ЦВМ на основе поступающих от аппаратуры телемеханики телеметрий (ТИ) основных режимных параметров и телесигнализаций (ТС) состояния коммутационной аппаратуры (выключателей, отделителей и разъединителей);

формирование массивов информации, необходимой для прогноза нагрузок, а также регистрации и отображения параметров режима;

оперативное прогнозирование нагрузок энергобъединений, энергосистем и основных межсистемных перетоков;

оперативный расчет потокораспределения и прогнозируемым значениям нагрузки;

сравнение полученных параметров прогнозируемого режима с предельно допустимыми значениями и проведение в случае необходимости корректировочных (вариантных) расчетов потокораспределения.

Эти задачи будут решаться циклически — на каждый следующий час текущих суток. Выполнение расчетов на другие отрезки времени может производиться по запросу диспетчера.

Для эффективного управления суммарное время, затрачиваемое на сбор, передачу и прием необходимой информации, последующее решение требуемых задач (в результате чего определяется целесообраз-

ная стратегия управления), а также время передачи и исполнения управляющих воздействий на энергообъектах не должно превышать предельно допустимого времени запаздывания. Под предельно допустимым временем запаздывания понимается отрезок времени, в течение которого технико-экономические показатели работы энергосистем изменяются при естественном, т. е. неуправляемом ходе процесса, на некоторую допустимую величину, которая определяется достоверностью и точностью исходной информации, а также совершенством используемых расчетных методов. Такое управление принято называть управлением «в темпе процесса».

В настоящее время ведется отработка информационных задач АСДУ на базе ЦВМ третьего поколения типов Видеотон-1010Б и М-6000.

На третьем этапе с развитием технических средств и математических методов на АСДУ будут возлагаться функции автоматического управления: в первую очередь автоматическое регулирование частоты и перетоков активной мощности с учетом требований экономического ведения режима энергосистем; автоматическая корректировка уставок регуляторов напряжения и т. п.

В настоящее время на ЦВМ типов Видеотон-1010Б и М-6000 начата проверка алгоритмов регулирования частоты и перетоков активной мощности, разработанных институтом Энергосетьпроект, ВНИИЭ, ОДУ Урала и Северо-Запада.

АСДУ ЕЭС создается с учетом существующей структуры диспетчерского управления, основанной на централизованно-ступенчатом (иерархическом) принципе со строгим подчинением низшего звена высшему.

В составе АСДУ ЕЭС предусматривается организация:

вычислительного центра (ВЦ) при ЦДУ ЕЭС СССР;

зональных вычислительных центров при ОДУ объединенных энергосистем;

вычислительных центров энергосистем.

Наличие в диспетчерском управлении двух четко выраженных контуров — оперативного и планового, предопределяет целесообразность разделения АСДУ каждого уровня на два комплекса, работа которых обеспечивается разными, но обязательно совместимыми в информационно-программном отношении техническими средствами:

вычислительный комплекс (ВК) с мощными ЦВМ для выполнения перспективных диспетчерских расчетов, а также расчетов, связанных с производственно-хозяйственной деятельностью;

оперативно-информационный комплекс (ОИК), обеспечивающий оперативные оптимизационные и электротехнические расчеты, обработку и отображение оперативной информации.

Такое разделение позволяет удовлетворить высокие требования по надежности и производительности используемых средств вычислительной техники наиболее эффективными в системном и экономическом отношении путем.

В системном плане функционально-структурное разделение средств вычислительной техники обеспечивает возможность использования в ОИК и ВК различных по структуре, составу, надежности, про-

изводительности и специализации вычислительных средств и соответствующего математического обеспечения в сочетании с простотой их расширения, модернизации и замены.

В экономическом отношении такое решение отличается высокой эффективностью благодаря тому, что позволяет для достижения требуемых показателей надежности ограничиться полным резервированием вычислительных средств только в ОИК, в то время как в ВК оказывается возможным использовать обычные универсальные ЦВМ соответствующей производительности. Типовая структура вычислительных средств всех уровней управления обеспечивает эффективное использование принципов агрегатирования и модульности, широко применяемых в ЦВМ третьего поколения. При этом ВЦ разных уровней управления, совпадая по структуре, будут отличаться друг от друга только требуемой производительностью и составом устройств ввода — вывода, отображения и регистрации информации.

Это позволяет ориентироваться на преимущественное использование ряда совместимых ЦВМ третьего поколения, обеспечивающих комплексирование вычислительных систем требуемой производительности.

С точки зрения обеспечения требуемой надежности все задачи ОИК можно разделить на три группы:

прием и обработка поступающей информации; отображение и регистрация информации; решение задач оперативного управления.

Задачи первой и второй группы предъявляют повышенные требования к надежности вычислительных средств, так как отсутствие достоверной информации исключает возможность эффективного управления и, следовательно, должно рассматриваться как отказ ОИК в целом.

Предварительные расчеты показали, что требуемая надежность решения задач первой и второй группы достигается использованием в составе вычислительных средств ОИК не менее двух ЦВМ третьего поколения, в то время как решение задач третьей группы может быть обеспечено одной ЦВМ соответствующей производительности.

В настоящее время на основе проработок института Энергосетьпроект в качестве типового решения приняты следующие варианты комплексирования вычислительных средств ОИК разных уровней управления;

ОИК вычислительных центров энергообъединений выполняется на базе двух (трех) ЦВМ М-6000 или двух ЦВМ Видеотон-1010Б, сопряженных с одной (двумя) ЦВМ ЕС-1030;

ОИК вычислительных центров энергосистем выполняется на базе двух (трех) ЦВМ М-6000 и одной ЦВМ ЕС-1020 (1030).

Приведенные выше возможные варианты изменения числа ЦВМ М-6000 и типа ЕС ЭВМ определяются этапностью внедрения и объемом решаемых задач. В схеме ОИК предусматривается резервирование периферийных устройств и отдельных функциональных узлов. На случай полного выхода из строя ОИК должно обеспечиваться резервирование отображения оперативной телемеханической информации с помощью традиционных средств (щиты, пульты, стре-

лочные приборы и т. п.), а также вычислительной помощи диспетчеру организацией доступа к ЦВМ ВК для решения основных оперативных задач.

Вычислительные комплексы всех уровней управления должны обеспечивать возможность наращивания производительности используемых ЦВМ по мере увеличения числа и сложности решаемых задач, расширения числа абонентов — пользователей и развития системы сбора информации.

В текущей и последующей пятилетке предусматривается замена используемых в настоящее время в качестве ВК вычислительных машин второго поколения типов М-220 (М-222), БЭСМ-4 и Минск-32 (Минск-22) на вычислительные системы третьего поколения ЕС-1020, ЕС-1030, ЕС-1040, ЕС-1050 и ЕС-1060.

Применяемые в ОАСУ «Энергия» средства сбора и передачи телемеханической и алфавитно-цифровой информации должны обеспечивать надежную и достоверную передачу всех необходимых данных при минимальном количестве и протяженности используемых каналов связи.

Основными средствами сбора оперативной информации о схеме и параметрах режимов энергосистем должны быть многоканальные кодо-импульсные системы телемеханики, обеспечивающие передачу большого числа различных сообщений по уплотненным стандартным телефонным каналам. Схемы передачи и объемы телемеханической информации должны строиться и определяться с учетом принятой структуры диспетчерского управления для формирования информационной модели электрической сети, достаточной для решения всех оперативных и плановых задач диспетчерского управления. Из ОИК ВЦ должна предусматриваться передача управляющих воздействий на объекты (электростанции и подстанции), участвующие в автоматическом регулировании частоты и активной мощности, а также в автоматическом регулировании напряжения. Телепередача управляющих воздействий должна осуществляться с повышенной надежностью.

Для передачи алфавитно-цифровой информации на всех уровнях управления ОАСУ «Энергия» на первом этапе используются телетайпы. В настоящее время наряду с телетайпами началось использование аппаратурой передачи данных (АПД), обеспечивающей передачу информации по стандартным коммутируемым телефонным каналам связи со скоростями 600—1200 бод.

При этом телетайпы остаются для резервирования АИД и передачи отдельных видов информации.

Ввод телемеханической информации в память ЦВМ и вывод управляющих воздействий для передачи на объекты должны осуществляться автоматически через специальные устройства сопряжения, обеспечивающие адресацию принимаемой и передаваемой информации с целью разгрузки центрального процессора ЦВМ.

Ввод алфавитно-цифровой информации на первом этапе будет осуществляться преимущественно с перфолент. В дальнейшем алфавитно-цифровые сообщения будут поступать в ЦВМ и выводиться из нее для передачи по каналам связи в режиме «память — память».

В составе технических средств ОАСУ «Энергия» важная роль отводится средствам отображения и документирования информации. В функциональном отношении все средства отображения и документирования информации подразделяются на три основных группы:

средства отображения и документирования информации для оперативно-диспетчерского персонала энергосистем и энергообъединений;

средства отображения и документирования информации для подразделений ОАСУ «Энергия», осуществляющих руководство и оперативное управление строительной и производственно-хозяйственной деятельностью отрасли;

средства отображения и документирования информации для персонала, осуществляющего обслуживание технических средств и разработку математического обеспечения ОАСУ «Энергия».

Наиболее высокие требования по надежности работы, а также наглядности, оперативности и разнообразию отображаемой и документируемой информации предъявляются к средствам, используемым оперативно-диспетчерским персоналом энергосистем и энергообъединений. Указанные устройства должны обеспечивать оперативное (в темпе процесса) отображение и регистрацию как алфавитно-цифровой, так и символьно-графической информации значительного объема.

Средства отображения информации для оперативно-диспетчерского персонала размещаются в диспетчерском зале и подразделяются на общие и индивидуальные. К общим средствам отображения информации относятся:

диспетчерский щит со схемой энергообъединения и приборами, отображающими состояние основной сети;

проекционный или световой щит для оперативного отображения схем отдельных энергетических объектов и участков объединенной энергосистемы;

большое световое табло для представления оперативной информации об изменении положения выключателей в основной сети ОЭС или об отклонении текущих режимных параметров (активная мощность, ток, частота, напряжение) от допустимых значений.

К индивидуальным средствам отображения информации относятся:

индикаторы на электронно-лучевых трубках (ЭЛТ) для представления алфавитно-цифровой информации, характеризующей значения электрических параметров, вышедших за допустимые пределы, схем электрических соединений подстанций и станций, соответствующих данному и предшествующим моментам времени, с нанесенными на схему текущими значениями параметров, фрагментов схем электрических сетей, алфавитно-цифровой производственно-статистической информации; справочно-инструктивной информации (номинальные параметры основного оборудования, уставки релейной защиты и противоаварийной автоматики, инструктивные указания по проведению различных операций по включению — отключению оборудования, устранению аварийных ситуаций и т. п.);

малые световые табло (СТМ) для представления отдельных электрических параметров (актив-

ная и реактивная мощность, ток, напряжение и частота) по запросу диспетчера;

аналоговые и цифровые приборы для представления отдельных электрических параметров;

селекторы для представления справочно-инструктивной информации.

Для документирования оперативно-диспетчерской и производственно-статистической информации на диспетчерских пунктах должны предусматриваться:

алфавитно-цифровые печатающие устройства (АЦПУ);

двухкоординатные графопостроители (ДГП);
электрифицированные пишущие машинки (ЭПМ).

Для подразделений ОАСУ, осуществляющих руководство и оперативное управление строительной и производственно-хозяйственной деятельностью отрасли должны предусматриваться индикаторы на ЭЛТ, обеспечивающие отображение алфавитно-цифровой информации. Для документирования больших объемов информации должны использоваться АЦПУ. Документирование небольших массивов данных (справки, таблицы, краткие сводки) должно осуществляться с помощью ЭПМ.

Для производственных служб, обеспечивающих обслуживание технических средств и разработку математического обеспечения ОАСУ «Энергия», должны предусматриваться отдельные комплекты средств отображения и документирования как алфавитно-цифровой, так и символьно-графической информации. К последним относятся графические и алфавитно-цифровые индикаторы на ЭЛТ, ЭПМ, АЦПУ и двухкоординатные графопостроители.

Математическое обеспечение ОАСУ «Энергия» должно разрабатываться с учетом выбранной структуры, состава и характеристик технических средств. В составе математического обеспечения принято выделять:

комплекс общесистемных программ, обеспечивающих наиболее эффективное и надежное использование всех технических средств в рамках выбранной структуры и функциональных связей системы управления;

комплекс специализированных прикладных программ, обеспечивающих решение задач планирования и управления энергетикой.

Комплекс общесистемных программ должен включать в себя:

операционную систему, обеспечивающую наиболее эффективное использование многомашинных вычислительных систем каждого уровня управления и их взаимодействие между собой при решении задач в режимах реального времени, пакетной обработки и разделения времени;

библиотеку трансляторов с алгоритмических языков высокого уровня и машинно-ориентированных языков автокодного типа;

библиотеку стандартных подпрограмм, обеспечивающих вычисление стандартных функций и выполнение часто встречающихся преобразований;

библиотеку сервисных программ, обеспечивающих удобство и эффективность ввода, вывода и коррекции (редактирования) решаемых программ и исходных данных;

библиотеку программ, обеспечивающих проверку работоспособности всех технических средств с целью наискорейшего устранения выявленных неисправностей.

Комплекс специализированных прикладных программ должен включать в себя:

библиотеку программ для решения задач информационного обеспечения всех уровней управления;

библиотеку программ для решения задач информационного обеспечения всех уровней управления;

библиотеку программ оперативного управления отраслью;

библиотеку программ долгосрочного, текущего и оперативного планирования.

Применение ЦВМ в энергетике началось с разработки отдельных программ для решения таких частных задач, как, например, расчет установившегося режима, прогноз активных нагрузок и т. п. Работы по созданию системных прикладных программ, обеспечивающих решение комплексных задач автоматизированного управления, начались

только в последнее время. Вследствие многообразия возможных применений каждой отдельной частной программы математическое обеспечение ОАСУ «Энергия» должно разрабатываться с максимальным использованием имеющихся алгоритмов и программ по модульному принципу с унифицированным информационным сопряжением отдельных модулей и возможностью динамичного перестроения их числа и состава при решении комплексных прикладных программ. Создание ОАСУ «Энергия» требует больших народнохозяйственных затрат. Однако уже самые первые результаты подтверждают экономическую целесообразность проводимых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фалалеев П. П. Автоматизированная система управления капитальным строительством отрасли — источник повышения эффективности энергетического строительства. — «Энергетическое строительство», № 10, 11, 1974, с. 11—18.

2. Автоматизированные системы управления. Под общ. ред. Шорина В. Г. М., «Знание», 1973, 316 с.

[15.1.1974]



УДК 629.1:[621.31:338.5]

О себестоимости электрической энергии, вырабатываемой автономными электроэнергетическими системами транспортных средств

КРИВЕНЦЕВ В. И., МОРОЗОВСКИЙ В. Т.

Московский институт инженеров гражданской авиации

Одним из важнейших критериев оценки эффективности электроэнергетических систем транспортных средств является себестоимость электрической энергии, вырабатываемой ими. На базе этого критерия можно произвести сравнительную оценку различных систем электроснабжения и способов использования электрической энергии для целей обогрева, привода и т. п.

Проблема оценки себестоимости производства различных видов энергии на транспорте оказывается важной в связи с тем, что с ней связаны такие показатели транспорта как грузоподъемность, запас хода, стоимость перевозок, надежность функционирования и др. Это следует из того, что основными составляющими себестоимости производства энергии являются затраты топлива на ее производство и транспорт оборудования. Расчеты показывают, что себестоимость производства электрической энергии, например, на борту пассажирского воздушного лайнера в несколько сот раз превосходит себестоимость электрической энергии, получаемой от наземных электростанций.

Определение себестоимости электрической энергии, производимой на борту транспортных средств, связано с необходимостью учета не только электроэнергетического оборудования, но и характеристики силовой установки и несущей части, системы передачи энергии от первичных двигателей к генератору, а также особенностей эксплуатации транспортного средства и электрооборудования.

В общем случае себестоимость производства электрической энергии автономными источниками транспортного средства складывается из четырех

составляющих: топливной, расходов на амортизацию несущей и силовой частей транспортного средства, обусловленных массой электроэнергетического узла и топлива, расходов на амортизацию собственного электрооборудования и затрат на обслуживание, ремонт и прочие расходы.

Топливная составляющая себестоимости равна произведению стоимости единицы массы топлива $c_{\text{то}}$ на массу топлива, необходимую на выработку электрической энергии и транспорт масс. Выработка электрической энергии зависит прежде всего от режима работы потребителей при выполнении транспортным средством типового маршрута.

Мощность, которую должен развивать i -й генератор на j -м участке типового маршрута P_{ij} обычно задается в виде графика нагрузок.

На транспортных средствах, помимо основных генераторов электрической энергии, устанавливаются резервные источники (аккумуляторные батареи, вспомогательные силовые установки), которые обеспечивают запуск первичных двигателей и питают потребителей при выходе из строя генераторов.

Очевидно, что за счет этих резервных источников электрической энергии топливная составляющая должна несколько увеличиться.

Расход топлива связан не только с выработкой электрической энергии, необходимо учесть также расход топлива на транспортировку массы самого топлива [Л. 1] и всех элементов электроэнергетического узла, а также дополнительных масс несущей части и силовой установки транспортного средства, обусловленных необходимостью транспортировки всех этих масс.

Учитывая вышеизложенное, топливную составляющую себестоимости электрической энергии можно представить в следующем виде:

$$C_t = n_0 c_{t_0} \left[1 + \frac{\partial (M_h + M_c)}{\partial M} \right] \left\{ \left(1 + \frac{\partial M_t}{\partial M} \right) k_{p,h} \sum_{i=1}^n \times \right. \\ \left. \times \sum_{j=1}^N \frac{q_j P_{t,j} t_j}{v_j \eta_{i,j}} + \frac{\partial M_t}{\partial M} \sum_{v=1}^r M_v \right\}, \quad (1a)$$

где M_h — масса несущей части транспортного средства; M_c — масса силовой установки транспортного средства; M — стартовая масса транспортного средства; M_t — масса топлива, соответствующая максимальной загрузке транспорта; M_v — масса v -го элемента электроэнергетического оборудования; n_0 — годовое число приведенных рейсов; q_j — удельный (массовый) расход топлива на единицу мощности в единицу времени, на j -м этапе движения; $k_{p,h}$ — коэффициент, учитывающий массу топлива и конструкции, обусловленных наличием на транспортном средстве резервных источников; η — к. п. д. i -го генератора на j -м этапе движения; t_j — продолжительность i -го генератора на j -м этапе; r — число элементов электроэнергетического оборудования; n — число генераторов; N — число этапов движения.

В том случае, когда расход топлива первичных двигателей транспортного средства задается не на единицу мощности, а на единицу тяги (например, летательные аппараты), выражение для топливной составляющей себестоимости имеет вид:

$$C_t = n_0 c_{t_0} \left[1 + \frac{\partial (M_h + M_c)}{\partial M} \right] \left\{ \left(1 + \frac{\partial M_t}{\partial M} \right) k_{p,h} \sum_{i=1}^n \times \right. \\ \left. \times \sum_{j=1}^N \frac{q_{0,j} P_{t,j} t_j}{v_j \eta_{i,j}} + \frac{\partial M_t}{\partial M} \sum_{v=1}^r M_v \right\}, \quad (1b)$$

где $q_{0,j}$ — удельный расход топлива на единицу тяги в единицу времени; v_j — скорость движения транспортного средства на j -м этапе.

Выражение (1a) можно упростить, если принять, что

$$M_{t,a} = \left(1 + \frac{\partial M_t}{\partial M} \right) \left[1 + \frac{\partial (M_h + M_c)}{\partial M} \right] k_{p,h} \times \\ \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \frac{q_j P_{t,j} t_j}{\eta_{i,j}}$$

— масса топлива, обусловленная выработанной электрической энергией;

$M_{k,a} = \sum_{v=1}^r M_v$ — конструктивная масса энергоузла;

$$C_t = n_0 c_{t_0} \left\{ M_{t,a} + \frac{\partial M_t}{\partial M} \left[1 + \frac{\partial (M_h + M_c)}{\partial M} M_{k,a} \right] \right\}. \quad (1b)$$

Входящее в приведенные выше выражения приведенное число рейсов за год n_0 характеризует загруженность транспортного средства в среднем.

Во многих случаях (например, воздушный транспорт), транспортное средство проектируется на выполнение некоторых типовых маршрутов, которые характеризуются определенной продолжитель-

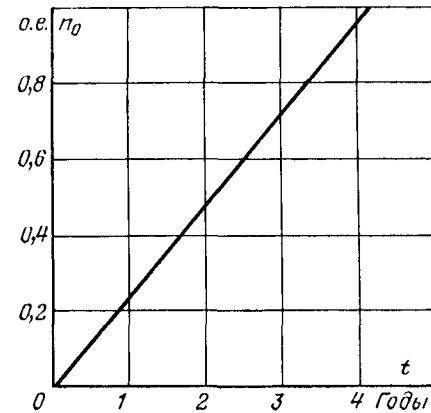


Рис. 1.

ностью рейса T_0 , дальностью рейса L_0 и коммерческой нагрузкой M_0 .

Степень использования транспортного средства характеризуется числом рейсов за год, приведенным к типовому. Приведенное число рейсов за год можно подсчитать тремя различными способами, исходя из среднего времени на один рейс:

$$n_T = \frac{1}{T_0} \sum_{\sigma=1}^k T_{\sigma};$$

средней дальности рейса

$$n_L = \frac{1}{L_0} \sum_{\sigma=1}^k L_{\sigma};$$

средней коммерческой нагрузки на один рейс

$$n_M = \frac{1}{M_0} \sum_{\sigma=1}^k M_{\sigma},$$

где n_T , n_L , n_M — годовые числа рейсов; σ — номер рейса; T_{σ} , L_{σ} , M_{σ} — продолжительность, дальность и коммерческая нагрузка σ -го рейса.

В качестве расчетного приведенного числа рейсов за год целесообразно взять среднее геометрическое приведенных выше чисел рейсов:

$$n_0 = \sqrt[3]{n_T n_L n_M} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{\sigma=1}^k T_{\sigma} \sum_{\sigma=1}^k L_{\sigma} \sum_{\sigma=1}^k M_{\sigma}}{T_0 L_0 M_0}}.$$

Следует иметь в виду, что число приведенных рейсов за год n_0 часто является функцией продолжительности эксплуатации транспорта. Это обусловлено тем, что по мере освоения нового транспортного средства степень его использования возрастает. В качестве примера на рис. 1 приведена типичная зависимость числа приведенных рейсов n_0 для летательного аппарата от продолжительности эксплуатации.

Вторая составляющая себестоимости электрической энергии $C_{a,t}$, обусловленная амортизацией несущей и силовой частей транспортного средства, приходящихся на массу электроэнергетической системы и потребляемого его топлива, зависит от

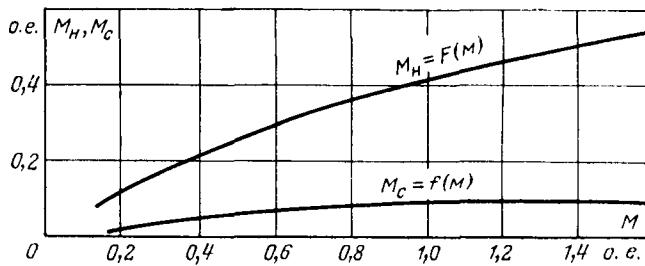


Рис. 2.

норм отчислений на амортизацию транспортного средства и может быть представлена так:

$$C_{a.t} = \left(p_{a.n} a_n \frac{\partial M_n}{\partial M} + p_{a.c} a_c \frac{\partial M_c}{\partial M} \right) (M_{t.e} + \sum_{v=1}^r M_v + \sum_{v=1}^r M_v) = \left(p_{a.n} a_n \frac{\partial M_n}{\partial M} + p_{a.c} a_c \frac{\partial M_c}{\partial M} \right) [M_{t.e} + (1 + \frac{\partial M_t}{\partial M}) M_{k.e}], \quad (2)$$

где $p_{a.n}$ и $p_{a.c}$ — нормы отчислений на амортизацию несущей и силовой частей транспортного средства в относительных единицах; a_n и a_c — удельные стоимости единицы массы несущей и силовой частей транспортного средства.

Производные $\frac{\partial M_n}{\partial M}$ и $\frac{\partial M_c}{\partial M}$ учитывают нелинейность

зависимостей массы несущей части и силовой установки от стартовой массы. На рис. 2 представлены зависимости $M_n = F(M)$ и $M_c = f(M)$ для дозвуковых летательных аппаратов с турбореактивными двигателями.

Отчисления на амортизацию также зависят от времени, они уменьшаются в процессе эксплуатации. Например, на воздушном транспорте величина амортизации зависит от двух факторов: стоимости транспорта и налета часов. Поэтому произведения вида $p_{a.n} a_n$ и $p_{a.c} a_c$ здесь целесообразно заменить соответствующими выражениями:

$$\frac{c_{n0} T}{M_n} \text{ и } \frac{c_{c0} T}{M_c},$$

где c_{n0} , c_{c0} — отчисления на амортизацию несущей и силовой частей в рублях на летный час; T — годовая продолжительность функционирования в часах; M_n и M_c — масса планера и авиадвигателей.

Как правило, величины T , c_{n0} и c_{c0} являются переменными и корреляционно зависят от времени, т. е. от продолжительности эксплуатации летательного аппарата. Значение T возрастает по мере увеличения производительности транспорта, а c_{n0} и c_{c0} уменьшаются с увеличением ресурса и уменьшением стоимости объекта (рис. 3).

Третья составляющая себестоимости $C_{a.e}$ представляет собой расходы на амортизацию собственно электрооборудования транспортного средства. Отчисления на амортизацию электроэнергетического оборудования $C_{a.e}$ зависят от его стоимости, срока службы и нормативного коэффициента отчислений на амортизацию. Если принять, что нормативный коэффициент эффективности p_e один и тот же для всех элементов электрооборудования, то для

нахождения отчислений на амортизацию можно воспользоваться выражением, рекомендованным в [Л. 2]:

$$C_{a.e} = \sum_{v=1}^r \frac{C_{sv} - C_{s.pv}}{(p_e + 1)^{T_{clv}} - 1}, \quad (3)$$

где C_{sv} — стоимость v -го элемента электрооборудования; $C_{s.pv}$ — ликвидная стоимость v -го элемента; T_{clv} — срок службы v -го элемента.

В некоторых случаях ликвидная стоимость электрооборудования может быть принята равной нулю.

Что касается последней, четвертой составляющей себестоимости $C_{o.e}$, складывающейся из затрат на обслуживание, текущий ремонт, хранение и прочих расходов, ее вычисление представляет наибольшие трудности.

В первом приближении можно принять, что затраты на обслуживание пропорциональны массе электроэнергетического оборудования, доли несущей и силовой частей транспортного средства и топлива:

$$C_{o.e} = c_{o0} \frac{M_{e.0}}{M} T = c_{o0} \frac{T}{M} \left\{ \left(1 + \frac{\partial M_t}{\partial M} \right) \left[1 + \frac{\partial (M_n + M_c)}{\partial M} \right] \left[\sum_{v=1}^r M_v + k_{p.n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N q_j \frac{1 - \eta_{ij}}{\eta_{ij}} P_{ij} t_{ij} \right] \right\}$$

или, принимая во внимание введенные выше обозначения

$$C_{o.e} = \frac{c_{o0} T}{M} \left\{ M_{t.e} + \left(1 + \frac{\partial M_t}{\partial M} \right) \left[M_{k.e} - k_{p.n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N q_j P_{ij} t_{ij} \right] \right\}, \quad (4)$$

где $M_{e.0}$ — стартовая масса электроэнергетического оборудования транспортного средства; c_{o0} — годовые отчисления на обслуживание, текущий ремонт

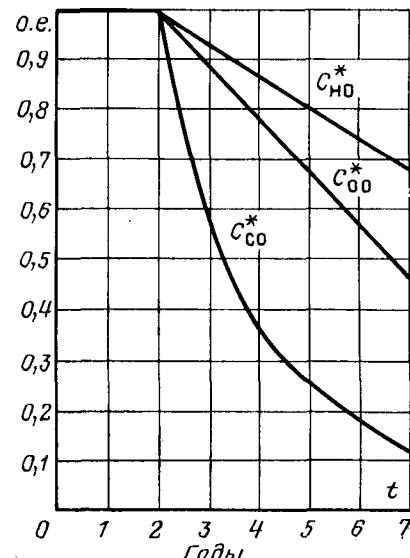


Рис. 3.

и прочие расходы по транспортному средству в целом в рублях на час движения.

Таким образом, представляется возможным определить себестоимость электрической энергии на борту транспортного средства, пользуясь следующим выражением:

$$C = \left[c_{\text{т}0} n_0 + \left(p_{\text{а.н}} a_{\text{н}} \frac{\partial M_{\text{н}}}{\partial M} + p_{\text{а.с}} a_{\text{с}} \frac{\partial M_{\text{с}}}{\partial M} \right) + \right. \\ \left. + \left(1 - \eta_{\text{т}} \right) \frac{c_{\text{оо}} T}{M} \right] M_{\text{т.з}} + \left\{ c_{\text{т.о}} n_0 \frac{\partial M_{\text{т}}}{\partial M} \left[1 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\partial (M_{\text{н}} + M_{\text{с}})}{\partial M} \right] + \left(1 + \frac{\partial M_{\text{т}}}{\partial M} \right) \left[p_{\text{а.н}} a_{\text{н}} \frac{\partial M_{\text{н}}}{\partial M} + \right. \right. \\ \left. \left. + p_{\text{а.с}} a_{\text{с}} \frac{\partial M_{\text{с}}}{\partial M} + \frac{c_{\text{оо}} T}{M} \left(1 + \frac{\partial (M_{\text{н}} + M_{\text{с}})}{\partial M} \right) \right] \right\} + \\ + p_{\text{з}} \sum_{v=1}^r \frac{c_{\text{з}v} - c_{\text{з.л}v}}{(p_{\text{з}} + 1)^{T_{\text{с}л}v} - 1}, \quad (5)$$

$$\text{где } \eta_{\text{т}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N q_j P_{ij} t_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N q_j \frac{P_{ij} t_j}{\eta_{ij}}} \text{ — коэффициент, характеризующий степень использования топлива на выработку электроэнергии.}$$

Из последнего выражения следует, что годовая себестоимость электрической энергии на борту транспортного средства пропорциональна массе потребляемого электроэнергетическим оборудованием топлива, конструктивной массе и отчислениям на амортизацию.

Так как величины n_0 , T , $c_{\text{оо}}$, $a_{\text{н}}$ и $a_{\text{с}}$ зависят от продолжительности эксплуатации, то и себестоимость, определяемая по выражению (5), будет являться ее функцией. Разумеется, текущее значение себестоимости не может служить объективной характеристикой. Наиболее достоверной оценкой является интегральное значение себестоимости электрической энергии, вычисленное за некоторый период времени, например, от начала эксплуатации до первого капитального ремонта:

$$C_{\text{ср}} = \frac{1}{\tau - t_0} \int_{t_0}^{\tau} C(t) dt, \quad (6)$$

где τ — продолжительность эксплуатации, год; t_0 — продолжительность освоения новой техники, год.

Можно записать выражение для средней себестоимости в соответствие с формулой (6) в функции переменных n_0 , T , $c_{\text{но}}$, $c_{\text{с}0}$ и $c_{\text{оо}}$.

Для упрощения записей целесообразно ввести следующие коэффициенты:

$$\alpha = 1 + \frac{\partial (M_{\text{н}} + M_{\text{с}})}{\partial M};$$

$$\beta = \left(1 + \frac{\partial M_{\text{т}}}{\partial M} \right) k_{\text{н.п}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N \frac{q_j P_{ij} t_{ij}}{v_j \eta_{ij}};$$

$$\gamma = \sum_{v=1}^r M_v; \quad \theta = 1 + \frac{\partial M_{\text{т}}}{\partial M} \left[1 + \frac{\partial (M_{\text{н}} + M_{\text{с}})}{\partial M} \right];$$

$$\lambda = \frac{1}{M} \left[\sum_{v=1}^r M_v + k_{\text{п.н}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N q_j P_{ij} t_j \frac{1 - \eta_{ij}}{\eta_{ij}} \right];$$

$$g_{\text{т}} = \frac{\partial M_{\text{т}}}{\partial M}, \quad g_{\text{н}} = \frac{\partial M_{\text{н}}}{\partial M} \text{ и } g_{\text{с}} = \frac{\partial M_{\text{с}}}{\partial M}.$$

Тогда

$$C_{\text{ср}} = \frac{c_{\text{т}0} \alpha (\beta + g_{\text{т}} \gamma)}{\tau - t_0} \int_{t_0}^{\tau} n_0(t) dt + \\ + \frac{\alpha \beta + \theta \gamma}{\tau - t_0} \int_{t_0}^{\tau} \left[\frac{c_{\text{но}} T(t)}{M_{\text{н}}} g_{\text{н}} + \frac{c_{\text{с}0} T(t)}{M_{\text{с}}} g_{\text{с}} \right] dt + \\ + \frac{c_{\text{а.з}}}{\tau - t_0} \int_{t_0}^{\tau} dt + \frac{\alpha (1 + g_{\text{т}}) \lambda}{\tau - t_0} \int_{t_0}^{\tau} c_{\text{оо}}(t) T(t) dt. \quad (7)$$

Наряду с введением интегральной оценки себестоимости электрической энергии правильнее определить значение вырабатываемой полезной электрической энергии, как среднее значение за некоторый период эксплуатации.

Пользуясь понятием среднего интегрального, можно записать:

$$W = \frac{1}{\tau - t_0} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^N P_{ij} t_j \int_{t_0}^{\tau} n_0(t) dt, \quad (8)$$

где W — среднее годовое значение электрической энергии, выработанной за период эксплуатации $\tau - t_0$.

Себестоимость одного киловатт-часа электрической энергии, выработанной на борту транспортного средства — равна отношению средней годовой себестоимости $C_{\text{ср}}$ к среднему годовому значению электрической энергии

$$c_0 = \frac{C_{\text{ср}}}{W}. \quad (9)$$

Пример. На примере сравнительной оценки различных электроэнергетических узлов легкого пассажирского самолета рассмотрим применение предлагаемой методики определения себестоимости производства электрической энергии. Сравним себестоимость производства электрической энергии посредством вентильных и коллекторных генераторов постоянного тока. Зависимости эксплуатационных показателей от времени $n(t)$, $c_{\text{но}}(t)$, $c_{\text{с}0}(t)$, $c_{\text{оо}}(t)$ изображены на рис. 1 и 3.

С учетом этих зависимостей выражение для средней годовой себестоимости производства электрической энергии в соответствии с формулой (7) может быть представлено в следующем виде:

$$C_{\text{ср}} = c_{\text{т}0} \alpha (\beta + g_{\text{т}} \gamma) \left(A + B \frac{\tau + t_0}{2} \right) + \\ + (\alpha \beta + \theta \gamma) \left\{ \frac{g_{\text{н}} c_{\text{но}}}{M_{\text{н}}} \left[CE + (DE - CF) \frac{\tau + t_0}{2} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{DF}{3} \frac{\tau^3 - t_0^3}{\tau - t_0} \right] + \frac{g_{\text{с}} c_{\text{с}0}}{M_{\text{с}}} \left[(CH + DQ) + \right. \right. \\ \left. \left. + DH \frac{\tau + t_0}{2} + \frac{CQ}{\tau - t_0} \ln \frac{\tau}{t_0} \right] \right\} + C_{\text{а.з}} + \\ + \alpha (1 + g_{\text{т}}) \lambda \left[CM + (DM - CN) \frac{\tau + t_0}{2} - \right. \\ \left. - \frac{1}{3} DN \frac{\tau^3 - t_0^3}{\tau - t_0} \right] c_{\text{оо}}.$$

где s_{01n} , s_{01s} , s_{01n} — начальные значения отчислений, соответствующие моменту ввода летательного аппарата в эксплуатацию; $A, B, C, D, E, F, H, Q, N, M$ — коэффициенты корреляции, определяемые по кривым рис. 1 и 3.

Таблица 1

| Расчетные величины | Вентильные генераторы | Коллекторные генераторы |
|--|-------------------------------------|---|
| Энергетические показатели | | |
| Выработка полезной электрической энергии $n \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{ij} t_{ij}$, квт·ч (на один рейс) | 18 525 | 18 525 |
| Коэффициент использования топлива или энергетический к. п. д. | 0,434 | 0,554 |
| $\eta = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M q_j P_{ij} t_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M q_j P_{ij} t_{ij}}$ | | |
| Затраты топлива на выработку электрической энергии в кг на один рейс | 84,77 | 62,12 |
| Технико-экономические показатели | | |
| α , о.е | 1,56 | 1,56 |
| β , кг | 63,4 | 46,6 |
| θ , о.е | 1,418 | 1,418 |
| Конструктивная масса электрооборудования γ , кг | 142,2 | 153,6 |
| Годовая масса топлива | $114 \cdot 10^3$ | $99 \cdot 10^3$ |
| Годовая стоимость топлива | 5800 | 5044,8 |
| $c_{t0} \alpha \left(\beta + g_t \gamma \right) \left(A + B \frac{\tau + t_0}{2} \right)$, руб | | |
| Отчисления на амортизацию доли планера и авиадвигателей, приходящейся на электрооборудование | 1670 | 1620 |
| $\left(\alpha \beta + \theta \gamma \right) \left\{ \frac{g_h}{M_h} \left[\frac{c_{a0n}}{M_h} \left[\dots \right] \right] \right\}$, руб | | |
| Отчисления на обслуживание | 2140 | 2007 |
| $\alpha(1+g_t) \lambda [CM + \dots] c_{00n}$, руб | | |
| Отчисления на амортизацию элементов электрооборудования $C_{a,0}$, руб | 1404 | 367,6 |
| Показатели себестоимости электрической энергии | | |
| Годовая себестоимость электрической энергии $C_{ep} = C_t + C_{a,n} + C_{a,0} + I_o$, руб | $5800 + 1670 + 2140 + 1404 = 11014$ | $5044,8 + 1620 + 2007 + 367,6 = 9039,4$ |
| Себестоимость 1 квт·ч электрической энергии $c_0 = C_{ep}/W$, руб | 0,825 | 0,675 |

Таблица 2

| Основные показатели | Электроэнергетический узел | |
|--|----------------------------|----------------------------|
| | с вентильным генератором | с коллекторным генератором |
| Число генераторов | 3 | 3 |
| Конструктивная масса всех генераторов, кг | 60,6 | 72 |
| Энергетический к. п. д. энергоузла | 0,434 | 0,554 |
| Масса топлива, расходуемая на покрытие потерь в энергоузле в кг на один рейс | 52 | 28,85 |
| Суммарная масса конструкции и топлива, кг | 112,6 | 100,85 |
| Себестоимость 1 квт·ч электрической энергии, коп | 82,5 | 67,5 |

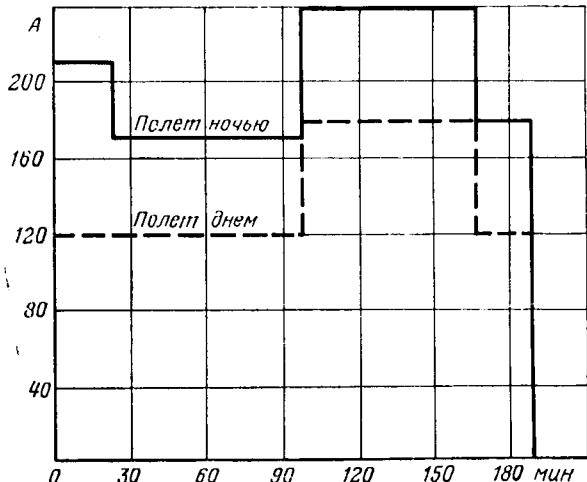


Рис. 4.

Ниже приведены значения коэффициентов и некоторых параметров для рассматриваемого самолета:

| c_{t0} , руб/кг | g_t , о.е | τ , год | t_0 , год | g_h , о.е. | g_e , о.е. | c_{a0n} , руб/л.ч | c_{e0n} , руб/л.ч | c_{00n} , руб/ч |
|-------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| 0,051 | 0,268 | 10 | 2 | 0,49 | 0,07 | 80 | 31 | 86 |
| | | | | | | | | |
| $C_{a,0}$, кг | M_h , кг | M_e , кг | E , о.е. | F , о.е. | H , о.е. | Q , о.е. | M , о.е. | N , 1/год |
| 1404 | 8500 | 350 | 1,48 | 0,16 | -0,355 | 4 | 1,16 | 0,0545 |

Типовой график электрических нагрузок легкого пассажирского самолета приведен на рис. 4.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таким образом, из табл. 1 можно видеть, что себестоимость производства электрической энергии посредством вентильных генераторов выше на 22%. По сравнению с себестоимостью электрической энергии, производимой на крупных электростанциях стационарного типа, она в 600—800 раз выше.

Кроме этих данных, на базе критерия себестоимости можно провести сравнительный анализ различных источников электрической энергии. В табл. 2 приведены некоторые весовые и энергетические показатели сравниваемых генераторов.

Несмотря на более низкую конструктивную массу вентильных генераторов, они все же уступают из-за плохих энергетических показателей коллекторным генераторам по общей массе конструкции и топлива. В связи с этим оказывается и высокой себестоимостью электрической энергии, вырабатываемой вентильными генераторами.

Окончательный выбор того или иного типа генератора, разумеется, следует производить с учетом и других критериев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривенцев В. И. К методике определений экономической плотности тока для электрических распределительных сетей транспортных средств. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1973, № 1.

2. Бааг Л. А., Захаров С. Н. Методы экономической оценки в энергетике. М., Госэнергоиздат, 1962.

[6.12.1973]



УДК 621.3.018

О точности выявления угла расхождения эквивалентных э. д. с. частей энергосистемы и его производных по времени

МАНСВЕТОВ В. Л.

Ижевск

Угол расхождения эквивалентных э. д. с. частей энергосистемы δ и его производные по времени $\frac{d\delta}{dt}$, $\frac{d^2\delta}{dt^2}$ и т. д. являются основными параметрами,

однозначно определяющими режим работы электропередачи при переходных электромеханических процессах. Поэтому в [Л. 1—3 и др.] указывалось на целесообразность ввода этого параметра режима

в закон автоматического управления и регулирования активной и реактивной мощности для сохранения устойчивости. Датчики угла δ в ряде случаев предпочтительнее датчиков активной мощности вследствие повышенных погрешностей датчиков активной мощности вблизи предела устойчивости, а также неоднозначности активной мощности, как параметра режима, характеризующего устойчивость.

Для получения вектора эквивалентной э. д. с. противоположной части энергосистемы применяют телеметрическое или физическое моделирование [Л. 4 и 5]. При физическом моделировании используют ток в линии связи и напряжение в месте установки выявителя угла δ , что позволяет рассматривать электропередачу как своеобразный канал связи. Однако в [Л. 4 и 5] не рассмотрено влияние на точность моделирования поперечных сопротивлений электропередачи (промежуточные нагрузки, емкости линий и т. п.), несимметричных режимов, а также не даны в достаточно общем виде методы расчета уставок моделирующего устройства, в том числе и линий с распределенными параметрами.

В статье сделана попытка учесть влияние различных факторов на точность выявления угла δ и его производных по времени, даны рекомендации по методам снижения погрешностей, показаны методы расчетов уставок моделирующего устройства в достаточно общем виде.

При анализе погрешностей моделирования принято, что устойчивость внутри каждой из двух частей энергосистемы (рис. 1) не нарушается, т. е. электрические связи внутри каждой из них прияты достаточно жесткими. Генераторы с регуляторами пропорционального действия введены в схему замещения переходными сопротивлениями [Л. 6] или сверхпереходными сопротивлениями, если нарушение устойчивости является следствием короткого замыкания [Л. 7]. Сопротивления генераторов с сильным регулированием возбуждения могут не учитываться [Л. 3]. Все параметры энергосистемы приняты линейными.

Первоначально рассмотрим электропередачу в симметричном режиме. Напряжение \dot{U}_1 в точке K подключения выявительного органа автоматики (рис. 1) и ток в линии связи \dot{I}_1 могут быть выражены как линейная комбинация эквивалентных э. д. с. частей энергосистемы \dot{E}_1 и \dot{E}_{II} [Л. 8]:

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \dot{m}_1 & \dot{m}_2 \\ \dot{m}_3 & -\dot{m}_4 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_{II} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3, \dot{m}_4$ — комплексные коэффициенты, зависящие от параметров схемы замещения.

Вид системы уравнений (1) принципиально не изменится, если ток в линии связи \dot{I}_1 и напряжение \dot{U}_1 привести ко вторичным цепям, поэтому коэффициенты трансформации трансформаторов тока и напряжения, а также коэффициенты, определяемые чувствительностью измерительных органов в дальнейшем для простоты опускаются.

Отношение эквивалентных э. д. с. частей энергосистемы \dot{E}_1 к \dot{E}_{II} , определенное из системы урав-

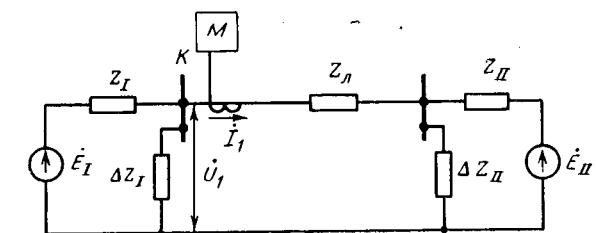


Рис. 1. Схема замещения прямой последовательности электропередачи с поперечными сопротивлениями.

нений (1) имеет вид:

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_{II}} = \frac{\dot{U}_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_4} \dot{I}_1}{\dot{U}_1 - \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} \dot{I}_1} \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_3}, \quad (2a)$$

или

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_{II}} = \frac{Z + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_4} \dot{m}_4}{Z - \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} \dot{m}_3}, \quad (2b)$$

где $\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_4}$ и $\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3}$ — сопротивления частей энергосистемы соответственно I и II, замеренные в схеме замещения со стороны выявителя при поочередно закороченных \dot{E}_1 и \dot{E}_{II} ; $Z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}$ — сопротивление на зажимах выявительного органа автоматики; $\frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_3}$ — коэффициент, определяемый соотношением продольных и поперечных сопротивлений электропередачи.

Отношение $\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_{II}}$ по уравнению (2b) представляет собой дробнолинейную функцию Z , которая при $\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} \neq -\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_4}$ осуществляет взаимно-однозначное и конформное отображение первого рода полной плоскости сопротивления на полную плоскость отношения эквивалентных э. д. с. частей энергосистемы. Это дает возможность проводить анализ поведения выявительных органов угла δ в комплексной плоскости сопротивления прямой последовательности аналогично тому, как он проводится для реле сопротивления [Л. 9]. Конформное отображение плоскости Z на плоскость \dot{E}_1/\dot{E}_{II} осуществляется с помощью выявительного органа угла δ , конструкция которого должна соответствовать уравнениям:

$$\delta = \arg \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_{II}} = \arg \frac{\dot{U}_1 + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_4} \dot{I}_1}{\dot{U}_1 - \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} \dot{I}_1} + \arg \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_3} \quad (3a)$$

или

$$\delta = \arg \frac{Z + \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_4} \dot{m}_4}{Z - \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_3} \dot{m}_3} + \arg \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_3}. \quad (3b)$$

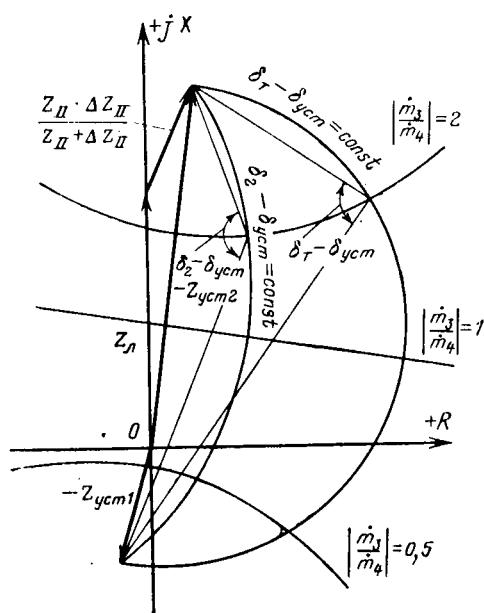


Рис. 2. Характеристика устройства для выявления угла δ в комплексной плоскости сопротивления прямой последовательности.

Комплексные коэффициенты $\frac{m_2}{m_4}$, $\frac{m_1}{m_3}$ в уравнениях (3а) и (3б) являются в заданном режиме уставками модели по сопротивлениям, а $\arg \frac{m_4}{m_3}$ — уставкой по углу:

$$\frac{m_2}{m_4} = Z_{\text{уст1}}; \frac{m_1}{m_3} = Z_{\text{уст2}}; \arg \frac{m_4}{m_3} = \delta_{\text{уст}}. \quad (4)$$

Тогда уравнения (3а) и (3б) можно переписать в виде:

$$\delta = \arg \frac{\dot{U}_1 + Z_{\text{уст1}}i_1}{\dot{U}_1 - Z_{\text{уст2}}i_1} + \delta_{\text{уст}}; \quad (5a)$$

$$\delta = \arg \frac{Z + Z_{\text{уст1}}}{Z - Z_{\text{уст2}}} + \delta_{\text{уст}}. \quad (5b)$$

В сочетании с фазочувствительным органом релейного действия в заданном диапазоне граничных углов срабатывания δ_1 и δ_2 моделирующее устройство представляет собой реле сопротивления [Л. 9], характеристика которого приведена на рис. 2.

Согласно (5а) для точного моделирования угла δ необходимо из напряжения в месте установки выявителя \dot{U}_1 и тока в линии связи i_1 сформировать напряжение $\dot{U}_1 + Z_{\text{уст1}}i_1$, сдвинуть его на угол $\delta_{\text{уст}}$ и сравнить по фазе полученное напряжение с другим напряжением $\dot{U}_1 - Z_{\text{уст2}}i_1$. Для получения первой производной угла δ по времени (скольжения) следует сравнить между собой эти вспомогательные напряжения по частоте; например, с помощью реле разности частот, так как

$$s = -\frac{d\delta}{\omega_0 dt} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}. \quad (6)$$

При этом за счет замера относительного изменения частоты снижаются требования к погрешностям

частотно-чувствительного органа, например, температурным. Использование этого способа позволит также стандартизовать устройства автоматики.

Для схемы замещения электропередачи, указанной на рис. 1, уставки модели по сопротивлениям и углу определяются выражениями:

$$Z_{\text{уст1}} = \frac{Z_1 \Delta Z_1}{Z_1 + \Delta Z_1}; \quad (7a)$$

$$Z_{\text{уст2}} = Z_{\text{II}} + \frac{Z_{\text{II}} \Delta Z_{\text{II}}}{Z_{\text{II}} + \Delta Z_{\text{II}}}; \quad (7b)$$

$$\delta_{\text{уст}} = \arg \frac{1 + \frac{Z_1}{\Delta Z_1}}{1 + \frac{Z_{\text{II}}}{\Delta Z_{\text{II}}}}. \quad (7c)$$

Сопротивления ΔZ_1 и ΔZ_{II} в (7) рассматриваются как шунты нагрузки, емкости линий и т. п. При этом за счет параллельного соединения сопротивлений линий и нагрузок угол максимальной чувствительности ($\arg Z_{\text{уст}}$) отличается от 90° даже для электропередач сверхвысоких напряжений с малым продольным активным сопротивлением (рис. 2) и у модели необходимо иметь регулировку угла максимальной чувствительности.

Дополнительный угловой сдвиг одного из вспомогательных напряжений на величину $\delta_{\text{уст}}$ определяется неоднородностью продольных и поперечных сопротивлений электропередачи и может достигать $20-60^\circ$ (рис. 3) в зависимости от отношения величин продольных и поперечных сопротивлений $\left(\frac{Z_1}{\Delta Z_1}\right)$

и $\left(\frac{Z_{\text{II}}}{\Delta Z_{\text{II}}}\right)$ электропередачи и угла нагрузки φ_{H} (поперечного сопротивления). Как следует из рис. 3, сочетание потребления промежуточной нагрузкой ак-

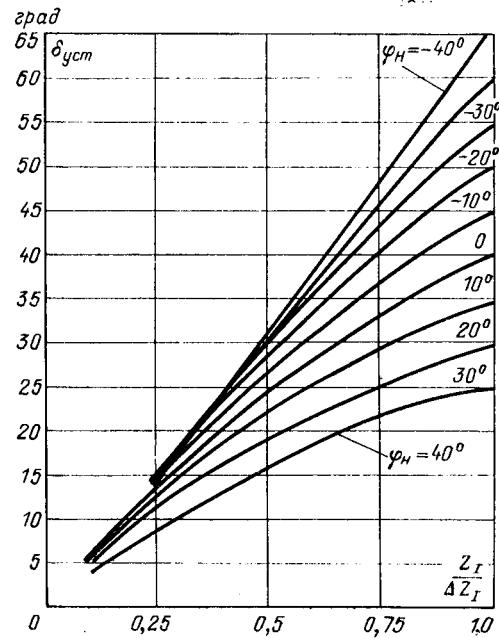


Рис. 3. Влияние электрической удаленности нагрузки от точки приложения эквивалентной э. д. с., ее величины и угла (φ_{H}) на уставку моделирующего устройства по углу ($\delta_{\text{уст}}$).

тивного тока с генерацией реактивного (активно-емкостная нагрузка) оказывает на величину $\delta_{уст}$ наибольшее влияние, хотя чисто реактивная нагрузка при индуктивном продольном сопротивлении электропередачи на $\delta_{уст}$ и не влияет (7в). Следует отметить, что при активно-емкостной нагрузке и $\frac{Z_1}{\Delta Z_1} \leq 0,5$ изменение угла нагрузки в пределах от

—10 до 50° мало сказывается на величине $\delta_{уст}$.

Для линий 500—750 кв без промежуточных отборов мощности собственно емкостная проводимость оказывает влияние на $\delta_{уст}$ лишь при длинах более 1000 км (4—5°) даже при подключении на противоположном конце чисто активной нагрузки. При больших длинах линий 750 кв сказывается их активная проводимость и при длинах порядка 1500 км $\delta_{уст}$ составляет за счет учета этого фактора 26°, снижаясь затем до 4—5° при длинах около 2000 км. На погрешность выявления производных угла δ по времени этот угловой сдвиг влияет в том случае, если учитывать динамические характеристики промежуточных нагрузок.

Так как модули вспомогательных напряжений (5а) равны между собой по величине только при установке модели в центре качаний электропередачи и при отсутствии или, по крайней мере, равном влиянии поперечных сопротивлений, то для обеспечения наибольшей точности выявления угла δ и его производных в общем случае необходимо применять фазочувствительные и частотно-чувствительные схемы, у которых выходная величина не зависит от амплитуд сравниваемых напряжений, т. е. с предварительным амплитудным ограничением.

Из уравнения (5б) следует, что точность выявления угла δ и его производных по времени не зависит отдельно от величины напряжения и тока в линии связи и определяется лишь соответствием уставок модели по сопротивлениям ($Z_{уст1}$, $Z_{уст2}$) и углу ($\delta_{уст}$) заданному составу электропередачи, т. е. ее схеме замещения прямой последовательности.

Погрешность по углу при отклонении действительных величин $\frac{m_2}{m_4}$, $\frac{m_1}{m_3}$ и $\arg \frac{m_4}{m_3}$ от соответствующих уставок модели $Z_{уст1}$, $Z_{уст2}$ и $\delta_{уст}$

$$\Delta\delta = \arg \frac{Z - \frac{m_1}{m_3}}{Z - Z_{уст2}} + \arg \frac{Z + Z_{уст1}}{Z + \frac{m_2}{m_4}} + \delta_{уст} - \arg \frac{m_4}{m_3}. \quad (8)$$

Из рис. 4 следует, что если суммарное действительное сопротивление

$$\text{электропередачи} \frac{m_2}{m_4} + \frac{m_1}{m_3}$$

больше сопротивлений уставок модели $Z_{уст1} + Z_{уст2}$, то на выходе фазочувствительного органа модели в I и II квадрантах комп-

лексной плоскости $\frac{E_1}{E_2}$ по-

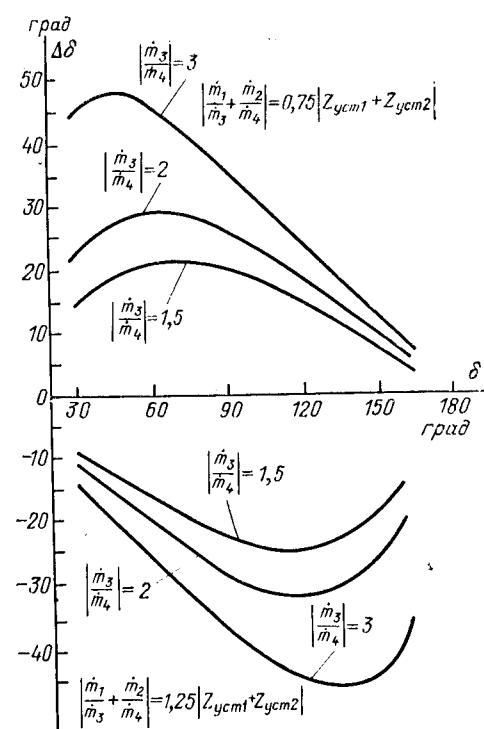


Рис. 4. Погрешности по углу $\Delta\delta$ при несоответствии уставок модели по сопротивлениям действительной схеме замещения

электропередачи при различных величинах $\left| \frac{m_3}{m_4} \right|$.

лучаются заниженные по сравнению с действительным значением угла δ (погрешности отрицательные). В III и IV квадрантах, когда э. д. с. E_1 отстает по фазе от э. д. с. E_2 , погрешность модели по углу изменяет знак, а при углах 180 и 0° — приближается к нулю. Соответственно при этом появляется погрешность выявления производных угла δ по времени.

В табл. 1 приведена зависимость допустимых отклонений сопротивлений уставок модели от величины $\left| \frac{m_3}{m_4} \right|$, характеризующей степень шунтирования

электропередачи при угле электропередачи $\delta = 90^\circ$ и заданной погрешности по углу $\Delta\delta = \pm 5^\circ$. Допустимые отклонения сопротивлений уставок даны в процентах по отношению к сумме ($Z_{уст1} + Z_{уст2}$). Из этой таблицы видно, что при повышении степени шунтирования электропередачи в части энергосистемы II (рис. 1) и индуктивном характере шунта ΔZ_{II} требуется увеличение точности в вычислении

Таблица 1

| $\left \frac{m_3}{m_4} \right $ | 0,33 | 0,5 | 0,6 | 0,66 | 1 | 1,5 | 1,7 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------------------|--------------|----------------|--------------|------------|-------------|------------|----------------|------------|--------------|--------------|----------------|
| $\Delta Z_{уст1}$, % | +3,0 -2,5 | +4 -3 | +5 -5 | +6 -5,5 | +10 -7,5 | +15 -13 | +17,5 -12,5 | +24 -14 | +91,5 -14 | +65 -27,5 | +70 -27,5 |
| $\Delta Z_{уст2}$, % | +36 -23 | +27,5 -21,5 | +16 -12,5 | +15 -12 | +10 -7,5 | +6,5 -5 | +5,5 -5 | +5 -4 | +3,5 -3 | +2 -2,25 | +1,65 -1,65 |

Таблица 2

| Z_{II} | углы нагрузки (φ_H), град | | | | | | | | | |
|----------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| 0,25 | 0,82 | 0,85 | 0,9 | 0,94 | 0,98 | 1,04 | 1,08 | 1,11 | 1,15 | 1,18 |
| 0,5 | 0,68 | 0,77 | 0,86 | 0,95 | 1,04 | 1,12 | 1,2 | 1,26 | 1,33 | 1,38 |
| 0,75 | 0,64 | 0,77 | 0,9 | 1,03 | 1,14 | 1,25 | 1,36 | 1,45 | 1,52 | 1,6 |
| 1 | 0,67 | 0,84 | 0,99 | 1,15 | 1,28 | 1,41 | 1,52 | 1,65 | 1,74 | 1,82 |

и регулировке уставки модели по сопротивлению $Z_{уст2}$ той части энергосистемы, со стороны которой это шунтирующее влияние оказывается в наибольшей степени, а требование к выбору и регулировке уставки противоположной части энергосистемы при этом значительно снижается.

При емкостном характере шунта нагрузки в той же части энергосистемы II (рис. 1), когда величина $\left| \frac{m_3}{m_4} \right| \leq 1$, требования к точности уставки $Z_{уст2}$ снижаются. Коэффициент шунтирования электропередачи $\left| \frac{m_3}{m_4} \right|$ определяется в большей степени реактивной составляющей сопротивления нагрузки, что иллюстрируется табл. 2, составленной при наличии шунта нагрузки только в части II энергосистемы (рис. 1). При подключении нагрузки в двух частях энергосистемы не исключается равенство $\left| \frac{m_3}{m_4} \right| = 1$, а также равенство $\delta_{уст} = 0$.

При изменении состава электропередачи, например, при включениях и отключении нагрузок и генераторов, участков линий происходит скачок угла δ , выявленного моделью на величину погрешности $\Delta\delta$ по углу, так как моделирующее устройство выявляет лишь электромагнитную связь между эквивалентными э. д. с. Соответственно происходит скачок производных этого угла по времени. Поэтому для сохранения точности моделирования при превышении заданных погрешностей следует производить автоматическое изменение уставок по сопротивлениям ($Z_{уст1}$, $Z_{уст2}$) и углу ($\delta_{уст}$).

Следует, однако, заметить, что в связи с параллельным включением продольных и поперечных сопротивлений частей энергосистемы (7), они оказывают друг на друга взаимно-стабилизирующее влияние.

В табл. 3 показано изменение сопротивления $\frac{Z_{II}\Delta Z_{II}}{Z_{II} + \Delta Z_{II}}$ по отношению к первоначально заданному его значению с $\cos \varphi'_{II} = 0,8$ при отклонениях коэф-

фициента мощности нагрузки и величин продольных и поперечных сопротивлений. (Текущие значения этих сопротивлений отмечены двумя штрихами, первоначальные — одним штрихом).

Из табл. 3 следует, что изменение сопротивления нагрузки в 8 раз при сохранении остальных параметров неизменными требует относительно небольшого изменения уставки модели по сопротивлению.

Если сопротивление линии Z_L (7) велико по сравнению с $\frac{Z_{II}\Delta Z_{II}}{Z_{II} + \Delta Z_{II}}$, то $Z_{уст2}$ при изменениях $\frac{Z_{II}\Delta Z_{II}}{Z_{II} + \Delta Z_{II}}$ отклоняется еще в меньшей степени.

Стабилизирующее влияние на уставки модели по сопротивлению оказывает и обратно-пропорциональная зависимость сопротивления нагрузки от ее мощности, что оказывается наиболее благоприятно на точности моделирования при значительных мощностях нагрузок. В этом отношении устройство моделирования угла δ и его производных имеют преимущество перед датчиками активной мощности [Л. 10].

В несимметричном режиме, если моделирующее устройство включено на разность фазных токов линий связи и соответствующее линейное напряжение, появляется дополнительная погрешность, обусловленная составляющими обратной последовательности. Действительно, при включении моделирующего устройства на ток \dot{I}_{ab} и напряжение \dot{U}_{ab} :

$$\delta = \arg \frac{\dot{U}_1 + Z_{уст1}\dot{I}_1 + e^{-j60^\circ}(\dot{U}_2 + Z_{уст1}\dot{I}_1)}{\dot{U}_1 - Z_{уст1}\dot{I}_1 + e^{-j60^\circ}(\dot{U}_2 - Z_{уст2}\dot{I}_2)} + \delta_{уст}, \quad (9)$$

где \dot{U}_1 , \dot{I}_1 — составляющие прямой последовательности, отнесенные к особой фазе a ; \dot{U}_2 , \dot{I}_2 — составляющие обратной последовательности, отнесенные к той же фазе.

Подставляя в это уравнение соответствующие симметричные составляющие, определяемые из граничных условий несимметричного режима [Л. 7], можно определить величину погрешности по углу $\Delta\delta$, вносимой в заданном режиме составляющими обратной последовательности. Так, при двухфазном коротком замыкании на землю фаз b и c в части энергосистемы II (рис. 1) угловая погрешность

$$\Delta\delta = -\arg \left[1 + e^{-j60^\circ} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0\Sigma} + Z_{2\Sigma}} \left(\left| \frac{\dot{E}_I}{\dot{E}_{II}} \right| e^{j\delta} - 1 \right) \right], \quad (10)$$

где $Z_{2\Sigma}$ и $Z_{0\Sigma}$ — сопротивления обратной и нулевой

Таблица 3

| $\frac{\Delta Z_{II}'' Z_{II}'}{\Delta Z_{II}'' Z_{II}'}$ | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 | 1,5 | 2 |
|---|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\cos \varphi_H'' = 1$ | $0,81e^{j152^\circ}$ | $0,625e^{j180^\circ}$ | $0,51e^{j212^\circ}$ | $0,46e^{j243^\circ}$ | $0,40e^{j268^\circ}$ | $0,535e^{j284^\circ}$ | $0,608e^{j305^\circ}$ |
| $\cos \varphi_H'' = 0,8$ | $0,72e^{j140^\circ}$ | $0,385e^{j145^\circ}$ | $0,17e^{j154^\circ}$ | 0 | $0,13e^{j333^\circ}$ | $0,22e^{j336^\circ}$ | $0,35e^{j343^\circ}$ |
| $\cos \varphi_H'' = 0$ | $0,7e^{j114^\circ}$ | $0,54e^{j97^\circ}$ | $0,48e^{j83^\circ}$ | $0,45e^{j64^\circ}$ | $0,46e^{j51^\circ}$ | $0,48e^{j42^\circ}$ | $0,53e^{j30^\circ}$ |

последовательностей, отнесенные к месту короткого замыкания.

При выводе (10) предполагалось отсутствие нагрузок в частях I и II энергосистемы и соответствие уставок модели по сопротивлениям и углу заданному режиму. При других уставках погрешность моделирования будет еще большей.

Из табл. 4, где показаны для этого режима значения погрешностей $\Delta\delta$ (в градусах) при различных углах δ , величинах $|m_3/m_4|$ и $Z_{0\Sigma}/Z_{2\Sigma}$, следует, что погрешности могут достигать 90° .

Таблица 4

| $Z_{0\Sigma}$ $Z_{2\Sigma}$ | $\left \frac{m_3}{m_4}\right $ | Углы δ , град | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|----------|------------|--------------|------------|-------------|
| | | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
| 1 3 | 2 3 | -2 -7 | 5,5 7 | 19,5 21 | 30,5 34,5 | 39 48 | 40 61 |
| 1 | 2 3 | -2 -9,5 | 9 10 | 31 30 | 47 49 | 63 77 | 80 91 |
| 3 | 2 3 | -4 -11,5 | 11 12 | 37 34 | 56 55,5 | 75 78,5 | 95 101,5 |

При двухфазном коротком замыкании фаз a и b выявительный орган, включенный на ток I_{ab} и напряжение \dot{U}_{ab} на угол δ не реагирует:

$$\begin{aligned} \delta &= 180^\circ + \delta_{\text{уст}} = \text{const} \text{ при } Z < Z_{\text{уст}}; \\ \delta &= \delta_{\text{уст}} = \text{const} \quad \text{при } Z > Z_{\text{уст}}. \end{aligned} \quad (11)$$

В неполнофазном режиме также появляется дополнительная погрешность по углу $\Delta\delta$. Так, при разрыве фазы b эта погрешность составляет:

$$\Delta\delta = -\arg \left[1 + e^{j60^\circ} \frac{Z_{0\Sigma}}{Z_{0\Sigma} + Z_{2\Sigma}} \left(\begin{vmatrix} \dot{E}_I \\ \dot{E}_{II} \end{vmatrix} e^{j\delta} - 1 \right) \right], \quad (12)$$

где $Z_{0\Sigma}$ и $Z_{2\Sigma}$ — суммарные сопротивления обратной и нулевой последовательностей, приведенные к месту разрыва.

В табл. 5 приведены погрешности по углу $\Delta\delta$ (в градусах) в функции от угла δ для различных

Таблица 5

| δ , град | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 |
|-----------------|-------|-------|-----|-------|-----|-----|------|------|-----|
| Фаза a | -11,5 | -24,5 | -39 | -52,5 | -66 | -80 | -92 | -100 | -90 |
| Фаза b | -10 | -10 | 95 | 100 | 90 | 79 | 65,5 | 52 | 39 |
| Фаза c | 12,5 | 27 | 23 | 19 | 9 | 0 | -9 | -17 | -23 |

сочетаний разорванных фаз. При включении модели на фазные токи появляется дополнительная фазовая погрешность за счет составляющих нулевой последовательности. Переход одного вида несимметрии в другой приводит к изменениям величин и знаков угловых погрешностей, что, по-видимому, являлось одной из причин наблюдавшихся на практике ложных срабатываний устройства типа РНР. Поэтому для исключения погрешностей в несимметричных режимах следует включать моделирующее устройство на составляющие токов и напряжений прямой последовательности, что особенно важно, если оно используется для выявления нарушений динамической устойчивости. Уставки модели в этом случае должны определяться из схемы замещения прямой последовательности.

При трехфазном коротком замыкании на единственной линии связи частей энергосистемы определятель системы уравнений (1) равен нулю, так как $m_2 = m_4 = 0$. Эта система становится несовместной и моделирующее устройство угол δ не выявляет, т. е. действует, по существу, неправильно, и поэтому при использовании на выходе модели фазочувствительного органа релейного действия следует исключать из зоны действия углы, близкие к $180^\circ + \delta$ и δ . Это позволит также отказаться от блокировок устройства при отключении автомата в цепях напряжения.

Выше было показано, что точность моделирования определяется соответствием уставок модели по сопротивлениям и углу действительной схеме замещения электропередачи прямой последовательности.

Однако расчет уставок модели (коэффициентов $\frac{m_2}{m_4}$, $\frac{m_1}{m_3}$ и $\arg \frac{m_4}{m_3}$)

методом наложения [Л. 8] громоздок, особенно для сложных современных схем сетей. Более общий метод вычисления уставок, пригодный для использования на ЦВМ, основывается на приведении всех элементов электропередачи к двум эквивалентным четырехполюсникам (рис. 5) и выражении уставок через эквивалентные параметры этих четырехполюсников в формах $\|\dot{A}\|$ или $\|\dot{G}\|$. В других формах уравнений четырехполюсников выражения для уставок получаются громоздкими. Эквивалентные четырехполюсники, указанные на рис. 5, являются в общем случае несимметричными, так как при учете поперечных сопротивлений $\dot{A} \neq \dot{D}$. Входными приняты зажимы четырехполюсников со стороны эквивалентных э. д. с. частей энергосистемы.

Уставки модели по сопротивлениям и углу имеют в форме $\|\dot{A}\|$ для рис. 5 следующий вид:

$$Z_{\text{уст}} = \frac{\dot{B}_1}{\dot{A}_1}; \quad Z_{\text{уст}2} = \frac{\dot{B}_2}{\dot{A}_2}; \quad \delta_{\text{уст}} = \arg \frac{\dot{A}_1}{\dot{A}_2}, \quad (13)$$

где $\dot{A}_1, \dot{B}_1, \dot{A}_2, \dot{B}_2$ — эквивалентные параметры соответствующих четырехполюсников.

Физический смысл уставок моделирующего устройства становится ясным, если учесть, что отношение \dot{B}/\dot{A} четырехполюсника представляет собой его сопротивление короткого замыкания, измеренное со стороны выходных зажимов, т. е. со стороны, к которой подключено это устройство.

Для сложной схемы электропередачи ее следует разделить на отдельные четырехполюсники, затем привести их путем соответствующих преобразова-

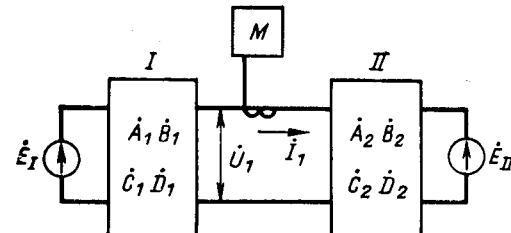


Рис. 5. Представление электропередачи двумя четырехполюсниками.

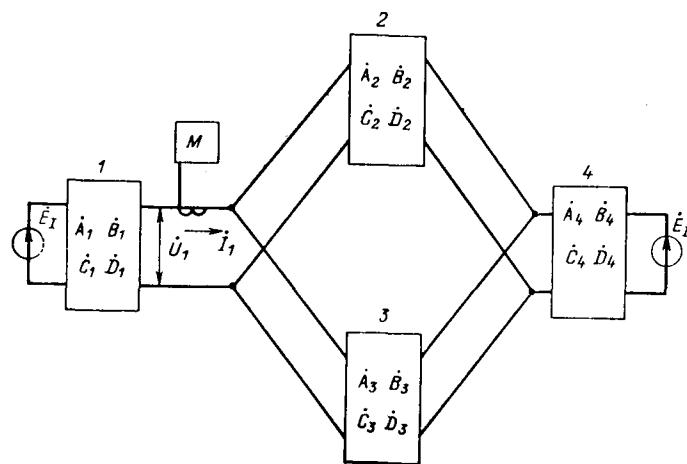


Рис. 6. Параллельное и каскадное соединение четырехполюсников в части энергосистемы II.

ний [Л. 8] к двум эквивалентным и вычислить, по крайней мере, параметры \dot{A} и \dot{B} каждого из них. Для примера вычислены уставки для схемы рис. 6:

$$Z_{\text{уст1}} = \frac{\dot{B}_1}{\dot{A}_1}; \quad (14a)$$

$$Z_{\text{уст2}} = \frac{1}{\frac{\dot{A}_2 + \dot{B}_3}{\dot{B}_2 + \dot{B}_3} \cdot \frac{\dot{B}_4}{\dot{B}_2 \dot{B}_3} \times \frac{1}{(\dot{B}_2 + \dot{B}_3) \left(\dot{C}_2 + \dot{C}_3 - \frac{\dot{A}_2 \dot{D}_2}{\dot{B}_2} - \frac{\dot{A}_3 \dot{D}_3}{\dot{B}_3} \right)} \times \frac{1}{\dot{A}_4 + \dot{B}_4 \left(\frac{\dot{D}_2}{\dot{B}_2} + \frac{\dot{D}_3}{\dot{B}_3} \right)}; \quad (14b)$$

$$\delta_{\text{уст}} = -\arg \left\{ \left[\dot{A}_4 + \dot{B}_4 \left(\frac{\dot{D}_2}{\dot{B}_2} + \frac{\dot{D}_3}{\dot{B}_3} \right) \right] \frac{\dot{A}_2 \dot{B}_3 + \dot{A}_3 \dot{B}_2}{\dot{B}_2 + \dot{B}_3} - \dot{B}_4 \left(\dot{C}_2 + \dot{C}_3 - \frac{\dot{A}_2 \dot{D}_2}{\dot{B}_2} - \frac{\dot{A}_3 \dot{D}_3}{\dot{B}_3} \right) \right\} + \arg \dot{A}_1. \quad (14b)$$

Для длинных линий с распределенными параметрами уставки модели могут быть рассчитаны аналогично после представления этих линий эквивалентными четырехполюсниками.

Как видно из выражений (14), с усложнением схемы электропередачи резко возрастает объем вычислительных работ по определению уставок и затрудняется анализ влияния изменений параметров схемы замещения на уставки моделирующего устройства. Поэтому становится целесообразным производить расчет уставок на модели переменного тока. Для определения уставок по сопротивлению необходимо в соответствии с (13) поочередно замерить сопротивления частей энергосистемы со стороны установки выявителя. На период замеров соответствующие эквивалентные э. д. с. закорачиваются, а линия связи в месте установки выявителя размыкается. Для определения уставки по углу ($\delta_{\text{уст}}$) следует произвести на модели замер коэффициентов m_3 и m_4 , исходя из уравнения для тока в системе (1), а затем вычислить уставку по (4).

Выводы. 1. При физическом моделировании эквивалентных э. д. с. двух частей энергосистемы

с жесткими связями внутри каждой из них с помощью выявительного органа автоматики должно осуществляться конформное дробно-линейное отображение первого рода полной плоскости сопротивления Z на полную плоскость отношения эквивалентных э. д. с. частей энергосистемы \dot{E}_1 / \dot{E}_{11} .

Анализ поведения выявительных органов угла δ можно производить в комплексной плоскости сопротивления прямой последовательности.

2. Точность выявления угла δ и его производных по времени зависит от соответствия уставок моделирующего устройства по сопротивлениям и углу схеме замещения прямой последовательности электропередачи и не зависит отдельно от напряжения в месте установки автоматики и тока в линии связи.

3. Промежуточные нагрузки, особенно активно-емкостные, оказывают стабилизирующее влияние на уставки модели по сопротивлению и, следовательно, на точность моделирования. На дополнительный фазовый сдвиг ($\delta_{\text{уст}}$) моделируемых напряжений наибольшее влияние оказывает активно-емкостная нагрузка.

4. Для повышения точности выявительных органов угла δ и его производных по времени должны применяться фазочувствительные и частотно-чувствительные схемы, у которых выходная величина не зависит от амплитуд сравниваемых напряжений.

5. Погрешности моделирующего устройства в несимметричных режимах снижаются, если для моделирования использовать напряжение и ток прямой последовательности.

6. Выбор уставок моделирующего устройства целесообразно производить после приведения схемы замещения электропередачи к двум эквивалентным четырехполюсникам. Анализ влияния изменений параметров электропередачи на точность моделирования при сложной схеме упрощается при использовании ЦВМ и модели переменного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ботвинник М. М. Регулирование возбуждения и статическая устойчивость синхронной машины. М., Госэнергоиздат, 1950.
- Веников В. А., Никитин Д. В., Штробель В. А., Рубин В. Б. Регулирование турбины как средство улучшения переходных процессов электрических систем. — «Электричество», 1967, № 2.
- Веников В. А., Герценберг Г. Р., Соловьев С. А., Соколов Н. И. Сильное регулирование возбуждения. М., Госэнергоиздат, 1963.
- Росман Л. В. Пусковой орган для автоматической ресинхронизации синхронных генераторов. — «Электричество», 1959, № 7.
- Киракосов В. Г., Лугинский Я. Н., Портной М. Г. Автоматическая разгрузка и отключение гидрогенераторов при увеличении угла электропередачи. — «Электричество», 1967, № 3.
- Анисимова Н. Д., Жуков Л. А., Гусейнов А. М. Инженерная методика упрощающих преобразований электрических систем. — «Электричество», 1966, № 8.
- Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы. М., «Энергия», 1970.
- Атабеков Г. И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М., Госэнергоиздат, 1957.
- Фабрикант В. Л. Основы построения измерительных органов релейной защиты и автоматики. М., «Высшая школа», 1968.
- Берлянд Э. Г., Гуарий М. И. Влияние промежуточной нагрузки на изменение токов и мощности межсистемной связи при асинхронном режиме. — «Электричество», 1970, № 8.

27.7.1973

О разработке системы электроснабжения промышленных предприятий с двумя номинальными частотами¹

Доктор техн. наук ВЕНИКОВ В. А., канд. техн. наук СОКОЛОВ В. И.
Москва

Об эффективности применения переменного тока повышенной частоты на промышленных предприятиях. За десятилетие после опубликования предложений [Л. 1] о проведении комплекса научно-исследовательских работ по изучению целесообразности и возможности повышения частоты переменного тока в системах электроснабжения выполнено ряд работ и приобретен некоторый опыт применения повышенной частоты 100—400 гц. В соответствии с «Уточненным сводным планом научно-исследовательских и конструкторских работ» [Л. 2] по данной проблеме выполнены исследования, обсуждавшиеся на ряде всесоюзных совещаний и конференций, принятые решения по применению переменного тока повышенной частоты в отраслях народного хозяйства [Л. 2], достигнута определенная степень ясности вопроса.

Кратко резюмируя основные итоги проведенных исследований и полученные выводы, можно отметить следующее. Наиболее обстоятельное исследование целесообразности повышения частоты выше 50 гц с изготовлением и опробованием в работе опытных образцов, партий и серий электрооборудования повышенной частоты и высокогооборотных механизмов проведено в сельскохозяйственной электрификации, где получены убедительные доказательства большой экономичности повышения частоты в целых районах до 100—400 гц [Л. 3]. Ценный опыт проектирования, внедрения и эксплуатации оборудования с повышенной номинальной частотой получен в системах электроснабжения судов. Этот опыт оказался положительным и получил распространение [Л. 4]. Применительно к промышленным электроустановкам исследования показали экономическую выгодность повышения номинальной частоты для различных групп электроприемников.

Асинхронные электродвигатели с номинальным числом оборотов 3000 об/мин имеют оптимальные весогабаритные и стоимостные показатели при числе пар полюсов $p=2$ и $p=3$, т. е. четырехполюсной и шестиполюсной конструкции. Оптимальная частота для таких двигателей равна 100—150 гц. При числе оборотов асинхронных двигателей $n=3000$ об/мин любая частота от 70 до 200 гц обеспечивает лучшие технико-экономические характеристики, чем 50 гц.

На рис. 1 показана зависимость веса асинхронного двигателя 14 квт от его номинальной частоты [Л. 4]. В соответствии с рис. 1, если приводной механизм может быть создан на повышенные обороты 6000—9000 об/мин, то вес, габариты и стоимость двигателя и механизма сначала снижаются еще более, приблизительно пропорционально повышению частоты.

Учитывая, что удельная стоимость асинхронных двигателей разного конструктивного исполнения и мощности составляет 3—10 руб/квт, можно ориентировочно оценить экономию капитальных затрат на асинхронные двигатели при повышении их частоты до 100 гц в 1—5 руб/квт. Приблизительно такую же экономию капитальных затрат можно получить с применением повышенной номинальной частоты 100 гц и для синхронных двигателей.

Кроме того, повышение номинальной частоты позволяет снизить расходы на компенсацию реактивной мощности двигателей, так как необходимая для этого емкость обратно пропорциональна частоте. При одновременном повышении частоты и оборотов двигателя создаются условия для повышения производительности труда, что также свидетельствует об экономической целесообразности повышения частоты. Эксплуатационные расходы остаются на том же уровне, что и при частоте 50 гц, так как приведенные на рис. 1 кривые построены при постоянстве к. п. д.

Трансформаторы распределительных сетей промышленных предприятий с переходом на повышенную частоту 100 гц могут применяться без конструктивных изменений и нагружаться на большую мощность, чем при частоте 50 гц. Увеличение частоты при постоянстве мощности и плотности тока в обмотках приводит к соответственному уменьшению магнитного потока и объема стали или числа витков обмоток и к дополнительному снижению веса меди.

Если не учитывать влияние теплового баланса на конструктивные параметры, то изменение веса активных материалов трансформатора происходит обратно пропорционально частоте. С учетом влияния теплового баланса получается, что при замене трансформатора серии ТМ 50 гц на трансформаторы той же конструкции, но повышенной частоты до 300 гц можно получить удельную экономию капитальных затрат приблизительно 2 руб/квт и экономию эксплуатационных расходов около 0,5 руб/квт в год.

Поэтому преобразовательные агрегаты, электрические печи, установки для термообработки и другие электроприемники, имеющие собственные трансформаторы, дают экономию при внедрении повышенной частоты даже в том случае, если сами технологические установки безразличны к изменению частоты. Но в установках индукционного нагрева весьма эффективно применяется повышенная частота 500—10 000 гц. Поэтому повышение частоты и до 100—400 гц несомненно улучшит технико-экономические показатели работы индукционных печей, установок индукционного нагрева деталей при горячей их обработке, сушки лакокрасочных покрытий и т. п.

Люминесцентные лампы, применение которых все время расширяется благодаря их высокой световой отдаче по сравнению с лампами накаливания, существенно улучшают светоотдачу при повышении частоты переменного тока. По данным [Л. 5] с повышением частоты с 50 до 100 гц световая отдача повышается на 1—3%, а при частоте 2500 гц — на 7—14%; к. п. д. ламп повышается на такой же процент.

Но самое важное улучшение работы люминесцентных ламп в том, что с повышением частоты снижается и исчезает стробоскопический эффект. Небольшое послесвечение люминофоров недостаточно для сглаживания изменений светового потока дважды за период 0,02 сек. При токе 50 гц колебание светового потока за полупериод достигает 45%. С повышением частоты это явление исчезает, так как уменьшается период снижения напряжения до 0,01, 0,005 сек и т. д. И тогда послесвечение люминофоров оказывается достаточным для сглаживания колебаний светового потока.

На рис. 2 приведена зависимость от частоты коэффициента пульсации светового потока, являющегося характеристикой стробоскопического эффекта газоразрядных источников света. Из рис. 2 видно, что при частоте 400 гц коэффициент пульсации вдвое меньше, чем при частоте 50 гц.

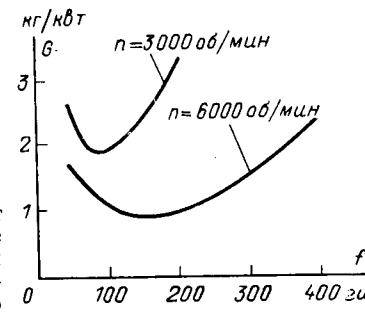
Повышение частоты способствует ущемлению пускорегулирующей аппаратуры люминесцентных ламп. Сумма всех благоприятных эффектов от повышения частоты дает существенный экономический эффект при переводе всех газоразрядных ламп предприятия на повышенную частоту.

О целесообразности применения переменного тока различной частоты на одном предприятии. Указанные выше электроприемники — высокогооборотные электродвигатели, установки индукционного нагрева, газоразрядные светильники и другие при переводе на повышенную частоту 100—150 (400) гц дают экономию единовременных затрат в среднем 2—3 руб/квт и некоторое сокращение эксплуатационных расходов (весьма различное на разных участках). Дополнительная экономия капитальных затрат и повышение производительности труда получаются при повышении скорости приводных механизмов выше 3000 об/мин.

Другая часть электроприемников безразлична к повышению частоты: лампы накаливания, электрические печи сопротивления, некоторые приемники электрохимических производств и т. п. — они не изменяют свои технико-экономические показатели в зависимости от частоты переменного тока. Значительное число электроприемников при повышении частоты выше

¹ В порядке обсуждения.

2 Электричество № 6, 1974.



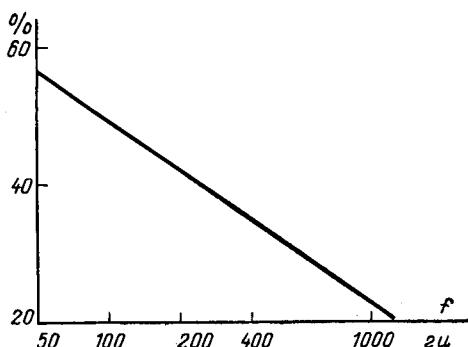


Рис. 2.

50 гц ухудшает технико-экономические характеристики. Это относится к тихоходным электродвигателям, число которых на различных предприятиях велико.

Отсюда следует, что целесообразно осуществлять электроснабжение промышленных предприятий на переменном токе двух частот: 50 гц и на повышенной частоте 100—400 гц. Причем оптимальная частота для двигателей и турбогенераторов переменного тока равна 100—150 гц.

При наличии в системе электроснабжения предприятия переменного тока двух номинальных частот появляется возможность подключения двигателей переменного тока повышенной номинальной частоты к сети любой из этих частот. Это равносильно тому, что каждый двигатель переменного тока имеет две номинальные скорости вращения. Причем это достигается без дополнительных затрат на двигатели, в то время как двухскоростные машины значительно дороже, чем односкоростные, и имеют низкий коэффициент использования меди. Технологический процесс в цехах получает дополнительное регулирование: снижение производительности насосов, вентиляторов, центрифуг и других вращающихся механизмов при переводе их электроприводов с частоты 100 на 50 гц. Это даст новую возможность значительной экономии в производственном процессе.

Теоретические вопросы использования электродвигателей переменного тока повышенной частоты в сети более низкой частоты рассмотрены в [Л. 6]. Как известно, при переводе двигателя на более низкую частоту напряжение в этой сети должно быть понижено пропорционально отношению частот. При соответствующем выборе ответвлений трансформаторов номинальное напряжение 660 в в сети с частотой 100 гц и 380 в в сети с частотой 50 гц отвечает задаче использования одних и тех же двигателей на двух частотах—100 и 50 гц.

Выбор источника переменного тока повышенной частоты для промышленного предприятия. Задача состоит в том, чтобы найти такие источники и схемы питания электропотребителей на повышенной частоте, затраты на которые окупались бы в нормативный срок окупаемости. Это значит, что при ожидаемой экономии единовременных затрат 2—3 руб/квт стоимость преобразователей частоты должна быть ниже этой величины, а эксплуатационные расходы на преобразование частоты—близкими нулю. Но таких преобразователей частоты пока нет. Поэтому подключение электроприемников повышенной частоты 100—400 гц по схеме «источник тока 50 гц—преобразователь частоты—токоприемник 100—400 гц» не может рассматриваться как мероприятие для повышения экономичности электроснабжения и электрооборудования. Такая схема преобразования применяется только при необходимости повышения частоты по причинам чисто техническим, а не из соображений экономической целесообразности.

Для реализации экономии затрат на электрооборудование и электроснабжение промышленных предприятий необходимо

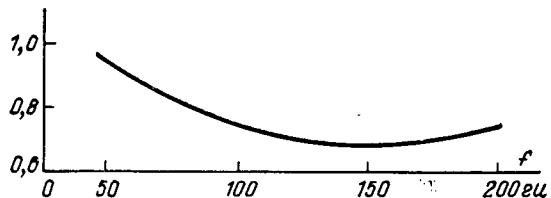


Рис. 3.

иметь непосредственную связь источников и потребителей переменного тока повышенной частоты. Дорогостоящее звено преобразования частоты должно отсутствовать в этой цепи.

Исследования [Л. 7] показали, что стоимость турбогенераторов имеет минимум при частоте 100—200 гц (рис. 3). Причем, снижение удельной стоимости турбогенераторов при повышении номинальной частоты до 100 гц составляет 20—25%, а до 150 гц—30%, что соответствует экономии 2—3 руб/квт·а. Отсюда следует, что прямая связь турбогенераторов номинальной частоты 100—150—400 гц с электроприемниками той же частоты позволяет удвоить экономию затрат.

На рис. 4 показана принципиальная схема электроснабжения промышленного предприятия переменным током промышленной частоты 50 гц от энергосистемы и местной ТЭЦ и питания части электроприемников на повышенной частоте 100—400 гц при непосредственной их связи с генераторами повышенной частоты той же ТЭЦ². В этой схеме предусматривается блок для связи между шинами ТЭЦ, к которым подключены генераторы и нагрузки различной номинальной частоты.

Система электроснабжения предприятия при наличии двух различных частот может работать и при отсутствии связи между ними. Но при этом понижается надежность электроснабжения, усложняются вопросы резервного питания, выдачи избытка мощности генераторов повышенной частоты в систему и получения дефицитной мощности на шине 100—400 гц при ремонте генераторов повышенной частоты. Целесообразность объединения систем электроснабжения общеизвестна. Необходимо найти устройство для связи двух частей системы электроснабжения предприятий с различными номинальными частотами на шинах местной электростанции, принадлежащей данному предприятию или энергетической системе.

Энергетическая связь систем электроснабжения предприятия через энергоблок с двумя генераторами. Для решения задачи непрерывного и реверсивного обмена мощностью между двумя частями системы электроснабжения предприятия при различии их номинальной частоты предлагается устройство энергоблока с двумя генераторами и турбиной на общем валу. Принципиальная схема электроснабжения предприятия при осуществлении такой связи приведена на рис. 4.

Генератор 1 частоты 50 гц подключается к шинам ТЭЦ и к системе электроснабжения 50 гц. Генератор 2 частоты 100—400 гц подключается к шинам ТЭЦ и к сети повышенной частоты. Номинальное число оборотов генераторов 1, 2 и турбины

² Данная схема применима для предприятий, имеющих свою ТЭЦ или недалеко расположенную электростанцию энергосистемы, где возможна установка дополнительных генераторов повышенной частоты или замена старых агрегатов.

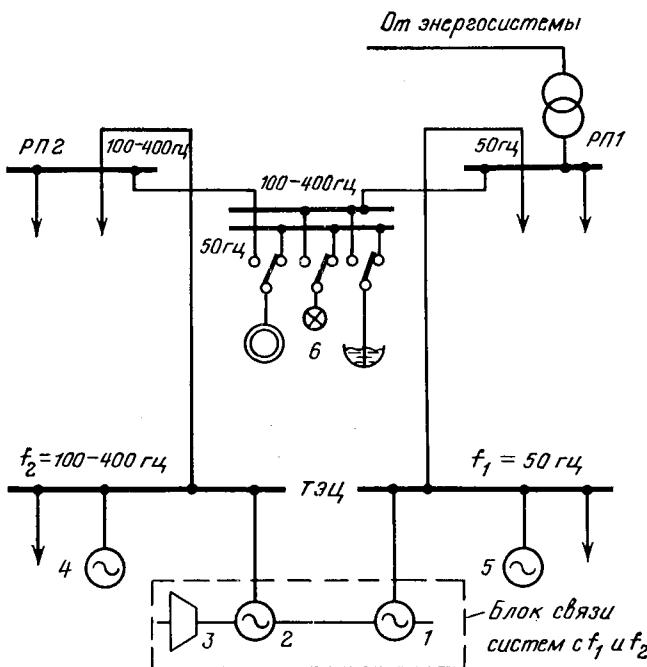


Рис. 4.

ны 3 одно и то же, так как роторы их расположены на одном валу. Числа полюсов ротора 1 и ротора генератора 2 различны и отличаются в f_2/f_1 раз.

Мощность турбины данного блока распределяется на оба генератора: может передаваться в обе системы одновременно или через один из генераторов полностью в одну систему и, если позволяет мощность генератора, через один генератор может быть передана вся мощность турбины, а также мощность из другой системы за счет работы второго генератора в двигательном режиме на общий вал совместно с турбиной.

С учетом того, что в системе электроснабжения повышенной частоты нет связи с энергосистемой помимо шин ТЭЦ, мощность генераторов повышенной частоты должна быть больше расчетной максимальной мощности потребителей 100—400 Гц. Если половина мощности турбины 3 сдвоенного блока при максимуме нагрузки повышенной частоты передается через генератор 1 в систему 50 Гц, то при ремонте одного из генераторов 100—400 Гц такой же переток мощности должен поступать из системы 50 Гц через 1 на вал и далее через генератор 2 в сеть 100—400 Гц.

Отсюда определяется требуемая мощность энергоблока 1 и 2: мощность генератора 1 должна быть не меньше половины мощности самого крупного генератора повышенной частоты, а мощность генератора 2 должна быть не меньше суммарной мощности турбины 3 и генератора 1.

Если на ТЭЦ предусматривается только один сдвоенный блок, то в период его ремонта система повышенной частоты будет работать самостоятельно, несинхронно, что вполне допустимо. При наличии двух сдвоенных блоков необходимость в несинхронной работе отпадает. В нормальных условиях работы оба сдвоенных блока могут работать параллельно и одновременно выполнять функции источников реактивной мощности для соответствующих частей системы электроснабжения.

Возможность переключения безразличных к уровню частоты электропотребителей (освещения, нагревательных установок и т. п.), а также некоторых электродвигателей (6) из одной части системы электроснабжения в другую часть с другой номинальной частотой облегчает решение вопросов резервирования и баланса мощностей в условиях ремонтов и др.

Из краткого описания, приведенного выше, следует, что энергоблок с двумя генераторами при различии числа пар полюсов генераторов 1 и 2 обеспечит энергетическую связь различных частей системы электроснабжения при неравенстве частот. При этом электрическая связь объединяемых систем отсутствует, передача энергии из одной энергосистемы в другую осуществляется механическим путем, через вал агрегата. Благодаря этому резко ограничиваются токи короткого замыкания.

При закрытии доступа пара в турбину сдвоенного блока агрегат переходит в режим синхронного преобразователя частоты. Для связи энергосистем с различными частотами могут найти применение и синхронные преобразователи, не имеющие турбины на общем валу агрегата. Однако это решение представляется менее экономичным. Сдвоенный электроБлок в отличие от обычного электромашинного преобразователя частоты обладает свойствами регулирования перетока мощности с помощью собственной турбины; к. п. д. его значительно выше из-за того, что мощность, проходящая последовательно через оба генератора, уменьшена на величину мощности турбины; легко осуществляется пуск благодаря жесткому соединению с турбиной; существенно ниже стоимость благодаря совмещению функций обычного синхронного генератора и элемента преобразователя частоты. Удорожание обычного блока, вызванное установкой на общем валу второго генератора, определяется стоимостью этого генератора со вспомогательным оборудованием и оценивается приблизительно равным стоимости синхронного компенсатора той же мощности.

Исходя из сказанного, представляется, что сдвоенные энергоблоки отвечают всем требованиям связи системы электроснабжения с различными номинальными частотами и яв-

ляются наиболее оперативным и экономичным средством энергетической связи систем электроснабжения в условиях различия частоты³.

Применение энергоблоков с двумя генераторами для секционирования энергосистем и создания управляемых межсистемных энергетических связей. Объединение энергетических систем в настоещее время осуществляется главным образом с помощью межсистемных электрических линий переменного тока или (при различии номинальных напряжений в точках подключения межсистемной линии) с помощью линий и трансформаторов.

Если межсистемную связь осуществить на шинах электростанции, имеющей энергоблоки с двумя генераторами на одном валу, то система может получить следующие дополнительные возможности и преимущества по надежности и экономичности по сравнению с обычной связью:

1. Исключается влияние системы С-2 на переходные электромагнитные процессы в С-1 (и наоборот), а влияние на электромеханические процессы демпфируется энергоблоками за счет их последовательных включенных в цепь контуров и машиных масс.

2. Автоматический перевод одного из генераторов блока в режим асинхронной машины может послужить средством предотвращения аварий с полным отключением межсистемных связей.

3. Переводом одного из генераторов в режим асинхронного двигателя создается возможность самостоятельного ведения режима по частоте и распределению мощности энергосистем, входящих в энергообъединение, с сохранением перетока мощности между ними. При включении добавочного сопротивления в цепь ротора машины, переведенной в режим асинхронного двигателя, можно регулировать скольжение и переток мощности между системами.

4. Отсутствие высших гармоник тока и напряжения, высокая надежность элементов электромеханической связи энергосистем выгодно отличают предлагаемую установку от немашинных способов, в том числе от вставок постоянного тока.

На данном этапе исследования еще нет достаточного проработки схем, особенностей оборудования и сравнительных технико-экономических показателей электромеханической связи энергосистем. Но и изложенные выше соображения показывают возможность и в некоторых случаях целесообразность создания межсистемных энергетических связей через валы энергоблоков с двумя генераторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулебакин В. С., Веников В. А. Повышение частоты переменного тока и нахождение ее оптимального значения для дальнейшей электрификации СССР. — «Электричество», 1963, № 3.
2. Решение Всесоюзного совещания по проблеме применения переменного тока повышенной частоты в отраслях народного хозяйства. Кишинев. РИО АН Молдавской ССР, 1967.
3. Краморов Ю. И. Высокоскоростные машины в сельском хозяйстве. Краснодарское книжное изд-во, 1966.
4. Китаенко Г. И. Повышение частоты переменного тока и нахождение оптимальной частоты для дальнейшей электрификации СССР. — «Электричество», 1965, № 2 (дискуссия).
5. Мешков В. В., Еланешников М. М. Осветительные установки. М., «Энергия», 1972.
6. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М., Госэнергоиздат, 1963.
7. Постолатий В. М., Чалый Г. В. Влияние повышения частоты на параметры и технико-экономические показатели электропередачи переменного тока. — «Электроэнергетика и автоматика», Изд. АН Молдавской ССР, 1968, вып. 3.

[26.6.1973]

³ Возможность применения для той же цели вентильных преобразователей частоты не исследовалась.



Исследования условий возникновения лавины частоты в энергосистеме¹

Канд. техн. наук АЙРАПЕТИАН Г. А., инж. ЭТМЕКЧЯН А. А.,
инж. АЙРАПЕТИАН Ю. И.

Ереванский политехнический институт

При проектировании АЧР в энергосистеме одним из параметров, определяющим структуру АЧР и ее уставки, являются допустимые времена работы энергосистемы при различных дискретных значениях частоты. В [Л. 1] оговорены следующие допустимые времена работы: с частотой ниже 47 гц не более 20 сек и с частотой ниже 48,5 гц не более 60 сек. Такое формирование вряд ли целесообразно, так как это время зависит от ряда факторов, специфичных для конкретной энергосистемы, и главным образом от состава электростанций, участвующих в покрытии графика нагрузки.

Выбор уставок времени АЧР-II должен производиться так, чтобы не допустить возникновения в системе лавины частоты. Основной причиной лавинообразного снижения частоты является отключение генерирующей мощности вследствие срабатывания допустимого уровня воды в барабанах котлов тепловых электростанций из-за снижения производительности питательных электронасосов. Заметим, что блоки с прямоточными котлами практически не лимитируют время работы при понижении частоты до 45 гц [Л. 2 и 3].

Настоящая статья посвящена результатам исследований процессов, происходящих в энергосистеме с преобладанием тепловых электростанций с барабанными котлами при аварийном снижении и восстановлении частоты. Целью работы явилась разработка математической модели для таких исследований и инженерной методики выбора уставок времени АЧР-II.

При составлении уравнений анализируемых процессов² приняты следующие условия и основные допущения:

1. Рассматриваемая энергосистема состоит из агрегатов тепловых станций (70%) и гидравлических станций (30%). Тепловые станции эквивалентированы в агрегате единичной мощности с относительными параметрами, эквивалентными энергоблоку с котлом ТГМ-94 (500 т/ч, 140 ат, 570 °С), турбиной К-160 (130 ат, 570 °С), генератором ТВВ-165-2.

2. Горячий резерв, имеющийся на агрегатах, учтен в величине аварийного дефицита, т. е. принят его мгновенный ввод в работу.

3. Мощности турбин гидроагрегатов не изменяются при изменениях частоты.

4. Регулирующий эффект нагрузки по частоте с учетом снижения напряжения принят равным двум.

5. Не учтено изменение к. п. д. турбин при изменении частоты.

6. Температурный режим парового цикла принят неизменным.

7. Открытие регулирующих клапанов перед турбиной принято неизменным, имея в виду, что при снижении частоты регулятор мог действовать только на открытие, а согласно п. 2 горячий резерв принят введенным с начала процесса.

8. Относительное изменение расхода пара после пароперегревателя и перед турбиной приняты равными между собой и, в свою очередь, равными относительному изменению давления перед соплами, а при полностью открытых клапанах (п. 7), и относительному изменению давления перед турбиной.

9. При представлении уравнений в относительных изменениях не учтены члены, содержащие произведения переменных, каждая из которых изменяется не более 10%.

10. Электрическая мощность двигателей принята пропорциональной скольжению (при неизменном напряжении на зажимах).

11. Между температурой и давлением насыщенного пара в конденсаторе принята линейная зависимость вида $\theta = 0,43 + 0,57\varphi_z$.

13. Для питательного насоса значение критических оборотов, при которых производительность равна нулю, определено по выражениям [Л. 4] и равно 0,89ω₀. То же для циркуляционных насосов принято равным 0,85ω₀.

При составлении уравнений использовались материалы из [Л. 4-6].

¹ В порядке обсуждения.

² Уравнения составлены в относительных изменениях.

1. Уравнение динамики энергосистемы

$$(1 + \nu_c) \frac{d\nu_c}{dt} = \frac{0,7\pi_t - 2\nu_c - \Delta P_{\text{деф}}}{T_{j_c}}. \quad (1)$$

2. Мощность турбины

$$\pi_t = g_t + \alpha (g_t - \varphi_t), \quad (2)$$

где

$$\alpha = \frac{\left(\frac{p_{20}}{p_{10}}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \left(\frac{p_{20}}{p_{10}}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \frac{k-1}{k}.$$

3. Уравнение уровня воды в барабане котла

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{T_h} (g_{n.b} - g_b). \quad (3)$$

4. Уравнение динамики барабана котла

$$\frac{d\varphi_b}{dt} = \frac{1}{T_b} [\beta - g_b - k_n (g_{n.b} - g_b)],$$

где k_n — коэффициент, характеризующий влияние материального небаланса в котле на давление пара. Принято $k_n = 0,25$ при температуре питательной воды 230° [Л. 6]. Тогда окончательно

$$\frac{d\varphi_b}{dt} = \frac{1}{T_b} (\beta - 0,75g_b - 0,25g_{n.b}). \quad (4)$$

5. Уравнение динамики первичного пароперегревателя

$$\frac{d\varphi_k}{dt} = \frac{1}{T_k} (g_b - g_t). \quad (5)$$

6. Потери давления в парогенераторе

$$g_b = 5,4 (\varphi_b - \varphi_k). \quad (6)$$

7. Потери давления в паропроводах

$$g_t = \frac{1}{0,129} (\varphi_k - \varphi_t).$$

Имея в виду, что при постоянном открытии клапанов наимя принято $g_t = \varphi_t$, окончательно получим:

$$\varphi_k = 1,129g_t. \quad (7)$$

8. Уравнение динамики топки

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{1}{T_{\text{топ}}} (-\beta + \mu_1). \quad (8)$$

9. Уравнение регулирования топливоподачи

$$\frac{d\mu_1}{dt} = -\frac{1}{T_s} \left(\frac{1}{\delta_\mu} g_t + \mu_1 \right). \quad (9)$$

10. Уравнение движения двигателей питательного и циркуляционного насосов

$$(1 + \nu_{n.b}) \frac{d\nu_{n.b}}{dt} = \frac{1}{T_{j_{n.b}}} (\pi_{n.b} - \pi_{n.m}); \quad (10a)$$

$$(1 + \nu_{n.b}) \frac{d\nu_{n.b}}{dt} = \frac{1}{T_{j_{n.m}}} (\pi_{n.b} - \pi_{n.m}). \quad (10b)$$

11. Электрическая мощность двигателей

$$\pi_{n.b} = \frac{1 - s_0}{s_0} (\nu_c - \nu_{n.b}); \quad (11a)$$

$$\pi_{n.m} = \frac{1 - s_0}{s_0} (\nu_c - \nu_{n.m}). \quad (11b)$$

12. Механическая мощность двигателей

$$\pi_{n.m} = g_{n.b} + 2\nu_{n.b} + 2\nu_{n.m}g_{n.b}; \quad (12a)$$

$$\pi_{n.m} = g_{n.b} + 2\nu_{n.b} + 2\nu_{n.m}g_{n.b}. \quad (12b)$$

13. Уравнение производительности насосов

$$g_{\text{п.в}} + \frac{g_{\text{п.в}}^2}{2} = k_{\text{п}} v_{\text{п}}; \quad (13a)$$

$$g_{\text{ц.в}} + \frac{g_{\text{ц.в}}^2}{2} = k_{\text{ц}} v_{\text{ц}}, \quad (13b)$$

где

$$k_{\text{п}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{\text{кр.п}}}{\omega_0} \right)^2}, \quad k_{\text{ц}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_{\text{кр.ц}}}{\omega_0} \right)^2}.$$

14. Уравнение связи давления за турбиной и расхода циркуляционной воды

$$\varphi_z = -k_z \frac{g_{\text{п.в}}}{1 + g_{\text{п.в}}}, \quad (14)$$

где

$$k_z = \frac{\theta_{\text{ко}} - (\theta_{\text{в}} + \delta\theta)}{0,57\theta_{\text{ко}}}.$$

Для оценки возможности дальнейших упрощений полученная система уравнений (1)–(14) была смоделирована на АВМ типа МН-7 отдельными группами. В первую группу вошли уравнения динамики агрегата [уравнения (2)–(9)] при заданных возмущениях со стороны питательной воды и при постоянном давлении в конденсаторе. Анализ результатов расчета (рис. 1) еще раз подтвердил существующее мнение [Л. 7], что уменьшение расхода питательной воды не вызывает существенного изменения расхода и давления пара, а следовательно, и мощности турбины, а только лишь вызывает снижение уровня воды в барабане и последующее аварийное отключение котлоагрегата.

Во вторую группу уравнений вошли те же уравнения динамики котлоагрегата, но при заданных возмущениях со стороны циркуляционной воды и при отсутствии изменений питательной воды. Расчеты показали малое влияние циркуляционной воды на мощность турбины и незначительное влияние на расход и давление пара. Однако в эту часть уравнений упрощения не введены, имея в виду возможность срабатывания защиты от срыва вакуума.

В третью группу вошли уравнения двигателей, насосов и частоты системы [уравнения (1), (10)–(13)]. Расчеты показали возможность в диапазоне изменения частоты до 45 Гц для питательных и циркуляционных насосов исключить из рассмотрения уравнения (10)–(12), а в уравнении (13) взамен оборотов двигателя ввести частоту сети, т. е. принять изменение оборотов двигателя, равным изменению частоты в энергосистеме. Как показали результаты расчета максимальная погрешность от такого упрощения не превышает 5–10% (рис. 2). Последняя может быть учтена умножением правой части уравнений 13а и 13б на соответствующий коэффициент (для питательных насосов на 0,95 и для циркуляционных насосов на 0,9).

На основании вышеизложенного были введены упрощения, и система уравнений в окончательном виде была представлена

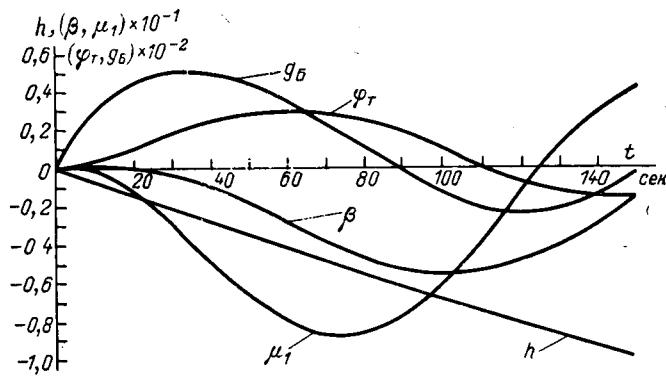


Рис. 1. Кривые изменения параметров агрегата при заданных возмущениях со стороны питательной воды и при постоянном давлении в конденсаторе.

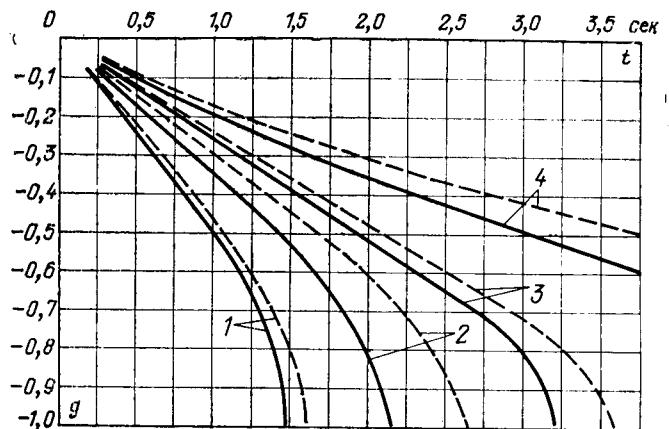


Рис. 2. Кривые изменения расхода питательной и циркуляционной воды.

1, 2 — соответственно для питательного и циркуляционного насосов при $\Delta P_{\text{деф}} = 0,5$; 3, 4 — то же при $\Delta P_{\text{деф}} = 0,3$; — при $v_h = v_c$; — — при $v_h \neq v_c$.

в следующем виде:

$$(1 + v_c) \frac{dv_c}{dt} = \frac{0,7\pi_t - 2v_c - \Delta P_{\text{деф}}}{T_{j_c}}, \quad (15)$$

$$\pi_t = -\alpha \varphi_z; \quad (16)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{T_h} g_{\text{п.в}}; \quad (17)$$

$$\varphi_z = -k_z \frac{g_{\text{п.в}}}{1 + g_{\text{п.в}}}; \quad (18)$$

$$g_{\text{п.в}} + \frac{g_{\text{п.в}}^2}{2} = k_{\text{п}} v_c; \quad (19)$$

$$g_{\text{п.в}} + \frac{g_{\text{п.в}}^2}{2} = k_{\text{п}} v_c. \quad (20)$$

Значения параметров и коэффициентов, входящих в данную систему уравнений: $T_{j_c} = 6$ сек; $T_h = 15$ сек; $k_{\text{п}} = 4,8$; $k_{\text{п}} = 3,6$; $k_z = 0,5$ сек; $\alpha = 0,036$.

Указанная система была смоделирована на АВМ (рис. 3). Были произведены расчеты при различных значениях $\Delta P_{\text{деф}}$. Работа АЧР воспроизводилась путем добавления в числитель правой части уравнения (15), начиная с частоты срабатывания АЧР, слагаемого $-k_{\text{АЧР.1}} (v_c - v_{\text{АЧР.1}})$, где $k_{\text{АЧР.1}}$ — для принятой системы АЧР-I взят из расчета отключения 34% нагрузки системы при снижении частоты от 48,5 до 46 Гц на (5%), т. е. $k_{\text{АЧР.1}} = 6,8$. При больших дефицитах должна работать дополнительная категория АЧР, действующая в самом начале процесса во избежание лавины напряжения. Для АЧР-II производилось отключение условно в четыре укрупненные очереди с уставками от 15 до 90 сек; в каждой очереди отключалось до 4% нагрузки системы, имея в виду, что регулирующий эффект нагрузки при снижении частоты до 46 Гц составляет 16%.

По результатам расчетов построены зависимости между следующими параметрами: $\Delta P_{\text{деф}}$, $v_{\text{зав}}$ частота срабатывания с учетом работы АЧР-I, $g_{\text{п.в}}$, $t_{\text{ср.б}}$, время срабатывания уровня воды в барабане котла до его критического значения и $h_{\text{ср}}$ (рис. 4). Указанные зависимости построены при следующих условиях: $\Delta P_{\text{деф}}$ не превышает $0,5P_{\text{нагр}}$; к АЧР-I подключено $0,34P_{\text{нагр}}$, для обеспечения частоты не ниже 46 Гц при регулирующем эффекте нагрузки — 2%. Жирной линией на графике показан характер срабатывания уровня воды в барабане при действии АЧР-II, выполненной со следующими уставками: I очередь — 15 сек, II очередь — 25 сек, III очередь — 35 сек, IV очередь — 45 сек. Уставка по частоте — 49 Гц.

В каждой очереди отключается 4% нагрузки. График дает возможность выбора уставок АЧР-II и анализа его работы при различных дефицитах. Например, полученная на АВМ характеристика (жирная линия) могла быть получена графически следующим образом (ход расчета показан пунктирной

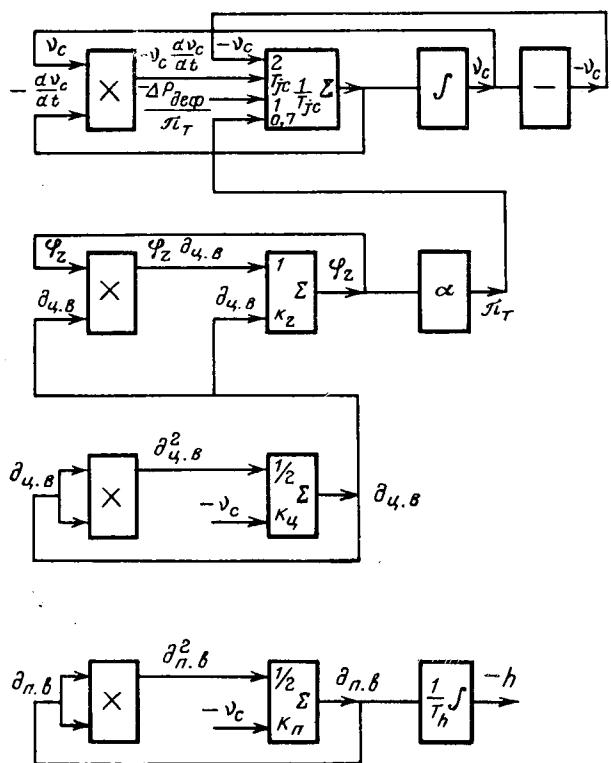


Рис. 3. Структурная схема моделирования.

линей): при дефиците $0,5P_{\text{загр}}$, частота зависания 46 гц, при этом поступление питательной воды сократится наполовину, что соответствует времени срабатывания воды до критического уровня—30 сек. Таким образом, срабатывание уровня будет идти по прямой 0—1; через 15 сек отключается первая очередь АЧР-II и частота поднимается до 47 гц; срабатывание уровня продолжается по кривой 1—2, параллельной характеристике, соответствующей 47 гц, далее аналогично на участке 2—3 по прямой, параллельной характеристике 48 гц и на участке 3—4 по прямой, параллельной характеристике 49 гц, и далее параллельно оси абсцисс.

С достаточной для практики точностью приведенные на рис. 4 графики могут быть построены и без решения системы дифференциальных уравнений. Так, результаты расчетов показали, что мощность турбины в течение рассмотренного процесса меняется настолько мало, что эти изменения в инженерных расчетах могут не учитываться. Таким образом, определяющими характер процесса являются уравнения (15), (17), (19). В связи с тем, что при дефицитах, превышающих 10%, время снижения частоты несогномеримо мало по сравнению с временем снижения уровня в барабане, дифференциальное уравнение (15) сводится к алгебраическому:

$$2v_{\text{с.зав}} + \Delta P_{\text{деф}} + k_{\text{АЧР-1}} (v_{\text{с.зав}} - v_{\text{АЧР-1}}) = 0,$$

отсюда

$$v_{\text{с.зав}} = -\frac{\Delta P_{\text{деф}} - k_{\text{АЧР-1}} v_{\text{АЧР-1}}}{2 + k_{\text{АЧР-1}}}. \quad (21)$$

По выражению (21) может быть построена зависимость $v_{\text{с.зав}}$ от $\Delta P_{\text{деф}}$ при заданной структуре АЧР-1.

По выражению (19) строится зависимость $g_{\text{п.в.}}$ от $v_{\text{с.зав}}$. Уравнение (17) при заданном $g_{\text{п.в.}}$ приобретает вид:

$$t_{\text{ср.б}} = \frac{h_{\text{ср}} T_h}{g_{\text{п.в.}}}. \quad (22)$$

По этому выражению строятся зависимости $t_{\text{ср.б}}$ от $g_{\text{п.в.}}$ для заданного уровня срабатывания $h_{\text{ср}}$ и зависимость h от $t_{\text{ср.б}}$ при заданном расходе питательной воды $g_{\text{п.в.}}$.

Выводы. 1. Составлена математическая модель для исследования процессов, связанных с аварийным возникновением в энергосистеме дефицита активной мощности, сопровождающегося снижением частоты и работой АЧР. Решение этой

системы уравнений дает возможность проследить за изменением параметров энергоблока, питательных и циркуляционных насосов.

Показана возможность введения ряда упрощений в предлагаемую систему уравнений в зависимости от постановки задачи. Даны варианты упрощенной системы уравнений.

2. Система уравнений решена на АВМ. В результате расчета получены кривые зависимостей дефицита активной мощности, частоты, производительности питательных и циркуляционных насосов, уровня воды в барабане котлов и времени. Все эти зависимости построены с учетом работы АЧР-1 и II категорий.

По построенной номограмме могут быть выбраны уставки АЧР-II графическим методом.

3. Даны простые расчетные выражения, позволяющие с приемлемой для инженерных расчетов точностью производить построение номограммы для выбора уставок АЧР-II.

4. Приведенная математическая модель, помимо анализа различных систем АЧР, может быть использована при исследовании схем питания и устройств автоматики собственных нужд тепловых станций.

Принятые обозначения:

$\varphi_b, \varphi_k, \varphi_t, \varphi_z$ — относительные изменения давления соответственно в барабане, пароперегревателе, перед турбиной, в конденсаторе;

$g_b, g_t, g_{\text{п.в.}}, g_{\text{ц.в.}}$ — относительное изменение расхода соответственно пара из котла, пара на турбину, питательной и циркуляционной воды;

$v_c, v_{\text{п.в.}}, v_{\text{ц.в.}}$ — относительное изменение соответственно частоты сети, оборотов двигателей питательного и циркуляционного насосов;

$\pi_t, \pi_{\text{п.в.}}, \pi_{\text{ц.в.}}, \pi_{\text{п.м.}}, \pi_{\text{ц.м.}}$ — относительное изменение соответственно мощности турбины, электрической мощности двигателей питательного и циркуляционного насосов;

h — относительное изменение максимально допустимого отклонения уровня воды в барабане котла;

β — относительное изменение тепловыделения в топке;

μ_1 — относительное изменение перемещения регулирующего органа топливоподачи;

δ_{μ_1} — коэффициент неравномерности регулятора подачи топлива;

ω_0 — синхронная угловая скорость;

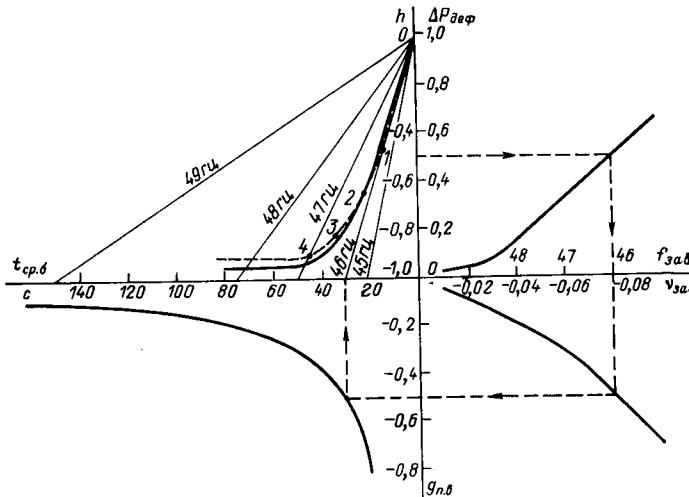


Рис. 4. Кривые изменения параметров для выбора уставок АЧР-II.

$\omega_{\text{кр.п.}}$, $\omega_{\text{кр.п.}}$ — обороты соответственно питательного и циркуляционного насосов, при которых их производительность становится равной нулю;
 s_0 — номинальное скольжение двигателя;
 $\delta\theta$ — дополнительный перепад температуры;
 $\theta_{\text{к.}}$, $\theta_{\text{в.}}$ — температура конденсации и охлаждающей воды;
 p_2 , p_1 — давление пара соответственно в конденсаторе и перед турбиной;
 $\Delta P_{\text{деф}}$ — относительный аварийный дефицит активной мощности;
 $P_{\Sigma\text{нагр}}$ — суммарная нагрузка системы;
 k — показатель адиабатического процесса;
 T_h , T_b — динамические постоянные времени котла по уровню и давлению;
 $T_{\text{топ}}$ — постоянная времени топки котла;
 T_s — постоянная времени сервомотора подачи топлива;

T_{je} , T_{jp} , $T_{j\pi}$ — механические постоянные времени соответственно системы, питательных и циркуляционных агрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Методические указания по автоматической частотной разгрузке (АЧР). Решение МЭ и Э СССР № Э—21/71. СЦНТИ, ОГРЭС, 1972.
- Мерпорт Э. И., Орнов В. Г., Чурик Ю. М. Исследование работы блока 200 Мвт при понижении частоты. — «Электрические станции», 1971, № 8.
- Орнов В. Г. Анализ работы блоков 150—220 Мвт при аварийных понижениях частоты. — «Электрические станции», 1972, № 12.
- Москалев А. Г. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. М., Госэнергоиздат, 1959.
- Иванов В. А. Стационарные и переходные режимы мощных паротурбинных установок. М., «Энергия», 1971.
- Добкин В. М. и др. Автоматическое регулирование тепловых процессов на электростанциях. М., Госэнергоиздат, 1959.
- Стырикович М. А. и др. Парогенераторы электростанций. М., «Энергия», 1966.

[16.2.1973]

УДК 621.315.1.017:621.316.722

Чувствительность потерь мощности в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения к регулированию напряжения¹

Канд. техн. наук АСТАХОВ Ю. Н., инж. ВАСИЛЕНКО И. Н.

Москва

Потери электроэнергии представляют собой один из основных показателей, характеризующих экономичность работы линий электропередачи СВН большой протяженности, особенно для управляемых ВЛ. Потери в линиях СВН в основном складываются из потерь на нагрев проводов и потерь на корону. Первые определяются сечением проводов линий, напряжением и передаваемой мощностью. Вторые являются функцией конструктивных параметров линий, напряжения и метеорологических условий на трассе электропередачи. Увеличение рабочего напряжения линии приводит к возрастанию потерь на корону; потери на нагрев при этом снижаются. При уменьшении напряжения картина получается обратной. Следовательно, изменяя значение рабочего напряжения (в технически допустимых пределах) в зависимости от передаваемой мощности и метеорологических условий, принципиально можно обеспечить работу электропередачи с минимальными потерями энергии.

Исследованию регулирования напряжения на линиях электропередачи СВН посвящен ряд публикаций [Л. 1—6]. В [Л. 6] на основании расчетных значений удельной годовой экономии электроэнергии, которая может быть достигнута за счет регулирования напряжения на линиях 220—750 кв, сделан вывод о весьма значительном экономическом эффекте такого регулирования. Причем, значения экономии энергии найдены с точностью до 1 квт·ч. Это свидетельствует о том, что расчеты производились исходя из возможности получения точной информации о параметрах линии, ее режимных параметрах и потерях на корону. Однако все эти данные в условиях эксплуатации могут быть известны лишь с определенной погрешностью. Поэтому достоверно определить единственное теоретически оптимальное значение напряжения, при котором в соответствующих метеорологических условиях та или иная мощность будет передаваться по линии с максимальным к. п. д., не представляется возможным. Исходя из этого, следует искать не теоретический минимум потерь мощности, а определить характер изменения их в области минимума. Если окажется, что зависимость потерь мощности от значения напряжения на линии в области своего минимума имеет достаточно пологий характер, т. е. потери в этой области малочувствительны к регулированию напряжения, то при оптимизации с учетом погрешности в исходной информации может быть найдена лишь зона равноэкономичных режимов, а не единственный теоретически оптимальный режим.

Ниже с помощью метода относительных единиц, базирующегося на теории подобия [Л. 7], дается обобщенная

оценка чувствительности потерь мощности в линиях СВН в области своего минимума к регулированию рабочего напряжения.

Составляющие потерь мощности на нагрев $\Delta P_{\text{н}}$ и на корону $\Delta P_{\text{к}}$ согласно [Л. 8] могут быть аппроксимированы следующими уравнениями:

$$\Delta P_{\text{н}} = \Delta P_{\text{н}0} (1 - 2\Delta U_* + \Delta U_*^2); \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{к}} = \Delta P_{\text{к}0} (1 + \alpha \Delta U_* + \beta \Delta U_*^2), \quad (2)$$

где $\Delta U_* = \frac{U - U_{\text{но}}}{U_{\text{но}}}$ — относительное отклонение напряжения U

от начального значения $U_{\text{но}}$; $\Delta P_{\text{н}0}$ и $\Delta P_{\text{к}0}$ — потери мощности на нагрев и на корону при напряжении $U_{\text{но}}$; α и β — эмпирические коэффициенты.

Примем, что начальное напряжение $U_{\text{но}}$ соответствует минимуму полных (на нагрев и на корону) потерь мощности ΔP . Тогда, суммируя (1) и (2) и дифференцируя полученное выражение для ΔP по ΔU_* , найдем соотношение между составляющими $\Delta P_{\text{н}0}$ и $\Delta P_{\text{к}0}$ при $\Delta U_* = 0$, отвечающее режиму минимальных потерь:

$$\Delta P_{\text{к}0} = \frac{2}{\alpha} \Delta P_{\text{н}0}. \quad (3)$$

С учетом данного соотношения выражение для минимума полных потерь мощности запишется в виде

$$\Delta P_{\text{min}} = \Delta P_{\text{н}0} + \Delta P_{\text{к}0} = \Delta P_{\text{н}0} (1 + 2/\alpha). \quad (4)$$

Принимая ΔP_{min} в качестве базисной величины, на основании (1), (2) и (4) получим выражение для потерь мощности ΔP в системе относительных единиц:

$$\Delta P_* = \frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{min}}} = 1 + \frac{\alpha + 2\beta}{\alpha + 2} \Delta U_*^2. \quad (5)$$

Потери ΔP_* могут быть представлены в виде

$$\Delta P_* = 1 + \Delta P'_*, \quad (6)$$

где $\Delta P'_*$ — отклонение потерь мощности ΔP_* от минимального значения. Подставляя (6) в (5), окончательно имеем:

$$\Delta P'^* = \frac{\alpha + 2\beta}{\alpha + 2} \Delta U_*^2. \quad (7)$$

Уравнение (7) по существу является критериальным уравнением с критерием подобия:

$$\pi = \frac{\alpha + 2\beta}{\alpha + 2}.$$

¹ В порядке обсуждения.

Значения коэффициентов α и β найдем, аппроксимируя обобщенные характеристики потерь на корону [Л. 9] уравнением (2). Для всех погодных условий при отношениях рабочей напряженности электрического поля E к начальной напряженности общей короны E_0 , лежащих в пределах от 0,9 до 0,6, соответственные предельные значения указанных коэффициентов составляют для $\alpha=7$ и 12; для $\beta=18$ и 45. При этом критериальное уравнение (7) примет вид:

$$\Delta P'_* = (4,8 \div 7,3) \Delta U_*^2. \quad (8)$$

Анализ уравнения (8) показывает, что полные потери мощности в области своего минимума мало изменяются при отклонениях напряжения от значения, соответствующего этому минимуму. Так, например при $\Delta U_* = \pm 2,5\%$ потери мощности увеличиваются всего лишь на $(0,30 \div 0,46)\%$, а при $\Delta U_* = \pm 5\%$ — только на $(1,2 \div 1,8)\%$. Столь малые изменения потерь при довольно значительных отклонениях напряжения от оптимальной величины позволяют сделать вывод о том, что потери мощности в области минимума малочувствительны к регулированию напряжения.

Уравнения (1) и (2) представляют собой упрощенную модель процесса регулирования напряжения на линиях электропередачи СВН. Полная модель этого процесса при равных по значению напряжениях по концам линии описывается известным уравнением [Л. 10] с общепринятыми обозначениями:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{DU^2}{B} \sin(\psi_B + \psi_D) + \frac{U^2}{B} \sin(\delta - \psi_B) P_2. \quad (9)$$

Были проведены расчеты потерь мощности по выражению (9) для линий электропередачи 500 и 750 кв длиной от 300 до 1000 км при различных значениях нагрузки P_2 и различных погодных условиях. Обобщенные постоянные четырехполюсника, замещающего линию, рассчитывались итерационным способом с учетом потерь на корону согласно [Л. 9]. Определялось напряжение U_0 , при котором передача заданной мощности P_2 в соответствующих погодных условиях происходила с минимальными потерями ΔP_{\min} . Причем значения теоретически оптимального напряжения U_0 находились с погрешностью, не превышающей 0,1%. Далее величины U_0 и ΔP_{\min} принимались за базисные и рассчитывались относительные отклонения потерь $\Delta P'_*$ от минимального значения ΔP_{\min} при отклонениях напряжения ΔU_* от оптимальной величины U_0 . Результаты показали, что для линий длиной до 300—400 км при отклонениях напряжения в пределах $\pm 10\%$, а для линий длиной порядка 1000 км при отклонениях напряжения в пределах $\pm 5\%$, значения $\Delta P'_*$ находятся в области, ограниченной критериальными зависимостями (8). Этим самым подтверждается применимость данного критериального уравнения для всех линий электропередачи СВН независимо от сечения проводов и конструкции фазы в указанных пределах отклонений напряжения от оптимальной величины.

Критериальное уравнение (8) позволяет найти зону напряжений на линии, при которых режимы работы ее с учетом погрешности определения потерь мощности должны быть признаны равнозэкономичными по потерям энергии. Приравнивая относительное отклонение потерь $\Delta P'_*$ погрешности ϵ , из уравнения (8) получим ширину зоны:

$$\Delta U_{\pm} = 2 \sqrt{\frac{\epsilon}{\pi}}. \quad (10)$$

Зона равнозэкономичных напряжений оказывается значительной даже при высокой точности определения потерь мощности. Так, например при среднем значении $\pi=6,05$ величина ΔU_{\pm} составляет примерно 8,1% при $\epsilon=1\%$ и $\Delta U_{\pm} \approx 10\%$ при $\epsilon=1,5\%$. Заметим, что в последнем случае зона равнозэкономичных напряжений равна всему располагаемому диапазону регулирования напряжения на линиях электропередачи 500 и 750 кв [Л. 6].

В условиях эксплуатации потери мощности могут быть рассчитаны с погрешностью, значительно превышающей 1,0—1,5%. Известно, что значение активного сопротивления линии в зависимости от ряда факторов, основными из которых являются температура окружающего воздуха, скорость ветра и ток нагрузки, может изменяться в пределах до 30% от табличного значения [Л. 4]. Погрешность расчета нагрузочной составляющей потерь мощности будет еще выше, что связано с наличием погрешностей измерения токов и напряжений на линии. Исходя из этого, можно ожидать, что с учетом погрешности определения потерь на корону и распределения их вдоль трассы линии результирующая погрешность расчетного значения суммарных потерь мощности вряд ли окажется меньше тех же 30%. При этом ширина зоны равнозэкономичных напряжений составит около половины и более рабочего напряжения линии. Если даже предположить, что в результате введения поправок на величину активного сопротивления линии [Л. 4] и применения специальных датчиков потерь на корону [Л. 6] удастся снизить результирующую погрешность до 10%, то и в этом случае зона равнозэкономичных напряжений все же будет превышать 20% рабочего напряжения линии. Вследствие столь значительной неопределенности значения наивыгоднейшего рабочего напряжения линии ставится под сомнение сама возможность получения достоверного экономического эффекта за счет регулирования напряжения, направленного на снижение потерь энергии. Во всяком случае с учетом погрешности в исходной информации проблема оптимизации режимов работы линий электропередачи сверхвысокого напряжения оказывается чрезвычайно трудной.

Выводы. 1. Потери мощности в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения в области своего минимума малочувствительны к регулированию напряжения.

2. Экономическая эффективность регулирования напряжения на линиях электропередачи с целью снижения потерь энергии должна оцениваться с учетом погрешности определения потерь мощности в условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В. А. К вопросу о влиянии глубокого регулирования напряжения дальних электропередач сверхвысокого напряжения на технико-экономические показатели их работы. — «НДВШ. Энергетика», 1958, № 3, с. 1—7.
2. Холмский Д. В. Регулирование напряжения дальних электропередач с помощью регулируемых трансформаторов. — «Изв. вузов. Энергетика», 1959, № 7, с. 1—10.
3. Голубин Е. А., Чистяков Б. Н. К вопросу оптимального регулирования напряжения на электропередачах 500 кв. — «Электричество», 1968, № 8, с. 87—88.
4. Мельников Н. А., Росман Л. В. Принципы автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности в питающих электрических сетях. — «Электричество», 1971, № 8, с. 14—19.
5. Анисимова Н. Д., Веников В. А., Худяков В. В. Электрические системы, т. 3. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения. М., «Высшая школа», 1972, 368 с.
6. Емельянов Н. П., Мельников Н. А., Роддатис В. К., Шеренгис А. Н. Возможности снижения потерь в линиях электропередачи 220—750 кв с учетом короны путем регулирования рабочего напряжения. — «Электричество», 1972, № 11, с. 1—6.
7. Веников В. А. Теория подобия и моделирования применительно к задачам электроэнергетики. М., «Высшая школа», 1966, 488 с.
8. Мельников Н. А. Электрические сети и системы. М., «Энергия», 1969, 456 с.
9. Руководящие указания по определению среднегодовых потерь мощности на корону для линий электропередачи 330—750 кв. М., Госэнергоиздат, 1961, 32 с.
10. Веников В. А., Сиуда И. П. Расчеты режимов дальних электропередач переменного тока. М., «Высшая школа», 1966, 142 с.

[22.10.1973]



Влияние турбулентности потока на электроосаждение частиц аэрозоля

Канд. техн. наук МИРЗАБЕКЯН Г. З.

Московский энергетический институт

Электроосаждение нашло широкое применение в аппаратах газоочистки — электрофильтрах, где турбулентный поток запыленного газа движется в пространстве между коронирующими и осадительными электродами. Частицы заряжаются в поле коронного разряда и осаждаются под действием электрической силы на некоронирующем электроде. Существующая теория электрофильтров [Л. 1] приводит к следующему выражению для эффективности их работы:

$$\eta = 1 - \exp \left(- \frac{\chi \omega_{oc} S_{oc}}{Q} \right). \quad (1)$$

Здесь η — к. п. д. электрофильтра, равный отношению количества уловленной пыли к ее общему количеству; ω_{oc} — электрическая скорость дрейфа частиц у осадительного электрода; S_{oc} — площадь поверхности осадительных электродов; Q — объемный расход газа через фильтр; χ — коэффициент неравномерности распределения концентрации частиц в поперечном сечении электрофильтра, равный отношению концентрации у осадительного электрода к средней по сечению концентрации.

В основу вывода выражения (1) положено предположение, что в результате совместного действия электрических сил и турбулентного перемешивания устанавливается некоторое распределение концентрации аэрозоля, характер которого не меняется по длине электрофильтра, т. е. коэффициент неравномерности остается постоянной величиной вдоль электрофильтра, причем, как правило, принимается значение $\chi = 1$.

Однако достоверность этого предположения не очевидна и, кроме того, в настоящее время величина χ может быть определена только эмпирическим путем.

В предлагаемой статье делается попытка расчетным путем проверить это предположение и выяснить, как меняется величина χ в зависимости от размеров осаждаемых частиц.

При проведении расчетов предполагается, что вторичный унос пыли в результате отряхивания электродов или перезарядки частиц мал и не учитывается возможность образования обратной короны на осажденном слое. Такие допущения приемлемы, если рассматривается осаждение частиц с удельным объемным сопротивлением, лежащим в пределах $(10^2 - 10^8)$ $\text{ом} \cdot \text{м}$. Результаты расчета осаждения при совместном учете направленной силы и турбулентного перемешивания применимы не только для случая действия электрической силы, но и других сил, например осаждения под действием силы тяжести в горизонтальных участках трубопроводов.

Составим уравнение движения аэрозоля в турбулентном потоке. Условие неразрывности потока частиц запишется в виде:

$$-\frac{\partial N}{\partial t} = \operatorname{div} \Pi. \quad (2)$$

Здесь Π — вектор потока частиц через единичную площадку;

$$\Pi = vN - D_t \operatorname{grad} N, \quad (3)$$

где v — скорость направленного движения частиц; N — концентрация частиц; D_t — коэффициент турбулентной диффузии частиц.

По существующим представлениям [Л. 2] при времени диффузии, в несколько раз превышающем время релаксации частицы, коэффициенты турбулентной диффузии частиц и среды равны. Это означает, что по крайней мере для частиц с размерами, меньшими $(40 - 60)$ $\mu\text{м}$, коэффициент их турбулентной диффузии может быть принят равным коэффициенту турбулентной диффузии среды. Например, для сферической частицы с диаметром $50 \mu\text{м}$ и плотностью $\gamma = 3 \text{ г}/\text{см}^3$ время релаксации приблизительно равно $0,02 \text{ сек}$, тогда как время пребывания частиц в электрофильтре, за которое заметно меняется их концентрация, составляет десятые доли секунды.

Из экспериментальных данных [Л. 2 и 3] следует, что коэффициент турбулентной диффузии среды меняется от нуля вблизи стенки до некоторого значения D_0 , которое в ядре потока остается примерно постоянной величиной. Распределение коэффициента турбулентной диффузии по сечению трубы может быть аппроксимировано следующими выражениями [Л. 3]:

$$D_t = \begin{cases} Az_+^3, & 0 \leq z_+ \leq z_{1+}; \\ 0,4z_+ \left(1 + \frac{z_+}{R_+} \right) - 1, & z_{1+} \leq z_+ \leq z_{2+}; \\ 0,07R_+ = \frac{0,07u^*R}{v}, & z_{2+} < z_+ < R_+. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь v — кинематический коэффициент вязкости газа; z_+ — расстояние от стенки z , отнесенное к характерной длине v/u^* ; $u^* = 0,2 \bar{u}_\pi / \operatorname{Re}^{1/8}$ — характерная скорость турбулентных пульсаций в центральной части потока; R — радиус круглой трубы или полусирина плоского канала; \bar{u}_π — средняя скорость потока; Re — число Рейнольдса потока газа. Значения коэффициента A и координат z_{1+} и z_{2+} в функции числа Рейнольдса потока приведены в таблице.

Для случая течения в плоском канале шириной $2R$ значение коэффициента турбулентной диффузии должно быть увеличено в $1,7 - 1,8$ раза [Л. 4]. При записи выражения для коэффициента турбулентной диффузии в ядре потока не учитывалось влияние электрического ветра, которое может привести к увеличению D_0 . К сожалению, данные по величине коэффициента турбулентной диффузии в поле коронного разряда отсутствуют, и потому к коли-

| Коэффициент A и координаты z_{1+} и z_{2+} | Re. 10^{-3} | | | | | |
|--|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7 | 10 | 20 | 40 | 60 | 100 |
| $\frac{A}{10^4}$ | 4,56 | 4,74 | 4,99 | 5,11 | 5,16 | 5,20 |
| z_{1+} | 26,39 | 26,38 | 26,35 | 26,34 | 26,33 | 26,33 |
| z_{2+}/R | 0,25 | 0,24 | 0,235 | 0,23 | 0,23 | 0,23 |

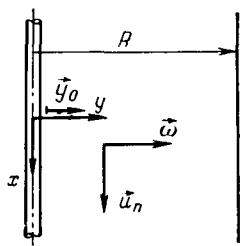


Рис. 1. К расчету осаждения в круглой трубе.

чественным оценкам для конкретных случаев, сделанных на основании численных расчетов в обобщенных переменных, следует относиться с осторожностью.

Скорость v направленного движения слагается из средней скорости u_n потока воздуха и скорости ω частиц под действием поперечной силы (рис. 1):

$$v = u_n + \omega. \quad (5)$$

Для частиц, меньших 30 мкм, инерционными силами можно пренебречь и рассчитывать скорость ω по выражению:

$$\omega = BF,$$

где B — подвижность частицы; F — поперечная сила.

Помимо влияния на скорость ω инерционные силы сказываются и в том, что происходит инерционный выброс частиц турбулентными пульсациями на стенку. Однако эксперименты [Л. 5] показывают, что для всего диапазона размеров частиц скорость их дрейфа на электрод, обусловленная инерционным выбросом, больше чем на порядок ниже скорости дрейфа частиц под действием электрического поля, т. е. и в этом случае инерционными силами можно пренебречь. Подставляя (5) в (3) и (3) в (2) и учитывая условие несжимаемости среды ($\operatorname{div} u_n = 0$), имеем:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u_n \operatorname{grad} N = \operatorname{div} [D_t \operatorname{grad} N - \omega N]. \quad (6)$$

Если предположить, что коэффициент диффузии D_t не меняется в направлении потока, то выражение (6) примет вид:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u_n \frac{\partial N}{\partial x} = D_t \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \operatorname{div} \left[D_t \frac{\partial N}{\partial y} y_0 - \omega N \right], \quad (7)$$

где y_0 — единичный вектор, направленный вдоль оси y (рис. 1).

Для стационарного случая ($\partial N / \partial t = 0$), пренебрегая диффузионным переносом по сравнению с переносом частиц потоком (правомерность этого допущения будет доказана позже), т. е.

$$u_n \frac{\partial N}{\partial x} \gg D_t \frac{\partial^2 N}{\partial x^2},$$

получаем:

$$u_n \frac{\partial N}{\partial x} = \operatorname{div} \left[D_t \frac{\partial N}{\partial y} y_0 - \omega N \right]. \quad (8)$$

Выражение (8) аналогично нестационарному одномерному уравнению:

$$u'_n \frac{\partial N}{\partial t_1} = \operatorname{div} \left[D_t \frac{\partial N}{\partial y} y_0 - \omega N \right], \quad (9)$$

где $t_1 = \frac{x}{u_n}$ — среднее время пребывания частиц в осадительном устройстве; $u'_n = \frac{u_n}{u_n}$.

Переходя к относительным единицам $y' = y/R$ и $t' = t_1/t_0 = \frac{x}{R} \frac{\bar{\omega}}{u_n}$ ($t_0 = R/\bar{\omega}$), обозначим:

$$\omega' = \frac{\omega}{\bar{\omega}}; D'_t = \frac{D_t}{D_0}; N' = \frac{N}{N_0}; \mu_0 = \frac{\bar{\omega} R}{D_0},$$

где $\bar{\omega}$ — средняя по сечению скорость дрейфа частиц к осадительному электроду; \bar{N}_0 — средняя по течению концентрация частиц у входа в канал.

Тогда выражение (9) примет вид:

$$u'_n \frac{\partial N'}{\partial t'} = \frac{1}{\mu_0} \operatorname{div} \left(D'_t \frac{\partial N'}{\partial y'} y_0 \right) - \operatorname{div} (\omega' N'). \quad (10)$$

Параметр μ_0 характеризует относительную роль направленного движения по сравнению с перемещением под действием турбулентных пульсаций. В качестве начального условия используется распределение концентрации частиц во входном сечении канала: $N'_{t=0} = \bar{N}_0(y)$.

Граничное условие на осадительной поверхности, учитывая, что у поверхности $u'_n = 0$, $D'_t = 0$ и $\frac{\partial D'_t}{\partial y'} = 0$, получаем непосредственно из (10):

$$\operatorname{div} (\omega' N') = 0 \text{ при } y' \approx \begin{cases} 1 & \text{для круглой трубы;} \\ 2 & \text{для плоской трубы.} \end{cases}$$

В частности, при осаждении в плоском канале под действием постоянной силы из последнего выражения имеем:

$$\frac{\partial N'}{\partial y'_{y'=2}} = 0.$$

Второе граничное условие на противоположной стенке с учетом, что на ней сила направлена от стенки и $D'_t = 0$, записывается в виде

$$N'_{y'=0} = 0.$$

Уравнение (10) при переменных по сечению коэффициентах турбулентной диффузии и скорости дрейфа аналитически не решается. Однако в двух предельных случаях аналитическое решение может быть получено. В случае очень больших значений параметра μ_0 , когда влиянием диффузии по сравнению с направленным движением можно пренебречь, первое слагаемое в правой части уравнения (10) можно не учитывать.

Возвращаясь к размерным переменным, перепишем уравнение (6) следующим образом:

$$\frac{DN}{Dt} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + v \nabla \right) N = -N \operatorname{div} \omega. \quad (11)$$

Здесь DN/Dt — полная производная от концентрации частиц, взятая в направлении вдоль их траекторий.

Из (11) следует, что если движение безынерционно и $\omega = BF$, то в соленоидальном поле сил ($\operatorname{div} F = 0$) (таком, как поле силы тяжести, электрическое поле без объемного заряда) концентрация частиц остается постоянной вдоль траекторий частиц.

В частности, если концентрация частиц на входе в канал распределена равномерно и равна \bar{N}_0 , то она останется такой во всех точках осадительной

поверхности, куда попадают частицы. Тогда общее количество частиц, осевших на длине x плоской трубы, будет равно (берется полоска единичной ширины) $x\omega N_0$. Отнеся эту величину к общему количеству частиц $N_0\pi 2R$, попадающих в трубу в единицу времени, находим выражение для эффективности осаждения η в плоском канале, не зависящее от характера распределения скоростей потока:

$$\eta = \frac{x\omega}{u_0 2R} = 0,5t', \quad (t' < 2). \quad (11a)$$

Эффективность улавливания становится равной единице при $t' = 2$.

В другом предельном случае, соответствующем очень малым значениям параметра μ_0 , когда влияние диффузии во всех точках сечения потока за исключением пристеночной области велико по сравнению с направленным перемещением, можно считать, что распределение концентрации аэрозоля по сечению канала близко к равномерному. При этом концентрация у стенки оказывается ниже исходной концентрации N_0 и, следовательно, эффективность осаждения должна быть меньше по сравнению с осаждением в отсутствие турбулентного перемешивания.

Расчет эффективности осаждения в плоском канале приводит к выражению, аналогичному (1):

$$\eta = 1 - e^{-0,5t'}. \quad (12)$$

Перейдем теперь к рассмотрению предельных решений при осаждении в поле коронного разряда.

Полагая, что все частицы имеют одинаковый заряд q , а влияние диффузии пренебрежимо мало, уравнение (11) перепишем в виде:

$$\frac{DN}{Dt} = -NBq \operatorname{div} \mathbf{E} = -NBq \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad (13)$$

где ρ — плотность объемного заряда ионов, совпадающая по знаку с зарядом частиц.

Отсюда следует, что в поле коронного разряда при чисто направленном движении частиц их концентрация убывает вдоль траектории.

Поэтому разница между эффективностью осаждения при чисто направленном движении и при равномерном перемешивании аэрозоля будет меньше, чем в случае движения в соленоидальном поле сил.

Рассмотрим в качестве примера осаждение в поле коаксиальных цилиндров.

Выражение для напряженности поля коронного разряда в коаксиальных цилиндрах с учетом известного выражения для вольт-амперной зависимости [Л. 6] запишется в виде:

$$E' = \frac{E}{\bar{E}} = \sqrt{\frac{a}{(y')^2} + b}.$$

Здесь \bar{E} — средняя напряженность поля;

$$a = \left(\frac{1}{U' \ln \frac{R}{r_0}} \right)^2;$$

$$b = \frac{4 + 0,11 \sqrt{\frac{R}{r_0}}}{\ln \frac{R}{r_0}} \frac{U' - 1}{U'},$$

где r_0 и R — соответственно радиусы внутреннего и внешнего электродов; U' — напряжение, приложенное к промежутку, отнесенное к начальному напряжению зажигания коронного разряда.

Решение уравнения (13) приводит к следующему соотношению для распределения концентрации аэрозоля в случае чисто направленного движения:

$$N' = 1 - \frac{b}{\sqrt{a + b(y')^2}} t';$$

$$(\sqrt{a + b(y')^2} \geq \sqrt{a + br_0^2} + bt'). \quad (13a)$$

Отсюда, относя количество осаждающихся частиц на заданном участке трубы в единицу времени к общему количеству частиц, попадающих в трубу за 1 сек, независимо от профиля скоростей в трубе получаем:

$$\eta = 2\sqrt{a + b t'} - b(t')^2; \quad t' \leq \frac{\sqrt{a + b} - \sqrt{a}}{b}. \quad (14)$$

При малых значениях параметра μ_0 , когда распределение концентрации частиц близко к равномерному, имеем:

$$\eta = 1 - \exp(-2t') = 1 - \exp(-t'_{\text{эфф}}), \quad (15)$$

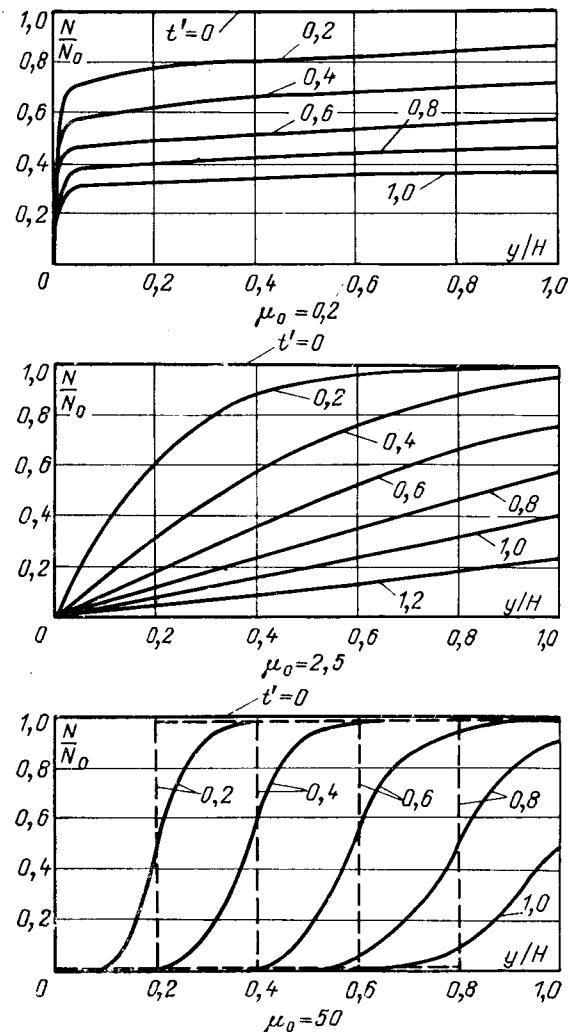


Рис. 2. Распределение концентрации аэрозоля по сечению плоского канала шириной H при различных значениях параметра μ_0 .

— $\mu_0 = \infty$.

где

$$t'_{\text{эфф}} = 2E'_{y=1} t' = 2\sqrt{a+b} \frac{\bar{\omega}}{u_{\text{пп}} R}.$$

Нетрудно заметить, что (15) совпадает с (1) при $\chi=1$.

Кривые изменения во времени (по длине канала) эффективности осаждения для рассмотренных предельных случаев приведены на рис. 2.

В общем случае, когда скорости направленного и диффузионного перемещения одного порядка, необходимо решать уравнение (10). Аналитическое решение этого уравнения известно лишь для случая однородного поля и постоянного по сечению коэффициента турбулентной диффузии [Л. 7]. При составлении разностных уравнений для решения на ЦВМ была использована так называемая неявная разностная схема [Л. 8], которая является устойчивой при любом соотношении шагов по времени t' и координате y' .

Получающаяся на каждом временном слое система разностных уравнений решалась методом прогонки. С целью получения большой точности, учитывая резкое изменение у стенок величин скорости

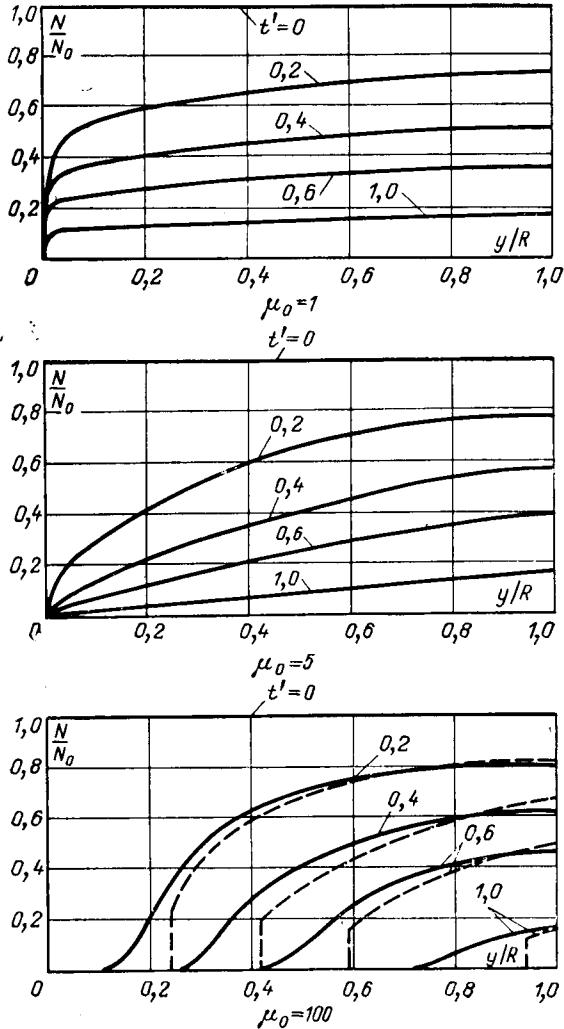


Рис. 3. Распределение концентрации аэрозоля по сечению трубчатого электрофильтра при различных значениях параметра μ_0 ($U'=3$, $r_0/R=0,01$).
— расчет по (13а).

потока и коэффициента турбулентной диффузии, шаги по координате y брались неравномерными, уменьшаясь по мере приближения к стенкам трубы по геометрической прогрессии.

Из анализа уравнения (10) при заданных начальных и граничных условиях видно, что решение в относительных единицах определяется величиной безразмерного параметра μ_0 , распределением скоростей потока $u'_{\text{пп}}$ и коэффициента диффузии D'_t , являющимися функциями числа Рейнольдса потока. Кроме того, решение зависит от характера распределения по сечению скорости дрейфа частиц $\bar{\omega}$ в направлении к осадительному электроду.

В поле коронного разряда при выполнении условия (5) относительная скорость дрейфа $\bar{\omega}'$, равная E' , определяется геометрией электродов и величиной перенапряжения U' .

Уравнение (10) решалось на ЦВМ для случая однородного поля сил в плоском канале и поля коронного разряда в коаксиальных цилиндрах.

Первоначально исследовалась зависимость решения от числа Рейнольдса потока. Расчеты, приведенные для различных значений параметра μ_0 при изменении чисел Рейнольдса потока Re от 10^4 до $5 \cdot 10^4$ (такие числа Рейнольдса характерны для аппаратов электрогазоочистки) показали, что связанное с этим изменение профиля скоростей и распределения коэффициента диффузии D'_t практически не влияет на результаты решения. Более того, изменение решения было незначительным даже тогда, когда распределение скоростей потока по сечению было принято равномерным (рис. 5). Распределение коэффициентов диффузии также менялось в широких пределах. В частности, наряду с (3) предполагалось, что согласно [Л. 9] в ламинарном подслое коэффициент турбулентной диффузии меняется пропорционально четвертой степени расстояния от стенки, причем толщина подслоя менялась в несколько раз. Результаты решения и в этом случае остались неизменными.

Отсюда следует, что приведенные ниже данные пригодны и для случая, когда профиль скоростей является неустановившимся и распределение коэффициента диффузии по сечению канала отличается от расчетного. Необходимо лишь, чтобы области резкого изменения $u'_{\text{пп}}$ и D'_t были сосредоточены в узком пристеночном слое.

Расчеты, проведенные с учетом коэффициента броуновской диффузии, показали, что по крайней мере для значений параметра $\mu_0 > 0,1$ броуновскую диффузию можно не учитывать.

Таким образом, остается только два параметра, определяющих решение, — μ_0 и распределение $\bar{\omega}$ по сечению. Число Рейнольдса для потока в последующих расчетах бралось равным $2 \cdot 10^4$. В случае круглой трубы выражение для параметра μ_0 можно записать в более простой форме:

$$\mu_0 = \frac{Re^{1/8}}{0.014} \frac{\bar{\omega}}{u_{\text{пп}}} \quad (16)$$

или в диапазоне изменения $Re = (1 \div 5) \cdot 10^4$

$$\mu_0 = (226 \div 275) \frac{\bar{\omega}}{u_{\text{пп}}}, \quad (17)$$

т. е. в первом приближении вместо параметра μ_0 можно использовать отношение скорости дрейфа к осадительному электроду к средней скорости потока \bar{u}_n .

Напомним, что коэффициент пропорциональности при \bar{u}/\bar{u}_n получен без учета влияния электрического ветра на коэффициент диффузии в ядре потока и может быть существенно меньше приведенного значения. Рассчитанные на ЦВМ для различных значений μ_0 профили концентраций приведены на рис. 2 и 3. Здесь же для сравнения пунктиром показаны профили концентраций при чисто направленном движении ($\mu_0 = \infty$).

На рис. 4 приведены зависимости эффективности осаждения от времени пребывания частиц в осадительном устройстве. Сравнение с предельными кривыми, соответствующими случаям чисто направленного движения и равномерного распределения концентрации частиц по сечению канала показывает, что при $\mu_0 > 50 \div 100$ движение можно считать чисто направленным. Для более точного определения значений параметра μ_0 , при которых приемлемо предположение о равномерном перемешивании частиц, на рис. 5 приведена кривая зависимости от μ_0 усредненной величины относительной погрешности δ в определении времени, необходимого для обеспечения эффективности осаждения в диапазоне от 0,9 до 0,99. Погрешность δ определялась следующим образом. При заданном значении эффективности осаждения рассчитывалась величина:

$$\delta = \frac{t'_{1\phi} - t'_{2\phi}}{t'_{1\phi}},$$

где $t'_{1\phi}$ и $t'_{2\phi}$ — времена, необходимые для обеспечения заданной эффективности и рассчитанные соответственно в предположении о равномерном распределении концентрации аэрозоля по сечению потока и на ЦВМ. Величина δ получалась путем усреднения значений δ , найденных при изменении эффективности осаждения от 0,9 до 0,99.

Как видно из рис. 3, при осаждении в однородном (соленоидальном) поле и в поле развитого коронного разряда между коаксиальными цилиндрами предположение о равномерном распределении концентрации частиц по сечению потока, наиболее часто использующееся в практике газоочистки, приемлемо при значениях μ_0 , соответственно меньших

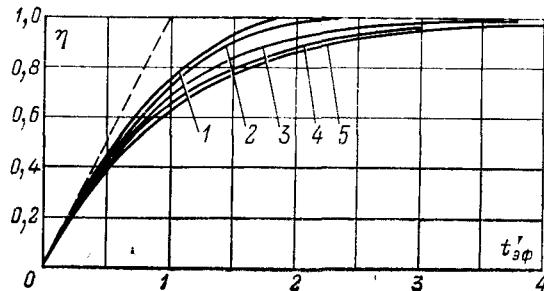


Рис. 4. Зависимость эффективности осаждения η от t'_{ϕ} в поле коронного разряда (система электродов — коаксиальные цилиндры; $U' = 3, r_0/R = 0,01$).

1 — $\mu_0 = \infty$, расчет по формуле (14); 2 — $\mu_0 = 100$; 3 — $\mu_0 = 5$; 4 — $\mu_0 = 1$; 5 — расчет по (15).

— — — расчет по (11a) для однородного поля при $t'_{\phi} = 0,5^*$.

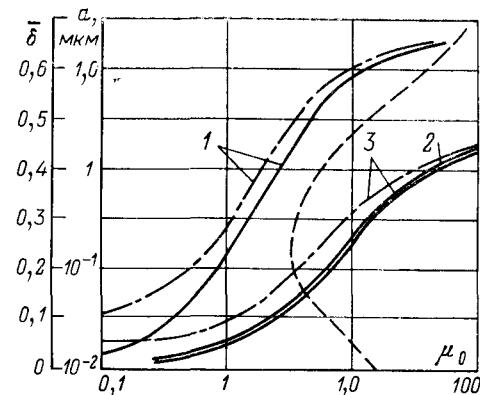


Рис. 5. Зависимость от параметра μ_0 величины усредненной относительной погрешности δ .

1 — однородное поле; 2 — коаксиальные цилиндры ($U' = 2, r_0/R = 0,01$); 3 — коаксиальные цилиндры ($U' = 3, r_0/R = 0,01$); 4 — логарифмический профиль скоростей; 5 — равномерный профиль скоростей; — — — зависимость δ от μ_0 при $u_n = 2$ м/сек и $E = 2$ кв/см.

$\mu_0 = 0,5$ и $\mu_0 = 2 \div 5$. Для большей наглядности на этом же рисунке приведена кривая значений радиусов частиц a , соответствующих заданным значениям μ_0 при средней напряженности поля в промежутке $E = 2$ кв/см и скорости потока $\bar{u}_n = 2$ м/сек.

При вычислении значений радиусов из соотношения (16) учтена поправка Кенингема [Л. 10] на подвижность для частиц, сравнимых с длиной свободного пробега молекул воздуха, и нелинейность закона сопротивления среды для крупных частиц, для которых перестает выполняться закон Стокса.

Как видно из рис. 5, для $U' = 2$ погрешность δ не превосходит 0,2 при $\mu_0 \leq 6$, что при $E = 2$ кв/см и $\bar{u}_n = 2$ м/сек соответствует частицам радиуса $0,035 \leq r \leq 1,25$ мкм.

Сопоставляя кривые погрешностей на рис. 5 для значений перенапряжений U' , равных 2 и 3, видим, что в условиях развитой короны погрешности почти не зависят от величины перенапряжения, т. е. от распределения ω' . Таким образом, если в качестве аргумента рассматривать не t' , а t'_{ϕ} , то решение в целом будет слабо зависеть от распределения безразмерной скорости дрейфа ω' . С физической точки зрения это легко объясняется, поскольку в условиях развитой короны скорость ω' остается постоянной на большей части промежутка и различие в распределении ω' при разных перенапряжениях наблюдается лишь вблизи коронирующего электрода.

При проведении расчетов предполагалось, что перемешивание приводит к постоянству среднего заряда частиц в межэлектродном промежутке и в этом предположении $\omega' = E'$. Для определения вносимой при этом погрешности расчеты проводились и для другого предельного случая, когда выравнивания зарядов не происходит, $q = E'$ и $\omega' = (E')^2$. По причинам, указанным выше, эта погрешность оказалась пренебрежимо мала.

Воспользовавшись приближенными решениями, соответствующими малым значениям μ_0 , оценим теперь правомерность допущения о малости продольной диффузии частиц по сравнению с переносом их

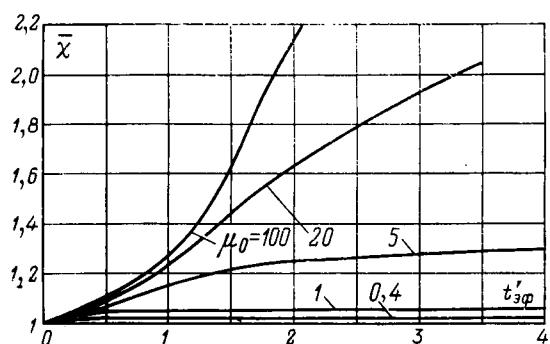


Рис. 6. Зависимость усредненных значений коэффициента неравномерности $\bar{\chi}$ от $t'_{\text{эфф}}$ при осаждении в поле коронного разряда между коаксиальными цилиндрами $r_0/R = 0,01$, $U' = 3$.

потоком, т. е. покажем, что [см. уравнение (7)]

$$u_{\text{пп}} \frac{\partial N}{\partial x} \gg D_{\text{т}} \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}$$

или в относительных единицах

$$\frac{\partial N'}{\partial t'} \gg \frac{D_{\text{т}} \bar{\omega}}{u_{\text{пп}} \bar{u}_{\text{пп}} R} \frac{\partial^2 N'}{(\partial t')^2} \approx \frac{1}{250} \frac{\bar{\omega}}{u_{\text{пп}}} \frac{\partial^2 N'}{(\partial t')^2}. \quad (18)$$

Подставляя в (18) значение $N' = 1 - \eta$ из (12) или из (15), получаем, что при встречающихся на практике соотношениях скорости дрейфа к осадительному электроду и скорости потока $\bar{\omega}/\bar{u}_{\text{пп}}$ производная $\partial N'/\partial t'$ по крайней мере на 2 порядка превышает выражение в правой части неравенства (18). Отметим, что, как следует из графиков на рис. 4, при равенстве производных $\partial N'/\partial t'$ для $t' = 0$ вторые производные от концентрации по времени принимают максимальное значение как раз для рассмотренного случая, т. е. при промежуточных значениях μ_0 условие (18) будет выполняться тем более.

Поскольку допущение о равномерном перемешивании частиц выполняется лишь для очень мелких частиц, представляет интерес рассмотреть, насколько верно предположение о постоянстве коэффициента неравномерности χ (см. начало статьи) по длине электрофильтра. Анализ рассчитанных на ЦВМ значений χ показывает, что условие постоянства χ приближенно выполняется лишь для значений $\mu_0 \leq (5 \div 10)$. В качестве иллюстрации на рис. 6 приведены усредненные за время $t'_{\text{эфф}}$ значения χ , полученные приравниванием соотношения (1) вычисленным на ЦВМ значениям эффективности.

Сопоставление коэффициентов неравномерности χ , которые рассчитаны при значениях μ_0 , определяемых соотношением (16), с результатами эксперимента на модели трубчатого электрофильтра

[Л. 11] показало, что расчетные величины на 7—10% превышают экспериментальные. Более точное сравнение может быть проведено при наличии данных о влиянии электрического ветра на величину коэффициента турбулентной диффузии.

Из приведенных кривых видно, что использование выражения (1) в общем случае может привести к существенной ошибке. Положение облегчается тем, что расчет электрофильтров производят по наиболее мелкой фракции, для которой, как правило, погрешность оказывается незначительной.

Выводы. 1. Процесс осаждения частиц аэрозоля из турбулентного потока в поле внешних сил в основном определяется величиной безразмерного параметра μ_0 , характеризующего относительную роль направленного движения и турбулентного перемешивания, и характером изменения внешней силы.

2. Погрешность в определении эффективности осаждения, возникающая при использовании допущения о равномерном перемешивании частиц по сечению канала, существенно зависит от того, является ли поле сил соленоидальным или нет, и значительно меньше в последнем случае, например для случая осаждения в поле коронного разряда.

3. Расчетным путем показано, что при осаждении в поле коронного разряда между коаксиальными цилиндрами допущение о равномерном перемешивании частиц приемлемо при значениях параметра $\mu_0 \leq 5$. Использование постоянного по длине канала коэффициента неравномерности χ при значениях $\mu_0 \geq (5 \div 10)$ приводит к существенной ошибке в расчете эффективности осаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robinson M. Modified Deutsch efficiency equation for electrostatic precipitation.—«Atm. Environ.», 1967, v. 1, p. 193—204.
2. Хинце И. О. Турбулентность М., Физматгиз, 1963. 680 с.
3. Mizushima T., Ogino F. Eddy viscosity and universal velocity profile in turbulent flow in a straight pipe.—«J. Chem. Engineering of Japan», 1970, v. 3, № 2, p. 166.
4. Groenichov H. C. Eddy diffusion in the central region of turbulent flows in pipes and between parallel plates.—«Chem. Eng. Sience», 1970, v. 25, № 6, p. 1005—1014.
5. Sehmel G. A. Aerosol deposition from turbulent airstreams in vertical conducts. Pasific Northwest Lab., BNWL — 578, Richland, 1968.
6. Капцов Н. А. Коронный разряд. М., ОГИЗ, 1947, 226 с.
7. Davies C. N. Diffusion and sedimentation. Proc. Roy. Soc., 1949, 200A, p. 100.
8. Самарский Н. А. Введение в теорию разностных схем. М., «Наука», 1971, 552 с.
9. Лайоцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М., «Наука», 1970, 904 с.
10. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М., Изд. АН СССР, 1955, 351 с.
11. Воробьев П. В., Удалова В. И., Мирзабекян Г. З. Распределение концентрации заряженного аэрозоля в трубчатом электрофильтре. — «Промышленная и санитарная очистка газов», 1972, № 6, с. 17—21.

[13.3.1973]



Исследование разрядных характеристик газовых промежутков с диэлектрическими покрытиями на электродах при повышенном давлении

ПЕРЛИН А. С.

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова

Возрастающее использование сверхвысоких напряжений во многих областях науки и техники вызывает необходимость разработки и исследований различных видов электрической изоляции, способной обеспечить создание надежных и компактных изоляционных конструкций, допускающих рабочие напряженности до 300—400 кв/см. В качестве такой изоляции в настоящее время широко применяется сжатый газ.

Электрическая прочность сжатых газов в однородном поле для геометрически подобных промежутков является функцией только произведения ps (закон подобия), где p — давление газа, s — длина разрядного промежутка. Однако при напряженностях выше 100 кв/см наблюдаются отклонения экспериментальных результатов от закона подобия, увеличивающиеся с ростом произведения ps . При этом экспериментальные значения пробивных напряжений становятся заметно ниже предсказанных законом подобия.

Можно предположить, что эти отклонения могут быть вызваны какими-либо процессами в объеме газа или на поверхности электродов, причем их величина возрастает с ростом произведения ps .

Известно, что величина пробивного напряжения в газе при повышенном давлении в значительной степени определяется предварительной искровой тренировкой электродов [Л. 1 и 2]. Однако метод искровой тренировки, несмотря на свою эффективность, недопустим для большинства практических конструкций.

Эффект искровой тренировки, по-видимому, связан с процессами, происходящими на поверхности электродов, поэтому для снижения или полного устранения возможного негативного влияния при-электродных процессов предлагалось наносить на металлические электроды изоляционные или полупроводящие пленки [Л. 3—8], что позволило в значительной степени повысить пробивное напряжение промежутков и приблизиться к закону подобия при высоких значениях произведения ps . Результаты этих опытов позволяют сформулировать основные требования к изоляционным покрытиям.

Электрическая и механическая прочность материала покрытия должны быть достаточно высокими. Покрытие должно иметь толщину (25—150) мкм, обладать высокой сопротивляемостью к истиранию, химической стойкостью и хорошей адгезией к металлической подложке. Газовые включения в диэлектрике нежелательны или, по крайней мере, их размер должен быть значительно меньше толщины покрытия. В [Л. 7] высказывается мнение, что удельное объемное сопротивление материала покрытия ρ_v должно быть высоким (приблизительно 10^{12} ом·м), а диэлектрическая проницаемость ϵ не должна превышать нескольких единиц. Однако успешное использование полупроводящих покрытий [Л. 6] ставит это требование под сомнение. Столь

же противоречивы имеющиеся данные о влиянии на эффективность изоляционных покрытий чистоты и качества подготовки поверхности металлического электрода.

С целью накопления экспериментальных данных, проверки и уточнения степени влияния на электрическую прочность газонаполненных промежутков некоторых характеристик диэлектрических покрытий, а также параметров газового промежутка были проведены исследования электрической прочности сжатого азота в однородном поле с электродами, покрытыми диэлектриком. В качестве диэлектрика использовались порошковые полимеры, не применявшиеся ранее для этой цели.

Покрытия из порошковых полимеров и их свойства. При исследованиях использовались следующие порошковые композиции: полиэтилен низкого давления, поливинилбутиральные и эпоксидные порошковые краски.

Выбор этих материалов обусловлен следующими причинами. Полиэтилен является одним из лучших полимерных диэлектриков, выпускается в виде сыпучего порошка и образует покрытия за сравнительно короткое время. Поливинилбутиральные порошковые краски также выпускаются промышленностью. Они содержат различные модификаторы, которые позволяют в некоторых пределах изменять диэлектрические свойства покрытий. Покрытия из эпоксидных порошковых красок, кроме хороших диэлектрических характеристик, обладают также высокими физико-механическими свойствами, что может в значительной степени определять характер влияния покрытий на пробивные характеристики газового промежутка.

Процесс получения покрытий из порошковых композиций заключается в следующем. Перед нанесением порошка электроды тщательно обезжириваются толуолом или ксиолом, затем путем пневматического распыления с наложением электростатического поля на них наносится слой порошка, который за счет электростатических сил равномерно покрывает всю поверхность электрода. После этого электроды помещаются в сушильный шкаф при температуре 200 °С. Длительность формирования покрытия для каждого материала зависит от площади электрода (т. е. от массы прогреваемого металла) и подбирается экспериментально. Такая технология при постоянстве фракционного состава полимера и напряженности электростатического поля обеспечивает получение покрытий толщиной приблизительно 100 мкм.

В таблице приведены физико-механические и электрические характеристики использованных покрытий. Из таблицы видно, что полученные покрытия обладают достаточно высокими физико-механическими свойствами и позволяют проверить влияние электрических свойств покрытий в широком диапазоне их изменения.

| Материал покрытия | Состав | Физико-механические характеристики | | | | Электрические характеристики | | | |
|---------------------------------|---|--|----------------------------|---------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|------------------|---------|
| | | Прочность при разрыве, кгс/см ² | Относительное удлинение, % | Гибкость по ШГ-1, м | Устойчивость удару, кгс·см | Адгезия к Al, з/см | U_{pr} , кВ | E_{pr} , кВ/см | |
| ПЭ | П-4020 | 110 | 46 | 1 | 50 | 800 | $3 \cdot 10^{-6}$ | 2,5 | 110-120 |
| Поливинилбутилуретановые краски | Эпоксид Э-44-100 Дициандиамид-3,2 Поливинилбутилуретан-3 Красная окись железа-50 | 600 | — | 1 | 50 | 1200 | $5,6 \cdot 10^{-4}$ | 3,7 | 48 |
| | Эпоксид Э-44-100 Дициандиамид-3,2 Поливинилбутилуретан-3 Двухокись титана-50 | 620 | — | 1 | 50 | 1200 | $2,6 \cdot 10^{-4}$ | 5,0 | 58 |
| | Поливинилбутилуретан ЛА-80 Фталимид-5 Барит-11,3 TiO_2 рутин-3,7 | — | — | — | — | — | $1,6 \cdot 10^{-5}$ | 4,4 | 20 |
| | Поливинилбутилуретан-80 Фталимид-5 Барит-13 Синтетический крон | — | — | — | — | — | $1,1 \cdot 10^{-5}$ | 1,3 | 39 |
| | Поливинилбутилуретан-84 Фталимид-5 Барит-10 Сажа газовая-1 | — | — | — | — | — | $2,2 \cdot 10^{-11}$ | 1,43 | 8 |

Экспериментальное оборудование и методика измерений. Настоящие исследования проводились на экспериментальных установках ИГИ-1 и ИГИ-2.

Установка ИГИ-1 представляет собой стальную камеру диаметром 500 мм и высотой 800 мм, рассчитанную на давление газа 16 ати. Область разрядного промежутка экранирована полированным цилиндром. Система установки испытательных электродов снабжена юстировочным устройством и позволяет регулировать длину разрядного промежутка от 0 до 10 см с точностью 0,05 мм. Высокое постоянное напряжение от роторного электростатического генератора РЭГ-160 подается в камеру через кабельный ввод. Специальная схема обеспечивает стабильность выходного напряжения генератора не хуже 0,5% и возможность плавной регулировки его в диапазоне от 12 до 190 кв. Измерение напряжения осуществляется с помощью высоковольтного измерительного делителя и включенного последовательно с ним самопищущего микроамперметра Н-37.

Источником напряжения на установке ИГИ-2 служит электростатический генератор Ван де Графа на номинальное напряжение 1200 кв, установленный в стальном сосуде высотой 1200 мм и диаметром 900 мм, который одновременно служит испытательной камерой. Система стабилизации зарядного тока генератора обеспечивает стабильность выходного напряжения $\pm 0,5\%$ в пределах от 100 до 1200 кв. Тщательно отполированный высоковольтный электрод генератора выполнен из нержа-

веющей стали и служит местом установки одного из испытательных электродов. Противоположный электрод установлен на изоляторе и перемещается регулировочным механизмом. Измерение напряжения производится аналогично вышеуказанному.

Для создания однородного поля применялись полированные электроды из нержавеющей стали, выполненные по профилю, предложенному в [Л. 10]. В экспериментах использовались электроды диаметром 100, 200 и 300 мм.

Влажность газа характеризовалась температурой выпадения росы не выше -50°C .

Опыты проводились в следующем порядке. Испытательное напряжение на промежутке плавно поднималось до значения, равного $0,9 U_{pr}$, а затем ступенями до пробоя. После пробоя системы отсечки резко снижали подаваемое напряжение, что предотвращало возможность последующих пробоев, после чего напряжение на промежутке полностью снималось.

Значения пробивных напряжений определялись как средние из 10—15 отсчетов.

Для проверки идентичности условий эксперимента на установках ИГИ-1 и ИГИ-2 проводились контрольные опыты при одинаковых параметрах газа и промежутка. Различия не превышали 2—3%.

Экспериментальные результаты и их обсуждение.

Для промежутка с электродами из нержавеющей стали диаметром 100 мм, обработанными по 8—9 классу, были сняты зависимости пробивных напряжений от числа разрядов в азоте для различных значений давления газа и длины промежутка (рис. 1). Наибольший эффект от проведения искровой тренировки был получен при давлении 10 ати и расстоянии 30 мм. Первоначальное пробивное напряжение после 60—70 пробоев увеличилось приблизительно на 50%. При дальнейшей тренировке после 200 пробоев напряжение возросло еще на 10%. При давлении 2 ати и том же расстоянии эффект тренировки практически отсутствует. В результате 10—15 пробоев в этом случае лишь умень-

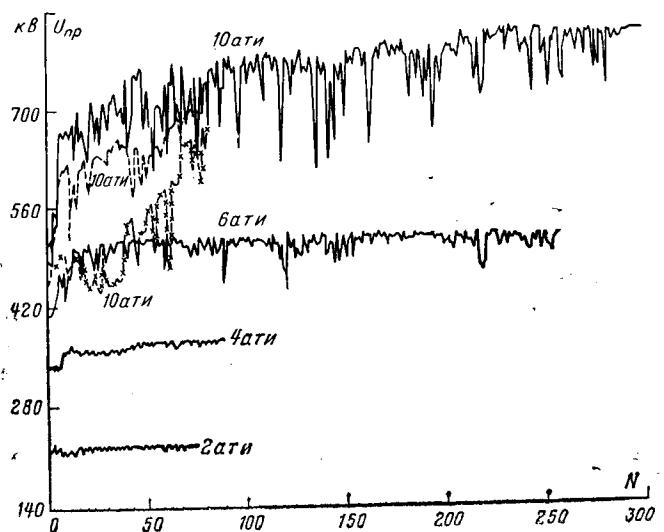


Рис. 1. Искровая тренировка неизолированных электродов в азоте

— для электродов диаметром 100 мм; — для электродов диаметром 200 мм; *** — то же 300 мм.

шается разброс значений пробивных напряжений. Среднеквадратичные отклонения во всем исследованном диапазоне изменения произведения ps не превышали 4 %.

Влияние искровой тренировки растет и с увеличением длины промежутка. При больших давлениях газа и значительных промежутках процесс тренировки более длительный (для достижения предельных напряжений иногда необходимо произвести несколько сотен разрядов), чем при малых давлениях и расстояниях, но и относительное увеличение предельного напряжения в результате тренировки по сравнению с первоначальным значением много больше. Необходимо отметить, что искровая тренировка, проведенная при более низких давлениях и расстояниях недостаточна, если эти параметры затем увеличены. В этих случаях тренировку необходимо продолжить.

На эффективность искровой тренировки влияет подготовка поверхности электродов. В случае грубо обработанных электродов или при наличии на их поверхности царапин и кратеров необходимо произвести большее число тренирующих разрядов, но при этом и прирост напряжения более значительный. В реальных конструкциях, где газы и электроды запыленные, поверхность электродов далеко не идеальная и площадь последних составляет иногда до десятков квадратных метров, роль и эффективность искровой тренировки значительно повышается. На рис. 1 приведены также результаты тренировки промежутков с электродами диаметром 200 и 300 мм при давлении азота 10 ати и длине промежутка 30 мм. Сравнивая данные для электродов с различными диаметрами при прочих равных параметрах, можно видеть, что в случае электродов с большей площадью процесс тренировки более медленный и начинается с меньших значений пробивных напряжений.

На рис. 2 приведены результаты, полученные при нанесении покрытия на оба электрода при различных диаметрах последних. При проведении этих экспериментов для каждого значения давления газа и расстояния между электродами устанавливались новые электроды с изоляционными покрытиями. Напряжение первого пробоя в случае электродов с покрытиями практически соответствует предельному напряжению пробоя промежутка, достигнутому в результате длительной искровой тренировки электродов без покрытия. Наибольший эффект от использования покрытий наблюдается при больших давлениях и расстояниях, т. е. в тех случаях, когда наиболее эффективно применение искровой тренировки.

При использовании покрытия на электродах диаметром 300 мм напряжение первого пробоя увеличилось приблизительно на 70 %.

Определить оптимальные или критические значения ρ_v , ε или их произведения с точки зрения достижения наибольшего эффекта от применения диэлектрических покрытий в проведенных экспериментах не удалось. Для всех исследованных видов покрытий результаты в пределах ошибки измерений совпадали.

Использование покрытий позволило в значительной степени снизить разброс значений разрядных

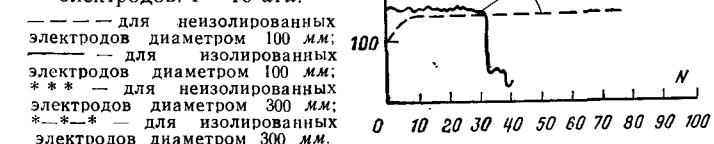
напряжений при больших произведениях ps ($\sigma \leq 3\%$). Все покрытия выдержали до 100 и более пробоев без снижения пробивного напряжения. Только при небольших промежутках (меньше 0,5—0,8 см) или при низких давлениях (меньших 2—3 ата) несколько пробоев вызывали столь значительные разрушения покрытия, что пробивное напряжение снижалось в 2—3 раза даже по сравнению с напряжением первого пробоя при непокрытых электродах.

При осмотре электродов после испытаний обнаружено, что количество следов на их поверхности в случае, когда изолированы оба электрода, соответствует числу имевших место разрядов. Следы равномерно распределялись по всей поверхности плоского участка электродов. Если же покрытие наносилось только на катод, то число следов на катоде иногда было вдвое меньше числа разрядов, в то время как на аноде количество следов и разрядов соответствовало друг другу. Аналогичные явления наблюдались в [Л. 5].

Фотографии следов разрядов на электродах, полученные с помощью металлографического микроскопа МИМ-8м, показывают, что при покрытии только катода разряд развивается практически с одного места, так как следы расположены очень близко и область нарушения изоляционного покрытия у них общая, поэтому число следов меньше количества разрядов. Повреждения от разрядов на непокрытом аноде в случае покрытого катода значительно меньше, чем при отсутствии покрытия на катоде. С увеличением длины промежутка или давления газа размер повреждений на электродах тоже увеличивается. Повреждения на покрытиях, как правило, состоят из четырех зон. На аноде можно видеть две зоны в виде концентрических колец, представляющих собой участки изоляционного материала, подвергнутые в разной степени тепловому воздействию разряда, затем зону металла, с которой изоляционное покрытие полностью удалено, и в центре ядро в виде довольно глубокого кратера с расплавленным, а иногда полностью вырванным из электрода металлом. На катоде эти зоны имеют неправильную форму и менее четкие границы.

В рассмотренном диапазоне изменения пара-

Рис. 2. Зависимость пробивного напряжения азота в однородном поле от числа разрядов для изолированных и неизолированных электродов. $P = 10$ ати.



метров промежутка не наблюдается существенного влияния степени повреждения покрытия на величину разрядного напряжения, хотя эти повреждения увеличиваются с ростом длины промежутка и давления газа. Когда расстояние между электродами соизмеримо по величине с толщиной покрытия или при малых давлениях, число допустимых разрядов не превышает двадцати, а в целом ряде случаев было ограничено единичными пробоями. При этом размеры разрушенной зоны покрытия небольшие, но по краям видны отдельные частицы диэлектрика, для полного удаления которых не хватало мощности в разряде. Эти частицы ориентируются вдоль электрического поля и создают благоприятные условия для протекания через промежуток значительных токов. Поэтому даже при очень низких напряженностях промежуток теряет изоляционную способность и становится проводящим.

Кроме этого, необходимо отметить, что при одной и той же толщине диэлектрика функции покрытия различны в больших и малых промежутках. При толщине покрытия, соизмеримой с величиной промежутка, существенную роль играет электрическая прочность материала покрытия, его качество (наличие газовых включений и примесей) и механические характеристики, поскольку в этом случае напряжение, приложенное к промежутку, распределяется между газом и твердым диэлектриком пропорционально значениям ϵ , т. е. электрическая прочность промежутка в значительной степени определяется прочностью покрытия. В больших промежутках все напряжение практически приложено к газовому слою. Роль же покрытия сводится к снижению напряженности электрического поля у микровыступов на поверхности металлических электродов. Размеры разрушений в этих случаях значительны, частицы диэлектрика в месте разряда пол-

ностью удалены с электрода, а края зоны поражения ровные и сравнительно правильной формы. Каждый разряд при этом как бы производит тренировку той части металлической поверхности, которая остается без диэлектрического покрытия. Это позволяет допускать большое количество разрядов без снижения разрядных напряжений даже при значительных повреждениях диэлектрического слоя. В отличие от непокрытых металлических электродов в этом случае искровая тренировка происходит с самого начала при максимальном разрядном напряжении данного промежутка.

Для различных давлений азота исследованы зависимости пробивных напряженностей от длины промежутка для электродов без покрытия и в случае нанесения изоляционного покрытия на катод (рис. 3). При давлении, меньшем 3 ата, покрытие на катоде практически не увеличило пробивную напряженность. Однако при 11 ата во всех исследованных промежутках пробивная напряженность увеличилась приблизительно на 15% в случае использования покрытия. Для промежутка 5 мм удалось довести напряженность пробоя примерно до 310 кв/см при давлении 11 ата, хотя стойкость покрытия в этом случае невысока. В этих же опытах было исследовано влияние состояния поверхности металлического электрода на величину пробивной напряженности газовых промежутков. Испытательные электроды в этом опыте были обработаны по 4 классу и на их поверхности нанесены царапины. При отсутствии покрытия хорошо подготовленная поверхность катода позволяла повысить прочность промежутка на 20% по сравнению с грубо обработанными электродами. При наличии покрытия уровень подготовки электрода не оказал заметного влияния. Необходимо отметить, что нанесение покрытия только на катод значительно более эффективно, чем изолирование обоих электродов или только анода (рис. 2 и 3).

Рассмотренные выше эксперименты проведены применительно к маломощным высоковольтным установкам. Поэтому токи в разрядах не превышали 1 мА и диэлектрические покрытия выдерживали значительное число разрядов. Проследить зависимость разрядных напряжений от мощности разрядов в широком диапазоне ее изменения в настоящей работе не представляется возможным, так как мощность источников напряжения была ограничена. Те же различия в мощности разрядов, которые имеют место при изменении давления газа или величины промежутка, как было показано выше, неоднозначно определяют характер разрушения, а значит и изменение разрядных напряжений.

Важной характеристикой диэлектрических покрытий является максимально допустимое число разрядов определенной мощности без снижения разрядного напряжения. Это число зависит от многих факторов: площади электродов, давления газа и длины промежутка, качества покрытия, наличия дефектов и т. д. Поэтому в каждом конкретном случае это число будет различным. Однако из проведенных экспериментов ясно, что максимально допустимое число разрядов при значениях $ps > 5000 \text{ м} \cdot \text{ст} \cdot \text{см}$ превышает 250, что вполне достаточно для обеспечения работы электростатиче-

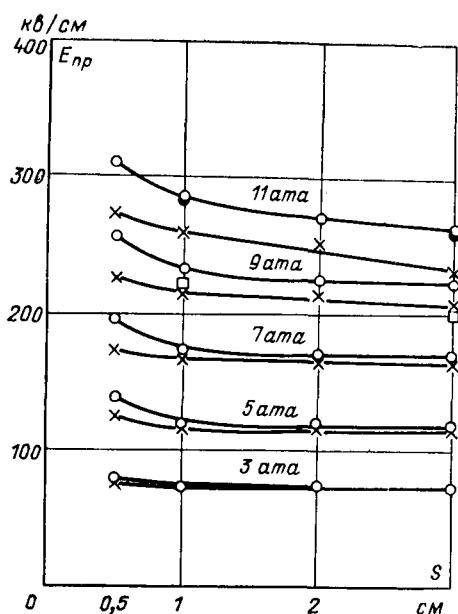


Рис. 3. Зависимость пробивной напряженности в азоте от длины промежутка для неизолированных и изолированных электродов. Диаметр электродов 100 мкм.

Х — неизолированные электроды, хорошо обработанные; □ — то же грубо обработанные; О — изолированные электроды, хорошо обработанные; ● — то же грубо обработанные.

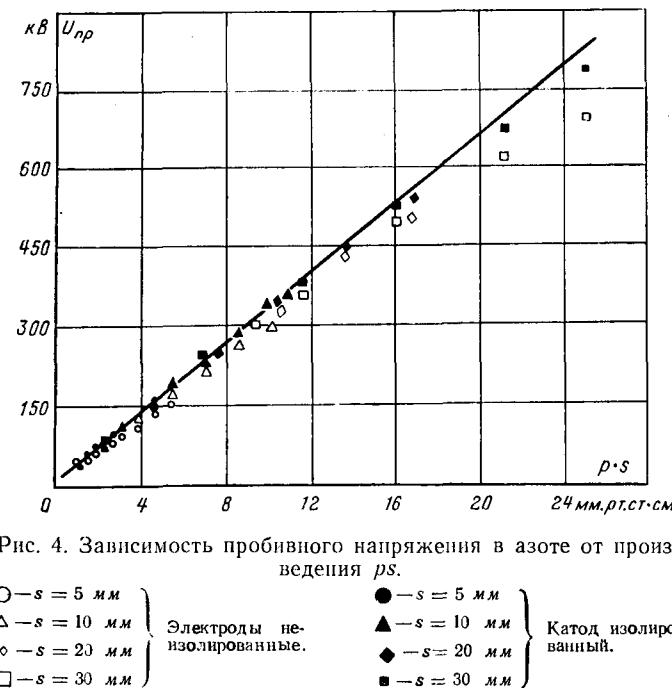


Рис. 4. Зависимость пробивного напряжения в азоте от произведения ps .

○— $s = 5 \text{ мм}$ } Электроды не-изолированные.
△— $s = 10 \text{ мм}$ }
◊— $s = 20 \text{ мм}$ }
□— $s = 30 \text{ мм}$ }
●— $s = 5 \text{ мм}$ } Катод изолиро-
▲— $s = 10 \text{ мм}$ } ванный.
◆— $s = 20 \text{ мм}$ }
■— $s = 30 \text{ мм}$ }

ского генератора в течение длительного времени. Кроме этого, необходимо заметить, что с увеличением площади электродов, максимально допустимое число разрядов растет. На электродах диаметром 300 мм при расстоянии 3 см и давлении 10 ати было произведено более 500 разрядов без снижения разрядного напряжения.

Что касается более мощных разрядов, которые могут иметь место в силовом оборудовании с газовой изоляцией (трансформаторах, ГРУ, высоковольтных кабелях и т. д.), то, так как для них определяющим является первый пробой, зависимость степени разрушения, а значит и разрядных напряжений от мощности разряда является несущественной. Роль покрытия сводится в этих случаях только к повышению напряжения первого пробоя. Таким образом, исследованные покрытия можно рекомендовать для применения в установках различной мощности при отсутствии в промежутке постоянно протекающих значительных токов. При этом необходимо иметь в виду, что в каждом случае эффективность от использования покрытий будет определяться конкретными условиями.

На рис. 4 построена зависимость пробивного напряжения от произведения ps для различных промежутков. Сплошной линией показана зависимость, рассчитанная по условию самостоятельности разряда с учетом фотоэлектрических процессов на

катоде и являющаяся выражением закона подобия [Л. 11]. Отклонения от закона подобия при неизолированных электродах наблюдаются уже при напряженности 100 кв/см. В промежутках с катодом, покрытым диэлектриком, закон подобия выполняется до напряженности около 320 кв/см.

Выводы. 1. Использование изоляционных полимерных покрытий на основе порошковых композиций позволило в значительной степени (в 1,5—2 раза) повысить напряжение первого пробоя в газовых промежутках при повышенном давлении. Эффект применения покрытий растет с увеличением давления газа, длины промежутка и площади электродов.

2. Изоляционные покрытия из порошковых композиций выдерживают более 100 разрядов без снижения пробивного напряжения для произведений ps , превышающих 5000 мм рт. ст·см.

3. Использование изоляционных покрытий позволяет повысить напряженность электрического поля, при которой выполняется закон подобия, до 320 кв/см.

4. Покрытие электродов изоляцией заменяет искровую тренировку с целью достижения предельных значений пробивных напряжений. Особенно это важно для конструкций, не допускающих искровые разряды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cookson A. N. Electrical Breakdown for uniform fields in compressed gases.—«Proc. IEE», 1970, 117, 1, p. 269.
2. Howell A. H. Breakdown studies in Compressed gases.—«Trans. of AIEE», 1939, 58, 5, p. 193.
3. Skipper D. J., Mc Neall P. I. Impulse-strength measurements on compressed-gas insulation for extrahigh-voltages powers cables.—«Proc. IEE», 1965, 112, I, p. 103.
4. Doepken H. C. Compressed gas-insulation in large coaxial systems.—«IEEE, Trans. PAS», 1969, 88, 4, p. 364.
5. Mac Alpine J. M. K., Cookson A. H. Impulse Breakdown of compressed gases between dielectrical covered electrodes.—«Proc. IEE», 1970, 117, 3, p. 646.
6. Jedinal L. Vacuum insulation of High voltages Utilizing Dielectric Coated Electrodes.—«Journal of Applied physics», 1964, 35, 6, p. 1727.
7. Bolin P. C., Trump J. G. Insulating vacuum gaps with dielectric cathode surfaces. Proc. III Insulation Symp.—«Discharges and Electrical insulation in vacuum», Paris, 1968, p. 50.
8. Аронов М. А. и др. Электрические разряды в воздухе при напряжении высокой частоты. М., «Энергия», 1969.
9. Яковлев А. Д., Здор В. Ф., Каплан В. И. Порошковые полимерные материалы и покрытия на их основе. М., «Химия», 1971.
10. Bruce F. M. Calibration on uniform-field spark-gaps for high voltages measurements at power frequencies.—«J. IEE», 1947, 94, pt. II, p. 138.
11. Перлин А. С. Исследование условий развития разряда в азоте и элегазе в равномерном поле. — ЖТФ, 1972, № 5, т. XLII, 1027 с.

[15.10.1973]



Определение тенденций развития автоматизированного электропривода с помощью статистического анализа отечественной и зарубежной литературы

Доктор техн. наук, проф. ПЕТРОВ И. И., канд. техн. наук МЕИСТЕЛЬ А. М.,
канд. техн. наук НАУМЫЧЕВА К. И.

Москва

Задачей статьи является исследование методами статистического анализа информационного потока по автоматизированному электроприводу и установление тенденций развития в этой области.

В качестве информационного массива, на основе которого изучались информационные потоки, взят Реферативный журнал ВИНИТИ, являющийся одной из крупнейших информационных систем в мире. Статистический анализ такой системы позволяет ответить на ряд важнейших для научования вопросов:

как информационный поток распределен по источникам информации, в каких источниках преимущественно публикуется материал по данной тематике;

какова географическая структура информационного потока, в каких странах и в какой мере уделяется внимание тем или иным разработкам;

какова интенсивность информационного потока в целом по данной тематике и отдельных его частей и как она меняется во времени, что является исходной предпосылкой для определения тенденций развития данной научной области и получения данных для мотивированного выбора направлений научных исследований.

Распределение информационного потока по источникам информации. Информационный поток по электроприводу, отраженный в реферативном журнале, представляет собой статьи из периодических, продолжающихся и непериодических изданий, патенты, книги и прочие опубликованные материалы.

Сопоставительные данные по количеству опубликованных в реферативном журнале (РЖ) материалов и их составу в 1956, 1964 и 1972 гг. приведены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, максимальное количество публикаций дают статьи из периодических и продолжающихся изданий (журналы и труды научно-исследовательских, проектных организаций и высших учебных заведений); они составляют в общем балансе публикаций до 60%. Второе место занимает

Таблица 1

| Публикации | Годы | | | | | |
|--|----------|-----|--------|-----|--------|-----|
| | 1956* | | 1964 | | 1972 | |
| | аб. ц.** | % | аб. ц. | № | аб. ц. | % |
| Статьи из периодических и продолжающихся изданий | 465 | 76 | 1017 | 63 | 1153 | 59 |
| Патенты | 80 | 13 | 439 | 27 | 627 | 32 |
| Статьи из непериодических изданий, книги | 68 | 11 | 168 | 10 | 173 | 9 |
| Всего | 613 | 100 | 1624 | 100 | 1953 | 100 |

* 1956 год — первый год издания РЖ.

** аб. ц. — абсолютные цифры.

Таблица 2

| Годы | Количество периодических и продолжающихся изданий | | | Количество статей из периодических и продолжающихся изданий | | | Средняя частота использования* | | |
|------|---|------------|------------------|---|------------|------------------|--------------------------------|------------|------------------|
| | отечественных | зарубежных | общее количество | отечественных | зарубежных | общее количество | отечественных | зарубежных | общее количество |
| 1956 | 59 | 199 | 258 | 128 | 337 | 465 | 2,17 | 1,69 | 1,80 |
| 1964 | 95 | 295 | 390 | 346 | 671 | 1017 | 3,64 | 2,27 | 2,60 |
| 1972 | 136 | 251 | 387 | 571 | 582 | 1153 | 4,20 | 2,32 | 2,98 |

* Под частотой использования понимается количество статей из издания данного наименования в годовом комплекте РЖ; средняя частота использования определяется делением числа статей на число изданий.

мают патенты (примерно 30%). Именно эти два вида информационных материалов определяют полноту тематического и географического охвата всей имеющейся литературы в данной области и представляют интерес для информационного анализа.

Данные по количеству периодических и продолжающихся изданий и статей из них приведены в табл. 2.

Количество периодических и продолжающихся изданий, проходящих по выпуску «Электропривод и автоматизация промышленных установок» за последние годы довольно стабильно и находится на уровне 380—400 наименований в год; они дают более 1000 статей в годовом комплекте РЖ. Обращает на себя внимание большой процент статей из отечественной периодики, что является специфическим для этого выпуска. Приведенные в последних графах цифры по среднему коэффициенту использования периодических и продолжающихся изданий указывают на рассеяние публикаций по большому количеству источников (в среднем не более трех статей из одного периодического издания).

Данные по частоте использования периодических и продолжающихся изданий в годовом комплекте выпуска по электроприводу за 1964 и 1972 гг. приведены в табл. 3.

Более 50% наименований периодических изданий составляют журналы, дающие для выпуска по электроприводу по одной статье в год (наполняют выпуск по статьям примерно на 20%), 18% журналов дают по две статьи в год (наполнение по статьям

Таблица 3

| Частота использования | 1964 г. | | | | 1972 г. | | | |
|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
| | Количество источников | | Количество публикаций | | Количество источников | | Количество публикаций | |
| | аб. ц. | % |
| 1 | 222 | 57 | 222 | 21,8 | 195 | 50,5 | 195 | 17,0 |
| 2 | 67 | 17 | 134 | 6,6 | 76 | 19,5 | 152 | 13,2 |
| 3 | 35 | 9 | 105 | 3,4 | 42 | 10,7 | 126 | 10,8 |
| 4—10 | 52 | 13,4 | 308 | 43,8 | 61 | 15,8 | 395 | 34,2 |
| >10 | 14 | 3,6 | 248 | 24,4 | 13 | 3,5 | 285 | 24,8 |

примерно на 10%), 10% изданий дают по три статьи в год. Следовательно, 80% периодических изданий (с частотой использования 1, 2 и 3) дают примерно 35% публикаций в реферативном журнале. Только 3,5% журналов имеют частоту использования более 10; статьи из этих журналов дают 24% публикаций в годовом комплекте выпуска по электроприводу.

Таким образом, частотный анализ периодики показывает, что для электропривода характерным является рассеяние информации по большому количеству источников с малой частотой использования; недоучет этого обстоятельства может дать потерю информации до 35%. Поэтому весьма существенным является выявление тех источников, из которых, хотя и в небольшом количестве, но регулярно, публикуются статьи по электроприводу. Для этой цели были составлены списки совпадающих журналов в комплекте РЖ за 1964 и 1972 гг. Список периодических изданий, составляющих совпадающий поток за два указанных года, состоит из 120 наименований. Из 95 наименований отечественных периодических изданий (см. табл. 2) в 1964 г. и из 136 наименований 1972 г. совпало 26; из списков зарубежных источников совпало 94 наименования. Совпадшие отечественные издания составляют примерно 7,0% (см. табл. 4) от всей периодики и дают около 20% (18 и 22% соответственно) публикаций.

Для зарубежной периодики характерны следующие цифры: общими для обоих списков являются 94 наименования, что составляет около 24%; эти издания дали наполнение по публикациям пример-

но на 30% (33,7 и 26,2% соответственно). Таким образом, совпадающий поток журналов, составляющий примерно 31% всей периодики, дает наполнение выпуска по публикациям примерно на 50%. Остальные публикации, помещаемые в выпуске «Электропривод и автоматизация промышленных установок», поступают из большого количества периодических изданий, список которых неустойчив и меняется из года в год.

Рассеяние информации по большому количеству источников, являющееся характерной чертой документального потока по электроприводу, вызвало необходимость проанализировать эти периодические издания с точки зрения их тематической принадлежности. Как показал анализ, собственно по электроприводу за рубежом нет ни одного периодического издания. Статьи по электроприводу публикуются в общехарактерных журналах (и в изданиях электротехнических фирм), в журналах по электронике, автоматическому регулированию и управлению, в общетехнических журналах и в большом количестве периодических изданий других отраслей.

Распределение публикаций в зарубежной периодике по тематическим областям приведено в табл. 5. Количество электротехнических журналов (79 и 77) практически одинаково и не изменилось существенно с 1964 г. Количество публикаций из этих изданий тоже довольно стабильно (222 и 230 публикаций в год) и составляет примерно 35%. Если добавить сюда публикации из фирменных изданий, то эти две группы журналов дают 45—50% иностранных статей. Количество фирменных изданий и количество публикаций в них тоже весьма стабильно, что позволяет сделать вывод о том, что мировая периодика по электротехнике достаточно полно представлена в данном выпуске и потеря информации по электроприводу из электротехнической литературы практически нет. По количеству публикаций, приходящихся на один журнал, фирменные журналы занимают первое место, второе место занимают общехарактерные журналы.

В отечественной периодике (табл. 6) самое существенное значение имеют электротехнические издания, средняя частота их использования довольно высокая, чего не наблюдается в электротехнической периодике за рубежом.

Публикации из электротехнических изданий составляют примерно 46% всех отечественных публикаций.

Таблица 4

| Периодические издания | Количество периодических изданий | | | Количество публикаций | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|---------|-------|-----------------------|------|---------|------|
| | аб. ц. | 1962 г. | | 1964 г. | | 1972 г. | |
| | | %* | %* | аб. ц. | %** | аб. ц. | %** |
| Отечественные периодические издания | 26 | 6,67 | 6,73 | 184 | 18,1 | 257 | 22,4 |
| Зарубежные периодические издания | 94 | 24,13 | 24,32 | 343 | 33,7 | 303 | 26,2 |
| Всего | 120 | 30,8 | 31,05 | 527 | 51,8 | 560 | 48,6 |

* % изданий, отнесенный к полному числу изданий за соответствующий год.

** % статей, отнесенный к полному числу статей за соответствующий год.

Таблица 5

| Характеристика издания | 1964 г. | | | | 1972 г. | | | | |
|---|----------------------------------|------|-----------------------|------|-----------------|----------------------------------|------|-----------------------|------|
| | Количество периодических изданий | | Количество публикаций | | f _{ср} | Количество периодических изданий | | Количество публикаций | |
| | аб. ц. | % | аб. ц. | % | | аб. ц. | % | аб. ц. | % |
| Общехарактерные журналы | 79 | 26,8 | 222 | 33,3 | 2,8 | 77 | 30,6 | 230 | 39,6 |
| Издания электротехнических фирм | 16 | 5,7 | 84 | 12,6 | 5,2 | 19 | 7,6 | 75 | 12,8 |
| Электроника | 10 | 3,4 | 13 | 1,9 | 1,3 | 11 | 4,4 | 14 | 2,4 |
| Автоматическое регулирование и управление | 24 | 8,3 | 73 | 10,8 | 3,2 | 15 | 6,0 | 41 | 7,0 |
| Общетехнические издания | 39 | 13,3 | 74 | 10,7 | 1,9 | 56 | 22,3 | 111 | 19,1 |
| Отраслевые издания | 104 | 34,6 | 177 | 26,5 | 1,7 | 56 | 22,3 | 86 | 14,8 |
| Прочие | 23 | 1,9 | 28 | 4,2 | 1,2 | 17 | 6,8 | 25 | 4,3 |

Таблица 6

| Характеристика издания | 1964 г. | | | | | | 1972 г. | | | | | |
|---|----------------------------------|------|-----------------------|------|-----------------|----------------------------------|---------|-----------------------|------|-----------------|--|--|
| | Количество периодических изданий | | Количество публикаций | | f _{ср} | Количество периодических изданий | | Количество публикаций | | f _{ср} | | |
| | аб. ц. | % | аб. ц. | % | | аб. ц. | % | аб. ц. | % | | | |
| Общеэлектротехнические журналы | 16 | 16,8 | 155 | 44,8 | 9,4 | 28 | 20,5 | 277 | 48,5 | 9,9 | | |
| Издания электротехнических фирм | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |
| Электроника | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | | |
| Автоматическое регулирование и управление | 7 | 7,3 | 10 | 2,9 | 1,4 | 6 | 4,4 | 13 | 2,3 | 2,2 | | |
| Общетехнические издания | 12 | 12,7 | 43 | 12,4 | 3,6 | 37 | 27,2 | 108 | 18,9 | 2,9 | | |
| Отраслевые издания | 52 | 54,8 | 128 | 37,0 | 2,8 | 61 | 45,0 | 167 | 29,2 | 2,7 | | |
| Прочие | 8 | 8,4 | 10 | 2,9 | 1,2 | 4 | 2,9 | 6 | 1,1 | 1,5 | | |

Как в отечественной, так и в зарубежной периодике самую многочисленную группу составляют общетехнические и отраслевые издания (70 и 50% соответственно); средняя частота использования этих изданий невелика ($f_{ср} \approx 3$), однако эти издания дают в выпуске по электроприводу примерно 48% отечественных публикаций и 35% зарубежных.

Географическая структура информационного потока по электроприводу. Географический охват мировой литературы в выпуске «Электропривод и автоматизация промышленных установок» очень широк; практически представлены все континенты и все технически развитые страны. Распределение периодики и патентов по странам мира приведено соответственно в табл. 7 и 8.

Максимальное количество статей приходится на периодические издания СССР — 49,5%, ФРГ — 11,7%, США — 6,2%, Японии — 5,8%, ГДР — 3,0%, Швейцарии — 2,7%.

В выпуске «Электропривод и автоматизация промышленных установок» публикуются рефераты по патентным описаниям 21 страны, патентные описания СССР составляют около 12%, максимальное

число публикаций приходится на патентные описания США, ФРГ и Японии. Удельный вес патентов Японии весьма заметен и растет из года в год; в 1972 г. японские патенты составили около 36% всей информации по патентам.

Кривые роста информационного потока по электроприводу. Важным в развитии науки является закон ее ускоренного развития. Этот процесс находит свое яркое отражение в непрерывно ускоряющемся процессе увеличения потока научной и технической информации. Исследование мирового потока научной литературы показало, что количество литературы в мире растет примерно по экспоненте, что соответствует относительной скорости роста в 5—7% в год [Л. 1—4]. Удвоение публикуемого материала по науке в целом происходит каждые 10—15 лет [Л. 1 и 3]; удвоение числа публикаций по химии происходит за 12 лет, удвоение материалов по биологии — каждые 15 лет, по физике — 10—15 лет [Л. 2], по математике — 25 лет [Л. 6]. При этом, конечно, темп роста отдельных научных направлений может меняться с течением времени в очень широких пределах: так, по данным [Л. 5] удвоение числа работ по теме «планирование экстремальных экспериментов» происходит каждые 2,4 года, по отдельным вопросам планирования эксперимента — за

Таблица 7

| Страны | 1964 г. | | | | 1972 г. | | | |
|----------------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
| | Количество источников | | Количество публикаций | | Количество источников | | Количество публикаций | |
| | аб. ц. | % |
| Австрия | 4 | 1,1 | 7 | 0,7 | 8 | 2,1 | 16 | 1,3 |
| Бельгия | 3 | 0,3 | 5 | 0,5 | 1 | 0,2 | 1 | 0,1 |
| НРБ | 4 | 1,1 | 7 | 0,7 | 8 | 2,1 | 23 | 2,1 |
| Великобритания | 41 | 10,5 | 105 | 10,3 | 28 | 7,3 | 60 | 5,2 |
| ВНР | 2 | 0,5 | 5 | 0,5 | 2 | 0,5 | 2 | 0,2 |
| ГДР | 10 | 2,7 | 30 | 2,9 | 7 | 1,8 | 34 | 3,0 |
| Индия | 3 | 0,8 | 4 | 0,4 | 3 | 0,8 | 6 | 0,5 |
| Италия | 10 | 2,7 | 19 | 1,9 | 4 | 1,0 | 7 | 0,6 |
| Канада | 6 | 1,6 | 9 | 0,9 | 6 | 1,5 | 13 | 1,1 |
| Норвегия | — | — | — | — | 2 | 0,5 | 2 | 0,2 |
| ПНР | 16 | 4,2 | 22 | 2,2 | 20 | 5,2 | 35 | 3,1 |
| СРР | 3 | 0,8 | 7 | 0,7 | 10 | 2,6 | 23 | 2,1 |
| СССР | 95 | 24,2 | 346 | 34,0 | 136 | 35,2 | 571 | 49,5 |
| СФРЮ | 1 | 0,3 | 1 | 0,1 | 5 | 1,3 | 5 | 0,4 |
| США | 56 | 14,4 | 106 | 10,4 | 37 | 9,6 | 72 | 6,2 |
| ФРГ | 58 | 14,9 | 177 | 17,3 | 46 | 11,8 | 135 | 11,7 |
| Франция | 19 | 4,9 | 29 | 2,8 | 13 | 3,3 | 17 | 1,4 |
| ЧССР | 7 | 1,8 | 11 | 1,1 | 4 | 1,0 | 13 | 1,1 |
| Швейцария | 6 | 1,6 | 18 | 1,8 | 7 | 1,8 | 31 | 2,7 |
| Швеция | 4 | 1,1 | 9 | 0,9 | 3 | 0,8 | 8 | 0,7 |
| Япония | 23 | 5,9 | 78 | 7,7 | 28 | 7,3 | 67 | 5,8 |
| Прочие | 18 | 5,2 | 22 | 2,2 | 9 | 2,3 | 12 | 1,0 |

Таблица 8

| Страны | Количество патентов | | | |
|----------------|---------------------|------|---------|-------|
| | 1964 г. | | 1972 г. | |
| | аб. ц. | % | аб. ц. | % |
| Австралия | — | — | — | — |
| Австрия | 9 | 2,2 | 1 | 0,2 |
| Бельгия | 1 | 0,2 | 2 | 0,2 |
| НРБ | — | — | 1 | 0,2 |
| Великобритания | 25 | 5,7 | 28 | 4,5 |
| ВНР | 2 | 0,5 | — | — |
| ГДР | 23 | 5,2 | 13 | 2,0 |
| Дания | 2 | 0,5 | — | — |
| Канада | — | — | — | — |
| Нидерланды | 1 | 0,2 | — | — |
| Норвегия | — | — | 1 | 0,2 |
| ПНР | 1 | 0,9 | 7 | 1,0 |
| СРР | 1 | 1,2 | 1 | 0,2 |
| СССР | 54 | 12,3 | 76 | 12,1 |
| США | 79 | 17,7 | 170 | 27,20 |
| Финляндия | — | — | — | — |
| ФРГ | 15 | 24,0 | 43 | 6,9 |
| Франция | 26 | 6,0 | 19 | 2,0 |
| ЧССР | 24 | 5,0 | 10 | 1,6 |
| Швеция | 2 | 0,5 | 6 | 0,9 |
| Япония | 59 | 13,4 | 231 | 36,8 |

Таблица 9

| Годы | 1963 | 1964 | 1965 | 1966 | 1967 | 1968 | 1969 | 1970 | 1971 | 1972 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Число публикаций | 1665 | 1624 | 1633 | 1837 | 1985 | 1915 | 1999 | 2078 | 2335 | 1953 |

1,7 года, что позволяет отнести их к числу бурно развивающихся областей науки.

Следует отметить, что большинство таких исследований проводилось на суммарных показателях обширных научных дисциплин (физики, химии, биологии и т. д.), однако не меньший интерес могут представить такие исследования и в более узких областях.

Данные числа публикаций в выпуске по электроприводу по годам приведены в табл. 9; на рис. 1 приведена опытная кривая роста числа публикаций по электроприводу в координатах «накопленная сумма числа публикаций — время». Кривая в таких координатах может с известным приближением характеризовать интенсивность роста числа публикаций в данной области и в ряде случаев аппроксимироваться простыми функциями.

В качестве аппроксимирующей функции для опытной кривой роста проверялись экспонента ($y = ae^{bx}$), прямая линия ($y = a + bx$) и степенная функция ($y = ax^b$). Как видно из рис. 1, наилучшее приближение дает степенная функция типа $y = ax^b$ с параметрами $a = 1616$ и $b = 1,056$ (параметры подсчитывались методом наименьших квадратов).

Полученная степенная функция очень близка к прямой (показатель $b = 1,056$), и при больших значениях y кривые практически совпадают. Число публикаций по электроприводу увеличивается ежегодно примерно на 2%.

Таким образом, темп роста числа публикаций в области электропривода ниже средних данных по науке в целом, т. е. имеет место несколько замедленный рост публикаций по электроприводу по сравнению с другими разделами науки. Объясняется это, по-видимому, тем, что электропривод отно-

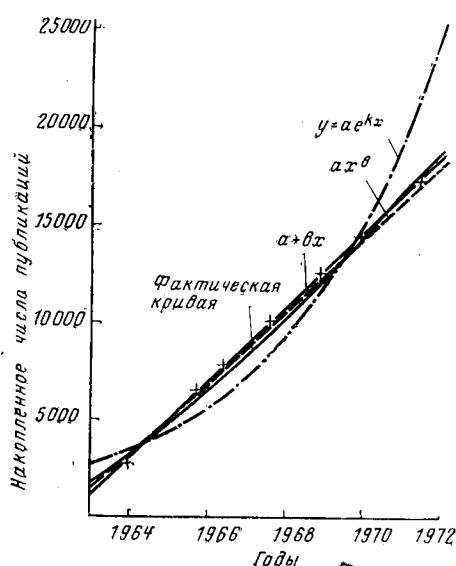


Рис. 1. Опытная кривая роста числа публикаций по электроприводу.

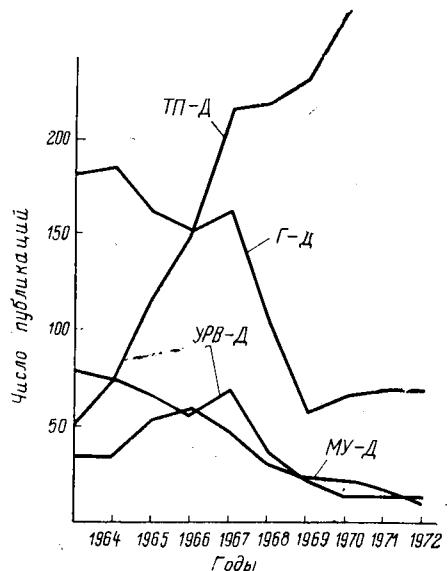


Рис. 2. Изменение числа публикаций по системам постоянного тока с преобразователями разных типов в абсолютных цифрах.

сится к разделу прикладных технических наук, которые характеризуются следующими особенностями. По мере развития естественных наук (математики, физики, механики и др.) возникают новые возможности для дальнейшего развития прикладных наук, в том числе и электропривода. Появляются новые направления в данной отрасли техники, которые интенсивно развиваются и обусловливают бурный рост информации. Вместе с тем, интерес к старым направлениям начинает ослабевать, и поток информации по ним падает. В результате рост информации в целом по данному разделу прикладных наук хотя и будет продолжать расти, но значительно медленнее, чем по естественным наукам. У последних наряду с возникновением новых направлений старые направления обычно продолжают развиваться, т. е. имеют более длительные сроки существования.

Таким образом, отдельные направления в области электропривода могут интенсивно развиваться, а другие — отмирать. Статистический анализ числа публикаций не только позволяет получить усредненные показатели по электроприводу в целом, но и в сочетании с качественным анализом проследить динамику числа публикаций по определенной тематике и установить перспективные направления разработок в этой области на некоторый отрезок времени.

Типичным примером в этом отношении являются системы регулируемого электропривода, использующие в силовой цепи преобразователи разных типов.

Даже в такой исторически небольшой период как 10 лет совершенно отчетливо видна современная тенденция замены электромашинных и электромагнитных преобразователей на полупроводниковые (ПП); если в 1963 г. во всем годовом комплекте Реферативного журнала насчитывалось несколько десятков публикаций по системам с ПП-преобразователем (с двигателями постоянного и переменного тока), то в 1972 г. публикации по этим системам

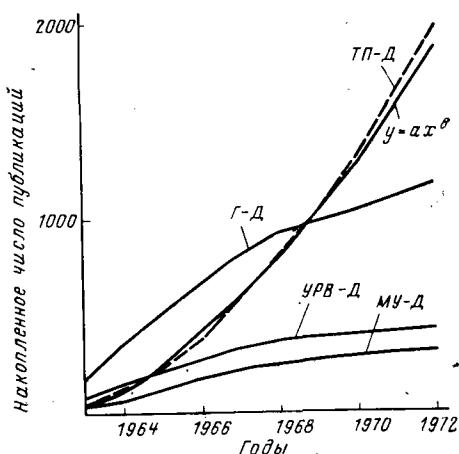


Рис. 3. Кривые роста числа публикаций по системе постоянного тока с преобразователями разных типов.

составили 47% всех публикаций по приводу.

Как уже было отмечено, эта тенденция видна на примере изменения числа публикаций по системам с двигателем постоянного тока. На рис. 2 приведены данные по системам постоянного тока с преобразователями разных типов в абсолютных цифрах, а на рис. 3 — кривые роста числа публикаций по этим системам. Как следует из рис. 3, интенсивно растет число публикаций по системам с полупроводниковыми преобразователями; кривая роста аппроксимируется степенной функцией $y = ax^b$ с параметрами $a = 44,37$ и $b = 1,6302$. Темпы роста числа публикаций по другим системам с двигателями постоянного тока (системы Г-Д, УРВ-Д, МУ-Д) заметно ниже, а характер кривых соответствует логистическим кривым.

Число статей по тиристорному приводу постоянного тока за десятилетие выросло в 6,5 раза при общем увеличении числа публикаций по приводу постоянного тока в 1,25 раза и в 1972 г. составило 54,5% всех материалов по приводам с двигателем постоянного тока. Кривая роста явно еще не достигла своего максимума, и замедления темпа роста нет.

Интерес к системам УРВ-Д и МУ-Д резко снизился, эти материалы в последние годы состав-

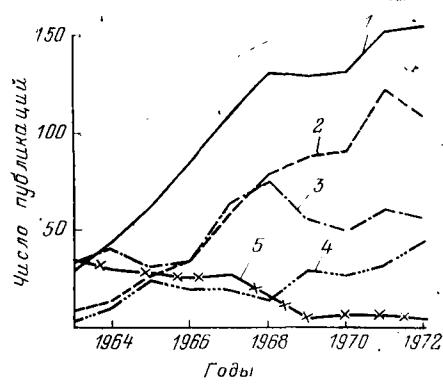


Рис. 4. Данные по системам электропривода с асинхронными и синхронными двигателями в абсолютных цифрах.

1 — АД с частотным управлением; 2 — АД с фазовым и импульсным управлением; 3 — асинхронно-вентильный каскад; 4 — СД с частотным управлением; 5 — АД с дроссельным управлением.

ляют соответственно 2,5 и 1,8% всех публикаций по приводам постоянного тока. В литературе последних лет описываются уже действующие установки — в основном результаты эксплуатации, новых теоретических разработок нет.

Заметно уменьшилось число публикаций по системе Г-Д; публикуются в основном материалы по системам автоматического управления с помощью ЦВМ либо результаты эксплуатации. В последнее время появились статьи о применении тиристоров в цепях возбуждения системы Г-Д (на рис. 3 хорошо виден некоторый подъем кривой роста).

Публикации 1970—1972 гг. свидетельствуют о том, что преобладающей системой привода постоянного тока, разрабатываемой для новых установок, является система тиристорного привода; из двух ее модификаций — системы с ШИМ и с фазовым управлением — значительно большее количество публикаций посвящено последней. Системы с тиристорными преобразователями все больше вытесняют системы Г-Д и МУ-Д, не говоря уже о системах ионного привода.

На рис. 4 приведены данные по системам электропривода с асинхронными и синхронными двигателями в абсолютных цифрах, а на рис. 5 — кривые роста для этих систем. Как следует из рис. 5, темпы роста числа публикаций по асинхронным приводам с частотным управлением, а также с фазовым и импульсным управлением высок; за период с 1963 по 1972 гг. число публикаций в год по этим системам увеличилось примерно в 7 раз при общем увеличении числа публикаций по асинхронному приводу за тот же период в 1,8 раза. В 1971—1972 гг. доля публикаций по системам асинхронного привода с полупроводниковыми преобразователями составила 42%. Никакого замедления темпов роста нет.

Как и для систем постоянного тока, кривые роста числа публикаций по развивающимся системам аппроксимируются степенными функциями типа $y = ax^b$ (асинхронный и синхронные двигатели с частотным управлением, асинхронный двигатель с фазовым и импульсным управлением) и логистическими кривыми для систем, интерес к которым падает

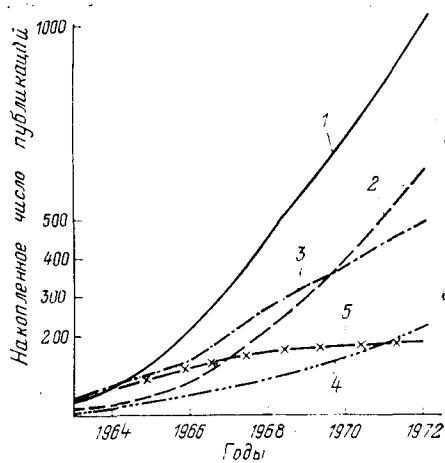


Рис. 5. Кривые роста числа публикаций для систем электропривода с асинхронными и синхронными двигателями.

1 — АД с частотным управлением; 2 — АД с фазовым и импульсным управлением; 3 — асинхронно-вентильный каскад; 4 — СД с частотным управлением; 5 — АД с дроссельным управлением.

(например, асинхронный двигатель с дроссельным управлением). Показатели a и b для кривой роста числа публикаций по асинхронному двигателю с частотным управлением составляют соответственно 25,9 и 1,59; по синхронному двигателю — 3,76 и 1,82.

В кривой роста публикаций по приводам с асинхронно-вентильными каскадами (кривая 3, рис. 4) заметно замедление темпов роста, при этом число публикаций по указанным каскадам составляет 8% всех публикаций по асинхронному электроприводу.

Увеличивается доля публикаций по системам синхронного привода с частотным управлением, но в абсолютных цифрах число этих материалов незначительно. Объясняется это, по-видимому, тем, что синхронные двигатели, особенно малой и средней мощности, получили лишь ограниченное применение для привода производственных машин, и только в последнее время в связи с развитием полупроводниковой техники интерес к ним возрос.

Кривые роста числа публикаций по вентильному (ВД), шаговому (ШД) и линейному двигателям (ЛД) и их применению в системах промышленного привода и на транспорте даны на рис. 6. По характеру кривых роста они все могут быть отнесены к развивающимся системам: системы с шаговыми и вентильными двигателями описываются степенными функциями со значениями параметров соответственно $a=14,7$; $b=1,75$ и $a=11,9$; $b=2,11$. Число публикаций по системам с линейными двигателями растет по экспоненте с параметрами $a=11,9$; $k=-0,382$. В последние два года заметно некоторое замедление темпов роста по шаговому двигателю (теоретическая кривая проходит выше опытной).

Хотя в абсолютных цифрах число публикаций по вентильному двигателю и меньше, чем по шаговому, но темп их роста выше.

Самые высокие темпы роста имеет кривая по системам с линейными двигателями, никакого замедления темпов роста пока незаметно, что дает основания полагать, что эта тенденция сохранится и на ближайшие годы.

Выводы. 1. Отличительной чертой информационного потока по электроприводу является большое рассеяние статей этой тематики по большому количеству электротехнических, общетехнических и отраслевых изданий. Частота использования журналов в общем очень низкая (менее трех). Из 380—400 периодических изданий (более 30 стран), проходящих ежегодно через реферативный журнал по электроприводу, постоянную часть составляют только 100 журналов; остальная часть журналов из года в год частично или полностью меняется; эти журналы дают примерно 48% всех статей в реферативный журнал.

2. Тематическая периодика, проходящая через выпуск «Электропривод и автоматизация промышленных установок», может быть поделена на издания электротехнические (сюда относятся и издания электротехнических фирм), издания по электронике и автоматическому управлению, издания общетехнические и отраслевые. Электротехнические издания, составляя 30% общего количества периодических изданий, дают только 45—50% публикаций; примерно 40% публикаций дают общетехнические и отраслевые журналы, которые в количественном

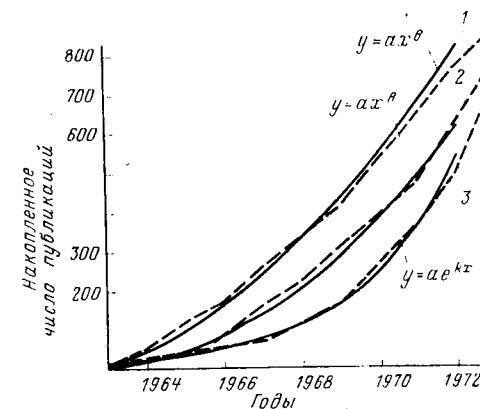


Рис. 6. Кривые роста числа публикаций по шаговому, вентильному и линейному двигателям.

1 — ШД и системы электропривода с ШД; 2 — ВД и системы электропривода с ВД; 3 — ЛД и системы электропривода с ЛД в промышленности и на транспорте.

отношении составляют более 50% всех периодических изданий. Недоучет этого обстоятельства может привести к значительным потерям информации.

3. Кривые роста по развивающимся системам описываются степенными функциями типа $y=ax^b$ или экспонентами $y=ae^{kx}$ с разными значениями показателя $b(k)$. Величина показателя отражает степень интереса к данной теме в мировой литературе. Поэтому кривые роста могут быть использованы при прогнозировании развития данной области техники.

4. Статистический анализ публикаций по электроприводу выделяет в качестве главной линии развития электропривода использование полупроводниковых преобразователей в системах привода постоянного и переменного тока; число публикаций по этим системам из года в год заметно растет.

В мировой литературе по электроприводу публикации по тиристорному приводу постоянного тока почти полностью вытеснили материалы по системам МУ—Д и УРВ—Д; значительно уменьшилось число публикаций по системе Г—Д. На ближайшие годы эта тенденция, по-видимому, сохранится.

В приводе переменного тока активно ведутся разработки в области тиристорного управления асинхронными и синхронными двигателями. За последние годы особенно заметно увеличилось число публикаций (при высоком темпе их роста) по системам с вентильными и линейными двигателями, и эта тенденция представляется весьма устойчивой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Налимов В. В., Мульченко З. М. Наукометрия. М., «Наука», 1969.
2. Glass B. Information Crisis Biology.—«Bull. Atomic Scientist», 1962, 18, № 8.
3. Прайс Д. Малая наука, большая наука.—В кн.: Наука о науке. М., «Прогресс», 1966.
4. Влэдущ Г. Э., Налимов В. В., Стяжкин Н. И. Научная и техническая информация как одна из задач кибернетики.—«Успехи физических наук», 69, 13 (1959).
5. Адлер Ю. П., Грановский Ю. В., Мульченко З. М. Статистический анализ публикаций по планированию эксперимента.—В кн.: Новые идеи в планировании эксперимента. М., «Наука», 1969.
6. Новый Л., Фольта Я. О применении количественных методов в исследовании по истории математики.—В кн.: Анализ тенденций и прогнозирование научно-технического прогресса. Киев, «Наукова думка», 1967.

[27.12.1973]

Общий анализ двухдвигательного электропривода

ОРЛОВ И. Н.

Московский энергетический институт

В ряде случаев, например для привода ротора гироскопа, применяется двухдвигательный электропривод, включающий две машины, работающие на общий вал. Двухдвигательный симметричный гирузел позволяет, в частности, обеспечить монолитность, достаточную жесткость и стабильность вращающейся маховой массы, более равномерное распределение тепла по объему и удовлетворяет многим требованиям прецизионной гироскопии.

Однако, по крайней мере, технологический разброс параметров двигателей при заданных допусках приводит к неравномерному распределению нагрузки между ними, к энергетической и тепловой несимметрии и пр. Анализ работы двухдвигательного каскада представляет поэтому актуальную задачу. Такой анализ целесообразно осуществить на основе обобщенной модели электрической машины [Л. 1 и 2]. Идеализация модели (отсутствие насыщения, синусоидальность кривых потоков и намаг-

уравнение электрического равновесия контура возбуждения вырождается и может не рассматриваться. В модели (см. рисунок) используются тогда пары обмоток на статоре (w_{d1} и w_{q1}) и пары обмоток на роторе (w_{d2} и w_{q2}). Обмотки размещены по осям \bar{d} и \bar{q} , сцепленными с телом ротора, совпадающими с его осями симметрии и вращающимися с его угловой скоростью Ω_3 .

На основе указанной модели могут быть проанализированы, как частные случаи, различные типы электродвигателей — асинхронные (АД), синхронные с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) явно- или неявнополюсного исполнения, реактивные (СРД). В общем случае питание модели может быть регулируемым по частоте и напряжению.

Полная система уравнений электрического равновесия обобщенного двигателя в операторной форме будет иметь вид [Л. 2]¹:

$$\begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} \\ u_{d2} \\ u_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + pL_{d1} & -L_{q1}\Omega_3 & pM_{d1} & -M_{q1}\Omega_3 \\ L_{d1}\Omega_3 & r_1 + pL_{q1} & M_{d1}\Omega_3 & pM_{q1} \\ pM_{d1} & & r_{d2} + pL_{d2} & \\ pM_{q1} & & & r_{q2} + pL_{q2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \\ I_{m0} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

ничивающих сил, гладкий воздушный зазор и пр.) является общепринятой и в классической теории машин и не сужает существенно использование результатов проводимого здесь анализа. Ограничимся рассмотрением привода переменного тока при синусоидальном и симметричном питании, хотя принципиально можно учесть и отклонение от этих условий.

Применительно к микромашинам обобщенная модель представляет эквивалентный двухфазный явнополюсный синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, снабженный пусковой клеткой. Контур возбуждения при этом заменяется эквивалентной обмоткой без потерь, включенной на источник постоянного тока I_{m0} (пропорционального условной н. с. магнита). При этом

где u_{d1}, \dots, u_{q2} ; i_{d1}, \dots, i_{q2} — напряжения и токи соответствующих обмоток по осям \bar{d} и \bar{q} статора и ротора; r_1, r_{d2}, r_{q2} ; $L_{d1}, L_{q1}, L_{d2}, L_{q2}$ — активные сопротивления и полные индуктивности обмоток; M_{d1}, M_{d2}, M_{d22} — взаимные индуктивности обмоток, размещенных на оси \bar{d} (соответственно между w_{d1} и w_{d2} , между w_{d1} и контуром постоянного магнита и между последним и обмоткой w_{d2}); M_{q1}, M_{q2}, M_{q22} — то же, но для обмоток поперечной оси \bar{q} .

В дальнейшем дополнительные индексы ' и '' будут отличать параметры и показатели I и II машин двухдвигательного привода.

¹ Учет поперечной оси магнита в (1) необходим в общем случае анализа двух машин при наличии пространственного сдвига их осей ($\Delta\gamma \neq 0$).

$$\begin{bmatrix} u'_{d1} \\ u'_{q1} \\ u'_{d2} \\ u'_{q2} \\ u''_{d1} \\ u''_{q1} \\ u''_{d2} \\ u''_{q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{1d} & Z'_{1dq} & Z'_{12d} & Z'_{12dq} & Z'_{122d} & Z'_{122dq} & & & & & & \\ Z'_{1qd} & Z'_{1q} & Z'_{12qd} & Z'_{12q} & Z'_{122qd} & Z'_{122q} & & & & & & \\ Z'_{21d} & & Z'_{2d} & & Z'_{22d} & & & & & & & \\ & Z'_{21q} & & Z'_{2q} & & Z'_{22q} & & & & & & \\ & & & & & Z''_{1d} & Z''_{1dq} & Z''_{12d} & Z''_{12dq} & Z''_{122d} & Z''_{122dq} & \\ & & & & & Z''_{1qa} & Z''_{1q} & Z''_{12qd} & Z''_{12q} & Z''_{122qd} & Z''_{122q} & \\ & & & & & Z''_{21d} & & Z''_{2d} & & Z''_{22d} & & \\ & & & & & & Z''_{21q} & & Z''_{2q} & & Z''_{22q} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{d1} \\ i'_{q1} \\ i'_{d2} \\ i'_{q2} \\ I'_{m0} \\ 0 \\ i''_{d1} \\ i''_{q1} \\ i''_{d2} \\ i''_{q2} \\ I''_{m0} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Общее матричное уравнение электрического равновесия для двухдвигательного каскада без учета соединения обмоток имеет при этом вид (2) (здесь для сокращения записи элементы матрицы сопротивлений Z по уравнению (1) обозначены через Z с соответствующими индексами).

В общем случае оси одного (\bar{d}' , \bar{q}') и другого (\bar{d}'' , \bar{q}'') двигателей не совпадают и имеют пространственный сдвиг $\Delta\gamma = \gamma' - \gamma''(\Delta\theta)$ (см. рисунок) из-за различия в относительном расположении ротора и статора по технологическим причинам. Практически этот сдвиг отсутствует, однако, в неявнополюсных СДПМ, намагничивание роторов которых осуществляется «в сборе» обмоткой статора, в гистерезисных и асинхронных двигателях.

Составляющие напряжения статора u_{d1} и u_{q1} могут быть выражены через напряжения u_{a1} и u_{b1} , приложенные к реальным фазным обмоткам статора w_{a1} и w_{b1} двигателя, как функции угла γ (зависящего от времени t) между неподвижной осью \bar{a}_1 обмотки w_{a1} и подвижной осью \bar{d} :

$$\gamma = \Omega_0 t + \gamma_0 = \omega_0(1-s)t + \gamma_0,$$

где ω_0 — скорость поля; $s = (\omega_0 - \Omega_0)/\omega_0$ — скольжение. Например, при $\Delta\gamma \neq 0$

$$\left. \begin{aligned} u''_{d1} &= u''_{a1} \cos \gamma'' + u''_{b1} \sin \gamma'' = \\ &= (u''_{a1} \cos \gamma' + u''_{b1} \sin \gamma') \cos \Delta\gamma - \\ &\quad - (-u''_{a1} \sin \gamma' + u''_{b1} \cos \gamma') \sin \Delta\gamma; \\ u''_{q1} &= (-u''_{a1} \sin \gamma' + u''_{b1} \cos \gamma') \cos \Delta\gamma + \\ &\quad + (u''_{a1} \cos \gamma' + u''_{b1} \sin \gamma') \sin \Delta\gamma. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При анализе синхронных двигателей принято, как известно, оперировать с углом $\theta = \omega_0 st + \theta_0$ между вектором результирующего напряжения статора \bar{U}_1 и поперечной осью \bar{q} , с направлением которой совпадает вектор э. д. с. холостого хода \bar{E}_0 . При этом для двигателя II

$$\left. \begin{aligned} u''_{d1} &= -U'', \sin \theta'', = -U'', \cos \Delta\theta \sin \theta' - \\ &\quad - U'', \sin \Delta\theta \cos \theta'; \\ u''_{q1} &= U'', \cos \theta'', = U'', \cos \Delta\theta \cos \theta' - \\ &\quad - U'', \sin \Delta\theta \sin \theta', \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

так как $\theta'' = \theta' + \Delta\theta$ (причем $\Delta\theta = \Delta\gamma$ — см. рисунок).

Движение привода описывается уравнением:

$$J \frac{d\Omega_0}{dt} = 10^5 p_0 (M_3 - M_c), \quad (5)$$

где J , $\text{г}\cdot\text{см}^2$ — момент инерции вращающихся частей; M_c , $\text{н}\cdot\text{см}$ — момент сопротивления, приложенный к валу каскада.

Выражение для электромагнитного момента M_3 -фазной машины с числом пар полюсов p_0 имеет вид:

$$M_3 = \frac{m_1}{2} p_0 10^2 (\tilde{i}_t \tilde{G} \tilde{i}), \quad \text{н}\cdot\text{см}, \quad (6)$$

где \tilde{i}_t — транспонированная матрица токов; G — матрица коэффициента момента, включающая элементы матрицы сопротивления Z [вида (2)], содержащие скорость вращения Ω_0 .

Уравнения (2), (5) и (6) однозначно определяют поведение двухдвигательного привода в общем

случае как в динамических, так и в установившихся режимах. Конкретный вид их определяется типом используемых двигателей, а также способом соединения обмоток статора.

Параллельное соединение. В общем случае при $\Delta\gamma(\Delta\theta) \neq 0$ соединение реальных обмоток статоров не может быть непосредственно перенесено на их преобразованные контуры, так как $u_{d1}' \neq u_{d1}''$, $u_{q1}' \neq u_{q1}''$. Общую форму записи уравнений двухдвигательного привода при параллельном соединении получим из (2), используя, что здесь при $u_{a1}' = u_{a1}''$ и $u_{b1}' = u_{b1}''$ (т. е. $U_1' = U_1''$) из (3) и (4) следует:

$$\left. \begin{aligned} u''_{d1} &= u'_{d1} \cos \Delta\theta - u'_{q1} \sin \Delta\theta; \\ u''_{q1} &= u'_{d1} \sin \Delta\theta + u'_{q1} \cos \Delta\theta. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Проведем анализ привода, ограничившись лишь установившимся режимом.

Для АД с короткозамкнутым ротором $u_{d2} = u_{q2} = 0$, $I_{m0} = 0$, а элементы исходной матрицы Z могут быть выражены через общепринятые параметры схемы замещения и в силу симметрии:

$$L_{d1} = L_{q1} = \frac{x_1 + x_m}{\omega_0}; \quad L_{d2} = L_{q2} = \frac{x_2 + x_m}{\omega_0};$$

$$M_{d1} = M_{q1} = x_m / \omega_0; \quad r_{d2} = r_{q2} = r_2.$$

Для установившегося режима оператор $p = j\omega_0 s$, а значения ω_0 , Ω_0 и s являются одинаковыми для двигателей I и II.

Если одновременно перейти к комплексным уравнениям [Л. 2], то для асинхронного привода получим:

$$\begin{aligned} & \frac{jU_1 e^{j(\omega_0 st + \theta_0')}}{jU_1 e^{j(\omega_0 st + \theta_0')}} = \\ &= \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline r'_1 + j(x'_1 + x'_m) & jx'_m & & \\ \hline jx'_m s & r'_2 + j(x'_2 + x'_m) & & \\ \hline & & r''_1 + j(x''_1 + x''_m) & jx''_m \\ \hline & & jx''_m s & r''_2 + j(x''_2 + x''_m) \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline I'_1 \\ \hline I'_2 \\ \hline j''_1 \\ \hline j''_2 \\ \hline \end{array} \quad (8) \end{aligned}$$

На основе (8) и (6) (учтя лишь особенности записи последнего при комплексных элементах матрицы) получим, что результирующий момент является суммой моментов, развивающихся каждым из

двигателей:

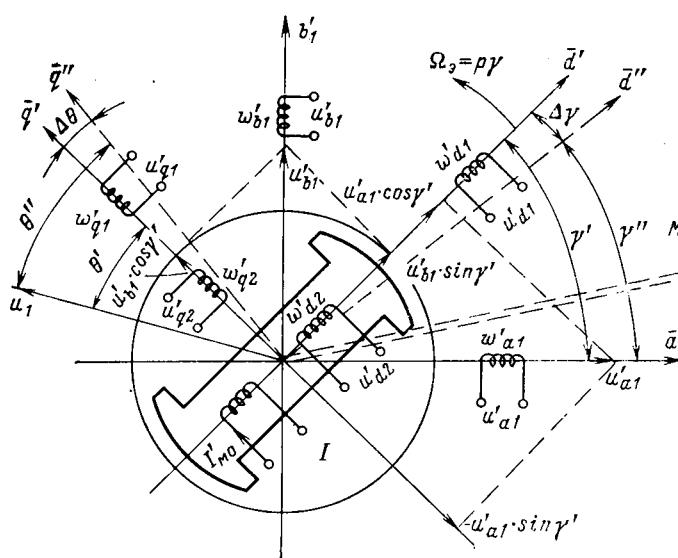
$$\begin{aligned}
 M_a &= \frac{m_1}{2} p_0 10^2 \operatorname{Re} [\tilde{I}_t \tilde{G} I] = \\
 &= \frac{m_1 p_0}{\omega_0} 10^2 \{ x'_{\text{m}} \operatorname{Re} [j \tilde{I}'_1 \tilde{I}'_2] + x''_{\text{m}} \operatorname{Re} [j \tilde{I}''_1 \tilde{I}''_2] \} = \\
 &= M'_a + M''_a = \frac{m_1 U_1^2}{\Omega_c s} 10^2 \left[\frac{r'_2}{\left(r'_1 + c'_1 \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x'_1 + c'_1 x'_2)^2} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{r''_2}{\left(r''_1 + c''_1 \frac{r''_2}{s} \right)^2 + (x''_1 + c''_1 x''_2)^2} \right]. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Анализ несимметрии нагрузки и энергетических показателей при различии параметров двигателей, определяемом технологическими полями допусков, представляет при практической постановке статическую задачу и может быть выполнен с помощью ЦВМ.

Для СДПМ в синхронном установившемся режиме $\Omega_a = \omega_0$ и $p = 0$. Выразив коэффициенты само- и взаимоиндукции через общепринятые индуктивные сопротивления $L_{d1} = x_d/\omega_0$, $L_{q1} = x_q/\omega_0$; $M_{d2} = \frac{x_{\text{adm}}}{\omega_0}$

(x_{adm} — индуктивное сопротивление взаимоиндукции обмотки якоря и магнита по продольной оси), из (2) получим уравнение привода при параллельном соединении обмоток:

$$\begin{bmatrix} -U_1 \sin \theta'_0 \\ U_1 \cos \theta'_0 \\ -U_1 \sin(\theta'_0 + \Delta\theta) \\ U_1 \cos(\theta'_0 + \Delta\theta) \end{bmatrix} =$$



$$= \begin{bmatrix} r'_1 & -x'_{\text{q}} & & & & \\ x'_d & r'_1 & x'_{\text{adm}} & & & \\ & & & r''_1 & -x''_{\text{q}} & \\ & & & x''_d & r''_1 & x''_{\text{adm}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_{d1} \\ I'_{q1} \\ I'_{m0} \\ I''_{d1} \\ I''_{q1} \\ I''_{m0} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Для неянополюсного СДПМ ($L_{d1} = L_{q1} = L_c$; $x_d = x_q = x_c$) выражение для результирующего момента из (6) и (10) примет вид:

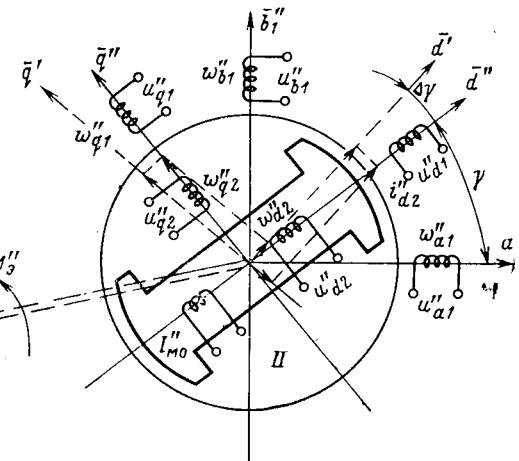
$$\begin{aligned}
 M_a &= \frac{m_1}{\Omega_c} 10^2 [E'_0 I'_{q1} + E''_0 I''_{q1}] = M'_a + M''_a = \\
 &= \frac{m_1}{\Omega_c} 10^2 \left[\frac{U_1 E'_0 r'_1 \cos \theta'_0 + U_1 E'_0 x'_c \sin \theta'_0 - (E'_0)^2 r'_1}{(x'_c)^2 + (r'_1)^2} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{U_1 E''_0 r''_1 \cos(\theta'_0 + \Delta\theta) + U_1 E''_0 x''_c \sin(\theta'_0 + \Delta\theta) - (E''_0)^2 r''_1}{(x''_c)^2 + (r''_1)^2} \right], \quad (11)
 \end{aligned}$$

где $E'_0 = I_{m0} x_{\text{adm}}$, $E''_0 = I_{m0} x_{\text{adm}}$ — э. д. с. холостого хода; Ω_c — синхронная скорость вращения.

На основе соотношений для частотно-регулируемого СДПМ может быть также проведен при условии $\theta_0 = \text{const}$ анализ привода с так называемым бесконтактным двигателем постоянного тока.

Последовательное соединение. Здесь $i_{a1}' = i_{a1}'' = i_{a1}$, $i_{b1}' = i_{b1}'' = i_{b1}$. При $\gamma = 0$: $i_{d1}'' = i_{d1}'$; $i_{q1}'' = i_{q1}'$ и соединение реальных обмоток может быть перенесено и на преобразованные контуры. В общем случае ($\Delta\gamma \neq 0$) из уравнений вида (3), записанных для токов, получим:

$$\begin{aligned}
 i''_{d1} &= i'_{d1} \cos \Delta\gamma - i'_{q1} \sin \Delta\gamma; \\
 i''_{q1} &= i'_{d1} \sin \Delta\gamma + i'_{q1} \cos \Delta\gamma. \quad \} \quad (12)
 \end{aligned}$$



Преобразование (12) не только учитывает соединение обмоток, но и означает приведение контуров статора двигателя II к осям \bar{d}' , \bar{q}' , относительно которых ведется отсчет углов при анализе каскада в целом. По сути это приведение осуществлялось и при рассмотрении параллельного соединения. Но переход к общим осям означает также и необходимость соответствующих преобразований токов и напряжений ротора двигателя II, ранее выраженных в собственных осях \bar{d}'' , \bar{q}'' . Нетрудно получить (см. рисунок) ²:

$$\left. \begin{aligned} i''_{d2(n)} &= i''_{d2} \cos \Delta\gamma + i''_{q2} \sin \Delta\gamma; \\ I''_{m0d(n)} &= I''_{m0} \cos \Delta\gamma; \\ i''_{q2(n)} &= -i''_{d2} \sin \Delta\gamma + i''_{q2} \cos \Delta\gamma; \\ I''_{m0q(n)} &= -I''_{m0} \sin \Delta\gamma. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Соотношения, аналогичные (13), будут справедливы и для напряжений $u_{d1(n)}''$ и $u_{q1(n)}''$ статора двигателя II. Все же величины, относящиеся к двигателю I, при этом, естественно, не преобразуются.

Матрица преобразования \bar{C} , связывающая результирующие векторы тока в исходной — \bar{i} [по (2)] и в новой системе координат — $\bar{i}_{(n)}$ (при этом $\bar{i} = \bar{C}\bar{i}_{(n)}$) может быть записана в виде (14).

Полученная из (14) транспонированная матрица \bar{C}_t , как нетрудно убедиться, является матрицей преобразования результирующего вектора напряжения: $\bar{u}_{(n)} = \bar{C}_t \bar{u}$. В этих условиях преобразование исходной матрицы сопротивления \bar{Z} по (2) производится в виде $\bar{C}_t \bar{Z} \bar{C}$ [Л. 1] и в результате полное уравнение двухдвигательного привода при последовательном соединении примет вид (15) (см. стр. 46).

Для установившегося режима каскада с АД при последовательном соединении из (15), перейдя к комплексным уравнениям, получим формулу (16).

Характерно, что в силу симметрии АД его уравнения не зависят от наличия сдвига $\Delta\gamma(\Delta\theta)$ и их можно проще получить, приняв в матрицах \bar{C} и \bar{C}_t $\Delta\gamma = 0$.

Момент при последовательном соединении АД выражается в общем виде так же, как и прежде, однако его связь с параметрами будет иная, чем по (9). В случае запуска с постоянным током его

$\bar{C} =$

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline & 1 & & & & & & & & & & \\ \hline & & 1 & & & & & & & & & \\ \hline & & & 1 & & & & & & & & \\ \hline & & & & 1 & & & & & & & \\ \hline & & & & & 1 & & & & & & \\ \hline & & & & & & 1 & & & & & \\ \hline & & & & & & & 1 & & & & \\ \hline & & & & & & & & 1 & & & \\ \hline & & & & & & & & & 1 & & \\ \hline & & & & & & & & & & 1 & \\ \hline & & & & & & & & & & & \\ \hline \end{array} \quad (14)$$

можно выразить в виде:

$$M_3 = M'_{33} + M''_{33} = \frac{m_1}{Q_{cs}} 10^2 I_1^2 \left[\frac{(x'_m)^2 r'_2}{(r'_2/s)^2 + (x'_2 + x'_m)^2} + \frac{(x''_m)^2 r''_2}{(r''_2/s)^2 + (x''_2 + x''_m)^2} \right]. \quad (17)$$

Для установившегося синхронного режима каскада с неявнополюсным СДПМ из (15) можно получить:

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline -U_1 \sin \theta' & r_{1\Sigma} & -x_{c\Sigma} & & & -x''_{adm} \\ \hline U_1 \cos \theta' & x_{c\Sigma} & r_{1\Sigma} & x'_{adm} & x''_{adm} & \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|c|c|c|} \hline I_{d1} & & & & \\ \hline I_{q1} & & & & \\ \hline I'_{m0} & & & & \\ \hline I''_{m0} \cos \Delta\theta & & & & \\ \hline -I''_{m0} \sin \Delta\theta & & & & \\ \hline \end{array}, \quad (18)$$

где $r_{1\Sigma} = r'_1 + r''_1$, а $x_{c\Sigma} = x'_c + x''_c$.

$$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline jU_1 e^{j(\omega_0 st + \theta_0)} & (r'_1 + r''_1) + j[(x'_1 + x''_1) + & jx'_m & jx''_m & I_1 & \\ \hline & + (x'_m + x''_m)] & r'_2 + js(x'_2 + x'_m) & r''_2 + js(x''_2 + x''_m) & I'_2 & \\ \hline & jsx'_m & & & & \\ \hline & jsx''_m & & & & \\ \hline \end{array} \quad (16)$$

² Индекс (n) обозначает величины двигателя II, выраженные в новой — общей для всего каскада — системе координат.

нат. Для обмоток статора связь «новых» токов ($i''_{d1n} = i'_{d1} = i_{d1}$; $i''_{q1n} = i'_{q1} = i_{q1}$) и токов i''_{d1} , i''_{q1} , выраженных в исходных координатах \bar{d}'' , \bar{q}'' , определяется уже рассмотренным уравнением (12).

| | | | | | |
|--|--|--|---|--|--|
| $U_1 \sin \theta'$ | $Z'_{14} + \frac{1}{2} (Z''_{1dq} + Z''_{1qd}) \times \sin 2\Delta\theta + Z''_{1d} \cos^2 \Delta\theta + Z''_{1q} \sin^2 \Delta\theta$ | $Z'_{1dq} + \frac{1}{2} (Z''_{1q} - Z''_{1d}) \times \sin 2\Delta\theta + Z''_{1dq} \cos^2 \Delta\theta - Z''_{1qd} \sin^2 \Delta\theta$ | Z'_{12d} | Z'_{12dq} | $Z''_{12d} \cos^2 \Delta\theta + Z''_{12q} \sin^2 \Delta\theta + \frac{1}{2} (Z''_{12dq} + Z''_{12qd}) \sin 2\Delta\theta$ |
| $U_1 \cos \theta'$ | $Z'_{1qd} + \frac{1}{2} (Z''_{1q} - Z''_{1d}) \times \sin 2\Delta\theta + Z''_{1qd} \cos^2 \Delta\theta - Z''_{1dq} \sin^2 \Delta\theta$ | $Z'_{1q} - \frac{1}{2} (Z''_{1dq} - Z''_{1qd}) \times \sin 2\Delta\theta + Z''_{1d} \sin^2 \Delta\theta + Z''_{1q} \cos^2 \Delta\theta$ | Z'_{12qd} | Z'_{12q} | $Z''_{12qd} \cos^2 \Delta\theta - Z''_{12q} \sin^2 \Delta\theta + \frac{1}{2} (Z''_{12q} - Z''_{12d}) \sin 2\Delta\theta$ |
| u'_{d2} | Z'_{21d} | | Z'_{2d} | | |
| u'_{q2} | | Z'_{21q} | Z'_{2q} | | |
| $u'_{d2} \cos \Delta\theta + u'_{q2} \sin \Delta\theta$ | $Z''_{21d} \cos^2 \Delta\theta + Z''_{21q} \sin^2 \Delta\theta$ | $\frac{1}{2} (Z''_{21q} - Z''_{21d}) \sin 2\Delta\theta$ | | | $Z''_{2d} \cos^2 \Delta\theta + Z''_{2q} \sin^2 \Delta\theta$ |
| $-u'_{d2} \sin \Delta\theta + u'_{q2} \cos \Delta\theta$ | $\frac{1}{2} (Z''_{21q} - Z''_{21d}) \sin 2\Delta\theta$ | $Z''_{21d} \sin^2 \Delta\theta + Z''_{21q} \cos^2 \Delta\theta$ | | | $\frac{1}{2} (Z''_{2q} - Z''_{2d}) \sin 2\Delta\theta$ |
| $Z''_{12dq} \cos^2 \Delta\theta - Z''_{12qd} \sin^2 \Delta\theta + \frac{1}{2} (Z''_{12q} - Z''_{12d}) \sin 2\Delta\theta$ | Z'_{122d} | Z'_{122dq} | $Z''_{122d} \cos^2 \Delta\theta + Z''_{122q} \sin^2 \Delta\theta + \frac{1}{2} (Z''_{122dq} + Z''_{122qd}) \times \sin 2\Delta\theta$ | $Z''_{122dq} \cos^2 \Delta\theta - Z''_{122qd} \sin^2 \Delta\theta + \frac{1}{2} (Z''_{122q} - Z''_{122d}) \sin 2\Delta\theta$ | i_{d1} |
| $Z''_{12d} \sin^2 \Delta\theta + Z''_{12q} \cos^2 \Delta\theta - \frac{1}{2} (Z''_{12dq} - Z''_{12qd}) \sin 2\Delta\theta$ | Z'_{122qd} | Z'_{122q} | $Z''_{122qd} \cos^2 \Delta\theta - Z''_{122dq} \sin^2 \Delta\theta + \frac{1}{2} (Z''_{122q} - Z''_{122d}) \times \sin 2\Delta\theta$ | $Z''_{122d} \sin^2 \Delta\theta + Z''_{122q} \cos^2 \Delta\theta - \frac{1}{2} (Z''_{122dq} + Z''_{122qd}) \sin 2\Delta\theta$ | i_{q1} |
| $\frac{1}{2} (Z''_{2q} - Z''_{2d}) \sin 2\Delta\theta$ | | Z'_{22d} | | | i'_{d2} |
| $Z''_{2d} \sin^2 \Delta\theta + Z''_{2q} \cos^2 \Delta\theta$ | | Z'_{22q} | | | i'_{q2} |
| | | | | | $i''_{d2(n)}$ |
| | | | | | $i''_{q2(n)}$ |
| | | | | | I'_{m0} |
| | | | | | 0 |
| | | | | | $I''_{mod(n)}$ |
| | | | | | $I'_{m0q(n)}$ |

Общий момент привода при этом из (6) и (18):

$$M_3 = M'_3 + M''_3 = \frac{m_1}{Q_c} 10^2 [I_{q1}(E'_0 + E''_0 \cos \Delta\theta) + I_{d1}E''_0 \sin \Delta\theta] = \frac{m_1}{Q_c} \frac{10^2}{r_{12}^2 + x_{ce}^2} \{U_1 E'_0 (r_{12} \cos \theta'_0 + x_{ce} \sin \theta'_0) + U_1 E''_0 [r_{12} (\cos \theta'_0 \cos \Delta\theta - \sin \theta'_0 \sin \Delta\theta) + x_{ce} (\sin \theta'_0 \cos \Delta\theta + \cos \theta'_0 \sin \Delta\theta)] - [(E'_0)^2 + (E''_0)^2] r_{12} - 2E'_0 E''_0 r_{12} \cos \Delta\theta\}. \quad (19)$$

Полученные соотношения позволяют провести анализ работы двухдвигательного привода на базе

машин различного типа при параллельном и последовательном соединении как для установившегося, так и для динамических режимов. При необходимости изложенный подход может быть использован для анализа каскада с большим количеством машин или содержащего различные предвключенные элементы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Крон Г. Применение тензорного анализа в электротехнике. М., Госэнергоиздат, 1955.
- Грузов Л. Н. Методы математического исследования электрических машин. М., Госэнергоиздат, 1953.

[6.4.1973]

◆ ◆ ◆

Пульсация токов при многофазном импульсном преобразовании напряжения

Канд. техн. наук НЕКРАСОВ В. И.

Ленинград

В мощных тиристорно-импульсных преобразователях электропривода, например тягового, требуется разделение нагрузки по параллельным группам вентилей, включение которых производится поочередно со сдвигом во времени. Если в каждой группе вентилей включен свой сглаживающий реактор, то преобразователь называется многофазным [Л. 1 и 2]. Пульсация токов в фазах такого преобразователя и в нагрузке определяется ее собственной индуктивностью и индуктивностью сглаживающих реакторов.

В настоящее время известны публикации [Л. 1—5], в которых рассматривается работа многофазных преобразователей и даются рекомендации по выбору их параметров, однако они не содержат общих выражений, связывающих пульсации токов с числом фаз преобразователя и параметрами его цепей. Это затрудняет выбор индуктивностей сглаживающих реакторов, особенно в тех случаях, когда она соизмерима с индуктивностью цепи нагрузки. С целью устранения отмеченного недостатка ниже приводится анализ пульсаций токов при многофазном преобразовании напряжения.

Рассмотрим многофазный импульсный преобразователь, состоящий из N отдельных групп тиристоров, в каждую из которых включен сглаживающий реактор индуктивностью $L_{\text{ср}}$. Нагрузкой преобразователя является цепь тяговых двигателей с приведенной э. д. с. E и индуктивностью L .

Анализ пульсаций тока в фазах ΔI_{Φ} и в нагрузке ΔI_N проведем в предположении того, что параметры электрических цепей не зависят от токов, и пульсирующие составляющие в интервалах открытого и закрытого состояний тиристоров изменяются линейно. Последнее обычно наблюдается при импульсном преобразовании напряжения тяговых двигателей, характерном относительно малыми потерями энергии в сравнении с электрической энергией, преобразуемой в механическую.

Используя разложение в ряд Фурье и метод суперпозиции, можно считать, что пульсирующая составляющая тока нагрузки каждой гармонической есть результат сложения n векторов, сдвинутых относительно друг друга на угол $\psi_n = n \frac{2\pi}{N}$, сумма которых не будет равна нулю только в том случае, если

$$\psi_n = p2\pi, \quad (1)$$

где n — номер гармонической составляющей; p — любое целое число.

Наименьшим числом, удовлетворяющим (1), будет $p=0$, что соответствует суммированию постоянных составляющих фаз на нагрузке; следующему значению $p=1$ соответствует $n=N$, поэтому сумма гармонических с номером, равным числу фаз преобразователя, даст результатирующую пульсацию тока в нагрузке:

$$\sum_1^N A_n = N A_N, \quad (2)$$

где A_n — амплитуда гармонической составляющей тока фазы, имеющей номер $n=N$.

Если вести отсчет переменной составляющей $\Delta i_{\Phi}(t)$ от наименьшего значения тока фазы $I_{\text{м.ф.}}$, то мгновенное значение тока фазы

$$i_{\Phi}(t) = I_{\text{м.ф.}} + \Delta i_{\Phi}(t). \quad (3)$$

Переменную составляющую удобно записать в относительных единицах:

$$\bar{\Delta i}_{\Phi} = \frac{\Delta i_{\Phi}}{\Delta I_{\Phi}} \text{ и } \bar{t} = \frac{t}{T_{\Phi}},$$

представив в виде

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Delta i}_{\Phi}(\bar{t}) &= \frac{\bar{t}}{\lambda_{\Phi}} \text{ — в интервале } 0 < \bar{t} < \lambda_{\Phi}; \\ \bar{\Delta i}_{\Phi}(\bar{t}) &= \frac{1-\bar{t}}{1-\lambda_{\Phi}} \text{ — в интервале } \lambda_{\Phi} < \bar{t} < 1, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\lambda_{\Phi} = \frac{T_e}{T_{\Phi}}$ — коэффициент заполнения фазы, равный отношению времени потребления энергии T_e к периоду переключения фазы T_{Φ} .

После разложения (4) в ряд Фурье получим:

$$\begin{aligned} \bar{\Delta i}_{\Phi}(\bar{t}) &= \frac{1}{2} + \sum_1^n \frac{\cos 2\pi n \lambda_{\Phi} - 1}{2\pi^2 n^2 \lambda_{\Phi} (1 - \lambda_{\Phi})} \cos 2\pi n \bar{t} + \\ &+ \sum_1^n \frac{\sin 2\pi n \lambda_{\Phi}}{2\pi^2 n^2 \lambda_{\Phi} (1 - \lambda_{\Phi})} \sin 2\pi n \bar{t}. \end{aligned} \quad (5)$$

Относительная амплитуда n -й составляющей будет равна:

$$\bar{A}_n = \frac{I_{6n}}{\Delta I_{\Phi}} = \frac{\sin \pi n \lambda_{\Phi}}{\pi^2 n^2 \lambda_{\Phi} (1 - \lambda_{\Phi})}. \quad (6)$$

Изменение относительных амплитуд первых трех гармонических составляющих \bar{A}_1 , \bar{A}_2 и \bar{A}_3 в масштабе $1/\pi$ в зависимости от λ_{Φ} показано на рис. 1, из которого видно, что количество экстремальных значений относительных амплитуд равно номеру гармонической составляющей.

Следует подчеркнуть, что амплитуды относительных пульсаций не совпадают с амплитудами абсолютных пульсаций тока в нагрузке ΔI_{6n} , так как они не совпадают с амплитудами пульсаций тока в каждой фазе.

При рассмотрении пульсаций в фазе предположим вначале, что $L \ll L_{\text{ср}}$ и считаем, что работа фаз независима, т. е. многофазная система — несвязанная; тогда по известному выражению [Л. 6]

$$\Delta I_{\Phi} = \frac{\lambda_{\Phi}(1 - \lambda_{\Phi}) U_d}{L_{\text{ср}} \Phi}, \quad (7)$$

и суммарная пульсация основной гармонической на нагрузке согласно (2) будет равна:

$$\Delta I_n = 2N A_n \Delta I_{\Phi}. \quad (8)$$

Здесь коэффициент «2» соответствует переходу от амплитуды к пульсации (двум амплитудам).

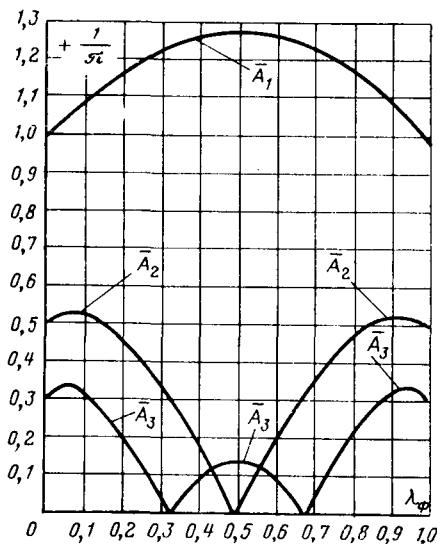


Рис. 1. Изменение относительных амплитуд гармонических составляющих в зависимости от коэффициента заполнения фазы преобразователя.

Подставляя (7) в (8) с учетом (6), получаем выражение, связывающее пульсации тока в нагрузке в случае независимой работы фаз с коэффициентом заполнения λ_Φ и индуктивностью сглаживающего реактора:

$$\Delta I_N = \frac{2U_d \sin \pi N \lambda_\Phi}{\pi^2 N L_{cr} f_\Phi}. \quad (9)$$

Из (9) видно, что пульсация тока в нагрузке от основной составляющей будет равна нулю при

$$\lambda_{\Phi,0} = \frac{p}{N} \quad (10)$$

и достигает максимального значения

$$\Delta I_{N6} = \frac{2U_d}{\pi^2 N L_{\text{cr}} f_\Phi}, \quad (11)$$

когда

$$\lambda_{\phi,3} = \frac{2p+1}{2N}. \quad (12)$$

Здесь $p < N$ — любое целое число, включая нуль, поэтому количество максимумов пульсации тока на нагрузке будет равно числу фаз преобразователя. Величина амплитуд пульсаций не зависит от номера стационарной точки, в которой $\frac{\partial \Delta I_N}{\partial \lambda} = 0$, только

при $f_\Phi = \text{const.}$

Для сравнения широтного и частотного способов управления введем безразмерный коэффициент сглаживания:

$$k_{\text{cr}} = \frac{\Delta I_N \pi N X_{\text{cr}, \text{II}}}{4U_d} = \left| -\frac{\sin \pi \bar{N} \bar{\lambda}_\Phi \bar{f}_\Phi}{\bar{f}_\Phi} \right|. \quad (13)$$

где $X_{\text{ср.н}} = 2\pi f_{\text{ф.н}} L_{\text{ср}}$ — индуктивное сопротивление сглаживающего реактора при номинальной частоте $f_{\text{ф.н}}$, которой соответствует значение $\lambda_{\text{ф.н}}$;

$\bar{\lambda}_\Phi = \frac{\lambda_\Phi}{\lambda_{\Phi, \text{н}}}$ и $\bar{f} = \frac{f_\Phi}{f_{\Phi, \text{н}}}$ — нормированные по номинальному значению соответственно коэффициент заполнения и частота.

Для широтного управления $\bar{f}_\phi = \text{const}$ и $\bar{\lambda} = \text{var}$; для частотного принято $\bar{\lambda}_\phi = \bar{f}_\phi = \text{var}$, при этом согласно (13)

$$k_{\text{cr}0} = \lim_{f_{\Phi} \rightarrow 0} k_{\text{cr}} = \pi N \lambda_{\text{h}}. \quad (14)$$

На рис. 2 показано изменение k_{cr} четырехфазного преобразователя для широтного и частотного способов управления. Из рисунка видно, что разница в коэффициентах сглаживания рассматриваемых систем особенно заметна в зоне малых λ , и она тем больше, чем выше значение номинального коэффициента заполнения при частотном регулировании.

По известному значению $k_{\text{ср}}$ индуктивность сглаживающего реактора фазы определяется из соотношения:

$$L_{\text{cr}} = \frac{2U_d k_{\text{cr}}}{\pi^2 \Delta f_N N f_{\Phi, u}}. \quad (15)$$

При широтном управлении во всех экстремальных особых точках $k_{\text{ср.9}}=1$, а в маневровых режимах частотных систем $k_{\text{ср.м}} \approx k_{\text{ср.0}}$. Поэтому в несвязанных многофазных системах по сравнению с однофазными при прочих равных условиях можно уменьшить индуктивность каждой фазы в 1,25N раз в случае широтного управления и только в 1,57 раза в случае частотного управления.

Для определения пульсаций в фазе связанный многофазной системы, в которой индуктивность L соизмерима с $L_{\text{ср}}$, рассмотрим систему дифференциальных уравнений в предположении, что p фаз имеют включенное состояние тиристоров и $(N-p)$ фаз — выключенное:

где i и i_Φ — токи нагрузки и каждой фазы соответственно.

Общее решение системы (16) оказывается сложным, так как в зависимости от коэффициента заполнения λ_f могут по-разному изменяться состояния фаз в течение периода переключения группы тиристоров. Поэтому, отбросив промежуточные слу-

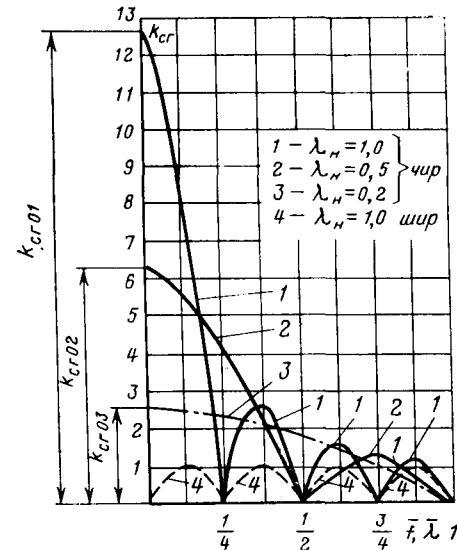


Рис. 2. Изменение коэффициента сглаживания четырехфазного преобразователя при изменении коэффициента заполнения и частоты: для частотно-импульсного регулирования (ЧИР) и широтно-импульсного регулирования (ШИР).

чай, рассмотрим только два: когда за период переключения тиристоров фазы общее число включенных фаз сохраняется неизменным и когда оно каждые $T_\Phi/2N$ периода изменяется на ± 1 . При этом будем считать коммутацию тиристоров мгновенной. Согласно (16) для первого случая в интервале T_Φ

$$\frac{di}{dt} = \frac{pU_d - NE}{L_{cr} + NL} \quad (17)$$

сохраняется постоянной, что для квазистабилизированного режима может быть только при $di/dt = 0$.

В силу ранее принятых допущений э. д. с. двигателей определяется некоторым коэффициентом заполнения:

$$E = \lambda U_d. \quad (18)$$

После подстановки (18) в (17) легко убедиться, что для первого из рассматриваемых случаев

$$\lambda = p/N = \lambda_{\Phi}, \quad (19)$$

поэтому э. д. с. определяется коэффициентом заполнения фазы λ_{Φ} , и обеспечивается независимая работа фаз.

Для второго случая в нагрузке появляется пульсация с частотой N/T_Φ , каждые $T_\Phi/2N$ периода изменяется количество фаз с включенными тиристорами на единицу, поэтому для квазистабилизированного режима справедливо равенство производных нарастания и спада тока:

$$\frac{(p+1)U_d - NE}{L_{cr} + NL} = - \frac{pU_d - NE}{L_{cr} + NL}, \quad (20)$$

откуда с учетом (18)

$$\lambda = \frac{2p+1}{2N} = \lambda_{\Phi, \varphi}. \quad (21)$$

Таким образом, второй из рассмотренных случаев соответствует режиму наибольших пульсаций в нагрузке, при котором э. д. с. двигателей также определяется коэффициентом заполнения отдельной фазы. Абсолютная величина

$$\left| \frac{di}{dt} \right| = \frac{U_d}{2(L_{cr} + NL)} \quad (22)$$

соответствует пульсации тока в нагрузке:

$$\Delta I_{NL6} = \Delta I_{\Phi, 6} \frac{1}{N \left(1 + N \frac{L}{L_{cr}} \right)}, \quad (23)$$

основная гармоническая которой, как и в случае $L=0$, имеет частоту в N раз большую, чем частота переключения тиристоров одной фазы, и амплитуду, зависящую от номера стационарной точки, если $f_\Phi \neq \text{const}$, так как

$$\Delta I_{\Phi, 6} = \frac{0,25U_d T_{\Phi, n}}{L_{cr} \bar{f}_\varphi} \quad (24)$$

— наибольшая пульсация в фазе при $L=0$ и частоте \bar{f}_φ , соответствующей стационарной точке.

Следовательно, при $L \neq 0$ пульсации тока нагрузки сглаживаются тем сильнее, чем больше число фаз преобразователя, при этом пульсация тока основной гармонической

$$\Delta I_{NL6} = \frac{2U_d k_{cr, \varphi}}{\pi^2 N f_{\Phi, n} L_{cr} k_L}, \quad (25)$$

где коэффициент связывания системы

$$k_L = \left(1 + N \frac{L}{L_{cr}} \right); \quad (26)$$

$k_{cr, \varphi}$ — коэффициент сглаживания в рассматриваемой стационарной точке.

Рассматривая пульсацию тока в фазах при $L \neq 0$, заметим, что согласно (21) интервалы T_e и $T_{\pi} = T_\Phi - T_e$ содержат нечетное число чередований включенных и выключенных фаз, следующих друг за другом с периодом $T_\Phi/2N$. Влияние пульсаций тока нагрузки в чередующихся друг за другом интервалах компенсируется, поэтому субгармонические колебания оказывают наибольшее влияние на пульсацию токов в фазах в моменты $T_e - T_\Phi/2N$ — при нарастании тока и $T_\Phi - T_e - T_\Phi/2N$ — при его спаде. Рассматривая, например, режим спада тока с учетом (18), (22) и (16), можно считать, что индуктивность будет уменьшать пульсацию тока в фазах, если выполнено неравенство:

$$\lambda_{\Phi, \varphi} \left(T_\Phi - T_e - \frac{T_\Phi}{2N} \right) + \frac{L}{L_{cr}} \frac{T_\Phi}{4Nk_L} \leq \lambda_{\Phi, \varphi} (T_\Phi - T_e), \quad (27)$$

которое согласно (21) удовлетворяется только в том случае, если

$$\frac{2p+1}{N} > \frac{1}{\frac{L_{cr}}{L} + N}. \quad (28)$$

Очевидно, условие (28) всегда выполняется, т. е. при коэффициентах заполнения, соответствующих стационарным точкам, индуктивность в цепи нагрузки способствует уменьшению пульсаций токов в фазах преобразователя на величину

$$\delta \Delta I_\Phi = \frac{LU_d T_\Phi}{k_L NL_{cr}}. \quad (29)$$

Следовательно, при нечетном числе фаз наибольшая пульсация тока в фазе

$$\Delta I_{\Phi, 6L} = \Delta I_{\Phi, 6} \left[1 - \frac{L}{k_L NL_{cr}} \right]. \quad (30)$$

Условие (28) справедливо только для режима непрерывных токов в фазах преобразователя. Для иллюстрации сказанного на рис. 3 приведены осциллограммы пульсаций токов при двухфазном преобразовании с частотой переключения тиристоров каждой фазы $f_\Phi = 60$ гц. Осциллограмма рис. 3, а соответствует режиму прерывистых токов при $\lambda_0 = 0,5$, когда пульсация токов в фазах максимальна. Ток нагрузки в этом случае непрерывен, но имеет практически такую же пульсацию, как в режиме непрерывного тока в фазах при $\lambda_0 = 0,75$. Из сравнения осциллограмм рис. 3, а и б видно, что в режиме прерывистых токов в фазах пульсация тока нагрузки увеличивает пульсацию тока в фазах, так как включение очередной фазы сопровождается здесь не ростом, а спадом тока нагрузки.

Допустимую пульсацию тока в нагрузке по условию непрерывности тока в фазах можно получить, если приравнять $\Delta I_{\Phi, 6L} = I/N$ и подставить $I_{\Phi, 6}$ из (23) в (30), тогда

$$\frac{\Delta I_{NL6}}{I} \leq \frac{1}{N^2 \left[1 + N \frac{L}{L_{cr}} \left(1 - \frac{1}{N^2} \right) \right]}, \quad (31)$$

где I — средний ток нагрузки.

По известному отношению L/L_{cr} из (31), (24) и (23) определяется требуемое значение L_{cr} , обеспе-

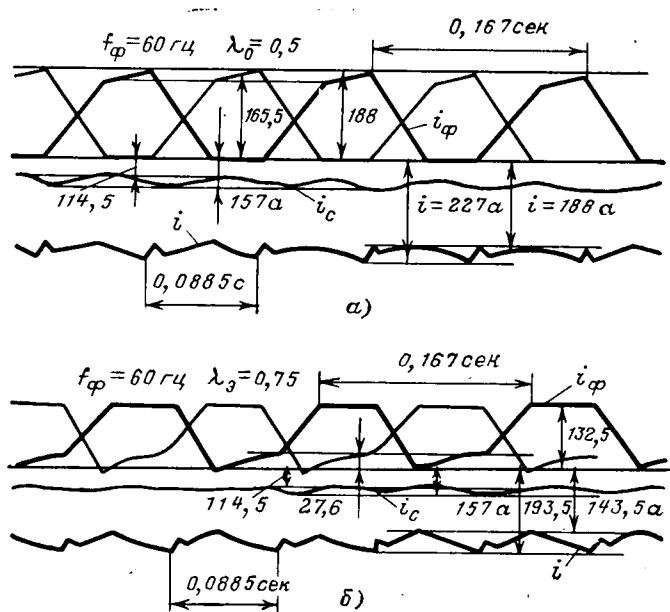


Рис. 3. Осциллограммы пульсаций токов в двухфазном преобразователе.
а — режим прерывистых токов в фазах; б — режим непрерывных токов в фазах.
 i_0 , i , i_c — токи фазы, нагрузки и источника питания.

чивающее непрерывность токов фаз преобразователя с определенной наибольшей пульсацией при значениях коэффициента заполнения, соответствующих стационарным точкам.

Для определения допустимых пульсаций нагрузки в маневровом режиме, который в некоторых случаях получают при пониженной частоте переключения фаз и маневровом значении коэффициента заполнения λ_m , можно аналогично (31) использовать неравенство:

$$\frac{\Delta I_{NLm}}{I_m} \leq \frac{0,25\bar{f}_{\phi,m}}{\lambda_m (1 - \lambda_m) N^2 \left[1 + N \frac{L}{L_{cr}} \left(1 - \frac{1}{N^2} \right) \right]}, \quad (32)$$

где I_m — ток нагрузки в маневровом режиме; $\bar{f}_{\phi,m}$ — частота маневрового режима в относительных единицах.

Проведенное исследование основано на рассмотрении линейной системы многофазного импульсного преобразователя без учета искажения формы кривой напряжения, прикладываемого к нагрузке, процессами, протекающими в узле коммутации. Поэтому приведенные расчетные соотношения могут быть использованы для определения параметров линеаризованных импульсных систем с независимой коммутацией, не содержащих коммутирующих реакторов в цепи рабочих тиристоров.

Максимум пульсаций тока в фазах преобразователя, имеющего четное их число, наступает при независимой работе фаз, поэтому для определения условия непрерывного тока в (31) и (32) следует приравнять $L = 0$.

Если условия (31) и (32) не выполняются и нежелательно иметь прерывистые токи в фазах, величина сглаживающего реактора должна быть увеличена на значение ΔL_{cr} в соответствии с требуемым уменьшением значения ΔI_{NLb} либо ΔI_{NLm} . Если не удовлетворяется одно условие (32), то дополнительная индуктивность может быть использована только в маневровом режиме.

Выводы. 1. Пульсация тока нагрузки в многофазной системе определяется основной гармонической, номер которой совпадает с числом фаз импульсного преобразователя.

2. Если индуктивность цепи нагрузки соизмерима с индуктивностью сглаживающего реактора, нарушается независимая работа фаз, и на основную пульсацию тока фазы налагаются субгармонические колебания, частота которых совпадает с основной гармонической пульсации тока нагрузки.

3. Как при независимой, так и при зависимой работе фаз значения коэффициентов заполнения, соответствующие стационарным точкам пульсаций, одинаковы. Количество стационарных точек равно числу фаз преобразователя; амплитуда пульсаций тока в нагрузке не зависит от номера стационарной точки только при широтном управлении.

4. Индуктивность цепи нагрузки во всех стационарных точках заведомо сглаживает пульсации тока в фазах, если токи в фазах непрерывны.

5. Предложенные формулы могут быть использованы для расчета пульсаций токов в многофазных преобразователях напряжения и определения индуктивности сглаживающих реакторов при широтном и частотном способах изменения коэффициента заполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тиристорное управление электрическим подвижным составом. М., «Транспорт», 1970. Авт.: Розенфельд В. Е., Шевченко В. В., Майбога В. А., Долаберидзе Г. П.

2. Некрасов В. И. Многотактные и многофазные системы импульсного преобразования напряжения для тяговой нагрузки. — «Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника», 1973, вып. 7.

3. Тиристорный импульсный преобразователь с общим узлом коммутации для электроподвижного состава постоянного тока. — «Электричество», 1971, № 6. Авт.: Ефремов И. С., Косарев Г. В., Коськин О. А., Стратий В. И.

4. Доценко А. П., Бирзник Л. В. Тиристорный импульсный преобразователь постоянного тока с общим коммутационным узлом для двух параллельных цепей. — «Изв. АН Латв. ССР», 1968, № 6.

5. Некрасов В. И., Бегагонин Э. И. К выбору параметров частотно-импульсного преобразователя постоянного тока. — «Электротехника», 1971, № 2.

6. Zenkel D. Gleichstrom — Pulssteuerung für Elektrofahrzeuge. — «Elektric», 1966, № 6.

12.1.1974



Дифференциальные индуктивности некомпенсированных машин постоянного тока

Инж. ПОПИЧКО В. В., канд. техн. наук, доц. ЧЕРНЫК М. А.,
канд. техн. наук ФИЛЬЦ Р. В.

Львовский политехнический институт

Индуктивности машины постоянного тока (МПТ) являются основными параметрами, характеризующими ее поведение в переходных процессах и статическую устойчивость установившихся режимов.

В работах ряда авторов показано, что индуктивности некомпенсированной МПТ существенно зависят от степени насыщения ее магнитопровода, определяемой значениями токов возбуждения и якоря [Л. 1]. Функциональные зависимости индуктивностей от токов могут быть получены экспериментально, однако такой путь требует больших материальных затрат на постановку экспериментов. Распространение же экспериментальных результатов, полученных для одной машины, на машины с иными геометрическими размерами магнитопровода далеко не всегда является оправданным. Известные расчетные методы определения индуктивностей насыщенных МПТ основаны на сравнительно грубых допущениях (не учитываются неравномерность воздушного зазора вдоль полюсной дуги [Л. 2], влияние насыщения станины и ярма якоря [Л. 2 и 3]).

Применение ЦВМ позволяет качественно по-новому подойти к решению проблемы исследования процессов в насыщенной МПТ. Высокое быстродействие ЦВМ в сочетании с численными методами решения систем нелинейных дифференциальных уравнений дают возможность не только учесть все практические существенные факторы, но и значительно упростить математическое исследование за счет отказа от преобразований, сопутствующих решению нелинейных уравнений традиционными методами. Эффективность такого подхода всесторонне проверена на решении аналогичных задач для явнополюсных синхронных машин [Л. 4 и 5], что и побудило нас к выполнению исследований, результаты которых являются содержанием настоящей статьи.

Дифференциальные уравнения электрического равновесия МПТ имеют вид:

$$\begin{aligned} u_a &= r\psi_a + r\psi_d + r\psi_f + r_a i_a + e_q + \Delta u_{\text{щ}}; \\ u_f &= r\psi_f + r_f i_f, \end{aligned} \quad (1)$$

где u_a , i_a , r_a , u_f , i_f , r_f — напряжения, токи и сопротивления соответственно цепей якоря и обмотки независимого возбуждения (ОНВ); ψ_a , ψ_d , ψ_f — потокосцепления соответственно обмоток якоря (ОЯ), последовательного возбуждения (ОПВ), добавочных полюсов (ОДП) и ОНВ; e_q — э. д. с. вращающейся ОЯ; $\Delta u_{\text{щ}}$ — падение напряжения в щеточном контакте; r — оператор дифференцирования по времени.

В (1) каждое из потокосцеплений является нелинейной функцией токов i_f , i_a , поэтому уравнения (1) могут быть представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= (L_{aa} + L_{pa} + L_{da}) p_i_a + (L_{af} + L_{pf} + \\ &+ L_{df}) p_i_f + e_q + r_a i_a + \Delta u_{\text{щ}}; \\ u_f &= L_{fa} p_i_a + L_{ff} p_i_f + r_f i_f, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где собственные и взаимные индуктивности контуров машины:

$$L_{aa} = \frac{\partial \psi_a}{\partial i_a}; L_{pa} = \frac{\partial \psi_p}{\partial i_a}; L_{da} = \frac{\partial \psi_d}{\partial i_a}; L_{af} = \frac{\partial \psi_a}{\partial i_f}; \quad (3a, б, в, г)$$

$$L_{pf} = \frac{\partial \psi_p}{\partial i_f}; L_{df} = \frac{\partial \psi_d}{\partial i_f}; L_{fa} = \frac{\partial \psi_f}{\partial i_a}; L_{ff} = \frac{\partial \psi_f}{\partial i_f}. \quad (3d, е, ж, з)$$

Суммы

$$L_{ja} = L_{aa} + L_{pa} + L_{da}; \quad L_{jf} = L_{af} + L_{pf} + L_{df} \quad (4)$$

являются соответственно собственной индуктивностью якорной цепи и взаимной индуктивностью якорной цепи и ОНВ.

Для определения индуктивностей (3) примем следующие допущения: зубчатую поверхность якоря заменим гладкой, а реальный воздушный зазор — расчетным путем введения коэффициента воздушного зазора; зубцовую зону заменим равномерным слоем, имеющим в радиальных направлениях характеристику намагничивания реальной зубцовой зоны; магнитные сопротивления главного полюса (ГП), добавочного полюса (ДП), а также участков станины и ярма якоря между осями соседних полюсов примем сопредоточенными; рабочее поле будем полагать плоскопараллельным, будем считать, что поле рассеяния ОЯ не влияет на магнитные проводимости путей рабочего поля и, наоборот, рабочее поле не влияет на проводимости путей полей рассеяния ОЯ; поле ГП не проникает в зону коммутации; щетки установлены на геометрической нейтрали.

Воздушный зазор и зубцовый слой для краткости будем называть активным слоем, часть активного слоя, находящуюся в зоне коммутации, — активным слоем в зоне коммутации, а оставшуюся часть — активным слоем в зоне ГП.

Принятым допущениям соответствует схема замещения магнитной цепи, представленная на рис. 1 (на пару полюсов), где T_f , T_p , T_d — н. с., создаваемые соответственно ОНВ, ОПВ, ОДП на один полюс; B_x , F_x , B_{xk} , F_{xk} — индукция и падение магнитного напряжения на элементарном участке активного слоя с координатой x соответственно в зоне ГП и в зоне коммутации; x — расстояние от оси ГП; T_{ax} — н. с. ОЯ на один полюс, охватываемая контуром интегрирования, проходящим последовательно через участок активного слоя в зоне ГП с координатой x , ГП, станину, соседний ГП, участок активного слоя в зоне ГП с координатой $x+\tau$, ярмо якоря; T_{axk} — н. с. ОЯ на один полюс, охватываемая контуром интегрирования, проходящим последовательно через участок активного слоя в зоне коммутации с координатой x , ДП, станину, соседний ДП, участок активного слоя в зоне коммутации с координатой $x+\tau$, ярмо якоря; Φ_r , F_r , Φ_d , F_d — потоки и падения магнитных напряжений в сердечниках ГП и ДП; Φ_{a1} , Φ_{a2} — потоки рассеяния ГП и ДП; Φ_{e1} , Φ_{e2} — потоки рассеяния между главным

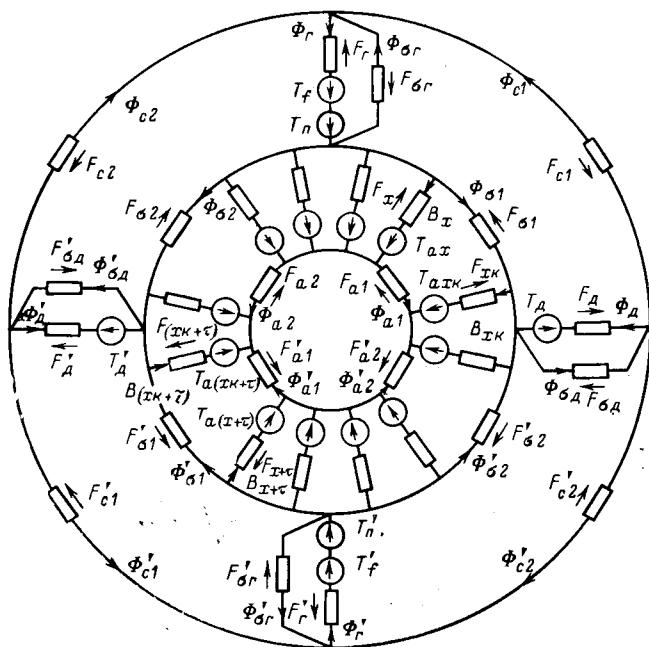


Рис. 1. Схема магнитной цепи.

и добавочными полюсами; Φ_{c1} , Φ_{c2} , Φ_{a1} , Φ_{a2} — потоки участков станины и ярма якоря; F_{c1} , F_{c2} , F_{a1} , F_{a2} — падения магнитных напряжений на этих участках; одноименные величины под полюсами противоположной полярности отмечены штрихами.

С целью сокращения количества описывающих схему уравнений воспользуемся условиями симметрии, согласно которым все характеризующие магнитное поле величины под полюсами разноименной полярности имеют одинаковые значения и противоположные знаки (в активном слое это относится к участкам, расположенным на расстоянии полюсного деления τ), тогда по первому и второму законам Кирхгофа для схемы рис. 1 имеем:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_r - \Phi_\delta - \Phi_{\sigma r} - \Phi_{c1} - \Phi_{c2} &= 0; \\ \Phi_\delta - \Phi_{a1} - \Phi_{a2} &= 0; \\ \Phi_d - \Phi_{\delta k} - \Phi_{\sigma d} + \Phi_{c1} - \Phi_{c2} &= 0; \\ \Phi_{\delta k} + \Phi_{a1} - \Phi_{a2} &= 0; \\ \Phi_r - \Phi_{\sigma r} - \Phi_{c1} - \Phi_{c2} &= 0; \\ \Phi_d - \Phi_{\sigma d} + \Phi_{c1} - \Phi_{c2} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$F_r + F_x + \frac{\tau_1}{2} (F_{a_1} + F_{a_2} + F_{c_1} + F_{c_2}) - T_f - T_u - T_{ax} = 0; \quad (6a)$$

$$F_d + F_{xk} - \frac{1}{2} (F_{a1} - F_{a2} + F_{c1} - F_{c2}) + \\ + T_d - T_{axk} = 0; \quad (66)$$

$$F_{\sigma\Gamma} - F_{\sigma 1} - F_{\sigma\Delta} - F_{c1} = 0; \quad F_{\sigma\Delta} - F_{\sigma 2} + F_{\sigma\Gamma} - F_{c2} = 0; \quad (6B, \Gamma)$$

$$\Phi_{\delta} = l_{\delta} \int^c B_x dx; \quad \Phi_{\delta_K} = l_{\delta} \int^e B_{x_K} dx \quad (7)$$

$$F_r + F_{\sigma r} - T_n - T_f = 0; \quad F_d + F_{\sigma d} + T_d = 0, \quad (6d, e)$$

— рабочий поток соответственно в зоне ГП и в зоне коммутации;

$$c = \frac{\tau}{2} - \frac{b_k}{2}; \quad e = \frac{\tau}{2} + \frac{b_k}{2};$$

l_b — расчетная длина машины; b_k — расчетная ширина зоны коммутации.

Свойства участков магнитной цепи описываются их характеристиками намагничивания:

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_r = \Phi_r(F_r); \quad \Phi_d = \Phi_d(F_d); \quad \Phi_{c1} = \Phi_c(F_{c1}); \\ \Phi_{c2} = \Phi_c(F_{c2}); \quad \Phi_{a1} = \Phi_a(F_{a1}); \quad \Phi_{a2} = \Phi_a(F_{a2}); \\ \Phi_{\sigma 1} = \Lambda_{\sigma} F_{\sigma 1}; \quad \Phi_{\sigma 2} = \Lambda_{\sigma} F_{\sigma 2}; \quad \Phi_{\sigma r} = \Lambda_{\sigma r} F_{\sigma r}; \\ \Phi_{\sigma d} = \Lambda_{\sigma d} F_{\sigma d}; \quad B_x = B_x(F_x); \quad B_{xr} = B_{xr}(F_{xr}), \end{array} \right\} \quad (8)$$

где $\Lambda_{\sigma\Gamma}$, $\Lambda_{\sigma\Delta}$ — проводимости путей рассеяния ГП и ДП на станину; Λ_{σ} — проводимость пути рассеяния между наконечниками ГП и ДП.

Известно, что картина поля в межполюсном пространстве имеет весьма сложный вид, и поэтому точный учет потоков рассеяния не представляется возможным. С достаточной для практики точностью проводимости Λ_{σ} , $\Lambda_{\sigma r}$, $\Lambda_{\sigma d}$ могут быть определены по вероятной картине поля рассеяния в межполюсном пространстве [Л. 6]. Чтобы учесть тот факт, что в реальной машине не все витки обмотки полюса охвачены полным потоком рассеяния (как принято на схеме рис. 1), проводимости $\Lambda_{\sigma r}$, $\Lambda_{\sigma d}$ следует определять исходя из потокосцеплений рассеяния. Для этого строим элементарные трубы потоков рассеяния ГП (ДП) на станину. Разделяем полюс и обмотку по высоте на участки, число которых соответствует числу элементарных трубок. Считая, что поток рассеяния каждого участка сосредоточен в его середине, определяем полное потокосцепление Φ обмотки как сумму потокосцеплений отдельных ее частей (сопротивлением магнитопровода пренебрегаем). Проводимость $\Lambda_{\sigma r}$ ($\Lambda_{\sigma d}$) определяем как:

$$\Lambda_{\sigma\Gamma} = \frac{\psi}{z\sigma\Gamma},$$

где w , F — соответственно число витков и н. с. обмотки полюса.

Проводимость Λ_s и удельные проводимости элементарных трубок определяются согласно [Л. 6]. Найденные значения Λ_s , Λ_{st} , Λ_{sd} принимаются постоянными и независящими от насыщения магнитной цепи машины.

Частичные характеристики намагничивания участков активного слоя в зоне ГП $B_x = B_x(F_x)$ и в зоне коммутации $B_{xk} = B_{xk}(F_{xk})$ получаются суммированием по абсциссам кривых намагничивания зубцового слоя и прямых намагничивания воздушного зазора для соответствующих значений x :

$$F_x = \frac{k_{\delta x} \delta_x}{\mu_0} B_x + F_{zx}; \quad F_{xK} = \frac{k_{\delta xK} \delta_x}{\mu_0} B_{xK} + F_{zxK}, \quad (9a, 6)$$

где k_{δ_x} , δ_x , $k_{\delta_{dx}}$, δ_{dx} — коэффициент воздушного зазора и длина воздушного зазора в точке x соответственно в зоне ГП и в зоне коммутации; F_{zx} , F_{zxx} — падение магнитного напряжения в зубцовом слое при индукциях в зазоре, равных соответственно B_x

и B_{xk} . Характеристики намагничивания $\Phi_f = \Phi_f(F_f)$, $\Phi_d = \Phi_d(F_d)$, $\Phi_a = \Phi_a(F_a)$, $\Phi_c = \Phi_c(F_c)$, $B_x = B_x(F_{zx})$ рассчитываются согласно [Л. 6] на один полюс.

Входящие в уравнения (6а—6) н. с. выражаются через обмоточные данные и токи машины:

$$\left. \begin{aligned} T_f &= \omega_f \frac{i_f}{a_f}; \quad T_n = \omega_n \frac{i_n}{a_n}; \quad T_d = \omega_d \frac{i_d}{a_d}; \\ T_{ax} &= T_{axk} = T_a \frac{2x}{\tau}; \quad T_a = \frac{N}{4p_0} \frac{i_a}{2a}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где ω_f , ω_n , ω_d — числа витков на полюс соответственно ОНВ, ОПВ, ОДП; a_f , a_n , a_d — числа параллельных ветвей этих обмоток; T_a — максимальное значение н. с. ОЯ (при $x=\tau/2$); N , $2a$ — числа проводников и параллельных ветвей ОЯ; p_0 — число пар полюсов.

Потокосцепления обмоток МПТ выражаются через потоки схемы замещения:

$$\left. \begin{aligned} \psi_f &= 2p_0 \frac{\omega_f}{a_f} \Phi_f; \quad \psi_n = 2p_0 \frac{\omega_n}{a_n} \Phi_n; \\ \psi_d &= 2p_0 \frac{\omega_d}{a_d} \Phi_d; \\ \psi_a &= \psi_s + \psi_d; \quad \psi_d = \psi_{dr} + \psi_{dk}; \\ \psi_{dr} &= \frac{N}{2a} \frac{i_d}{\tau} \int_{-c}^c B_x x dx; \\ \psi_s &= L_s i_a; \quad \psi_{dk} = \frac{N}{2a} \frac{i_d}{\tau} \left(\int_c^{c/2} B_{xk} x dx + \int_{-c/2}^{-c} B_{xk} x dx \right), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где ψ_s — потокосцепление рассеяния ОЯ; ψ_d , ψ_{dr} , ψ_{dk} — рабочее потокосцепление ОЯ и его составляющие, соответствующие рабочему полюсу под ГП и в зоне коммутации; L_s — индуктивность рассеяния ОЯ.

Перейдем к выводу выражений для индуктивностей (3).

Согласно вышеизложенному магнитное состояние МПТ, т. е. падение магнитных напряжений на всех участках магнитной цепи, зависит от четырех н. с. (T_f , T_n , T_d , T_a), которые в соответствии с (10) являются функциями двух токов — i_f и i_a . Поэтому в соответствии с (3), (11) для собственной индуктивности ОЯ по правилу дифференцирования сложных функций имеем:

$$\left. \begin{aligned} L_{aa} &= L_s + \frac{N}{2a} \frac{i_d}{\tau} \left(\int_{-c}^c \frac{dB_x}{dF_x} \frac{\partial F_x}{\partial i_a} x dx + \right. \\ &\quad \left. + \int_c^{c/2} \frac{dB_{xk}}{dF_{xk}} \frac{\partial F_{xk}}{\partial i_a} x dx + \int_{-c/2}^{-c} \frac{dB_{xk}}{dF_{xk}} \frac{\partial F_{xk}}{\partial i_a} x dx \right). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Производные $\frac{dB_x}{dF_x} = \lambda_x$ и $\frac{dB_{xk}}{dF_{xk}} = \lambda_{xk}$ представляют собой удельные локальные дифференциальные магнитные проводимости соответствующих участков активной зоны и определяются путем дифференцирования характеристик намагничивания этих участков в точках, соответствующих значениям F_x , F_{xk} . Согласно (9, а, б)

$$\lambda_x = \frac{1}{k_{dx} \delta_x + \frac{1}{\mu_0}}; \quad \lambda_{xk} = \frac{1}{k_{dax} \delta_{xk} + \frac{1}{\mu_0} + \lambda_{zxk}}, \quad (13)$$

где

$$\lambda_{zx} = \frac{dB_x}{dF_{zx}} = \lambda_{zx}(F_{zx}); \quad \lambda_{zxk} = \frac{dB_{xk}}{dF_{zxk}} = \lambda_{zxk}(F_{zxk}) \quad (14)$$

— удельные локальные дифференциальные магнитные проводимости зубцового слоя в точках x соответственно в зоне ГП и в зоне коммутации.

В дальнейшем для краткости записи частные производные по некоторой переменной будем отмечать верхним индексом, обозначающим эту переменную; условия постоянства других переменных отмечать не будем, помня, однако, об их существовании.

Для определения производных $F_x^{i_a}$ и $F_{xk}^{i_a}$ представим (6а, б) в виде:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= T_f + T_n + T_{ax} - F_f - \\ &\quad - \frac{1}{2} (F_{a1} + F_{a2} + F_{c1} + F_{c2}); \\ F_{xk} &= T_{axk} - T_d - F_d + \\ &\quad + \frac{1}{2} (F_{a1} - F_{a2} + F_{c1} - F_{c2}). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Из (15) видно, что F_x и F_{xk} являются сложными функциями i_a , поэтому

$$\left. \begin{aligned} F_x^{i_a} &= F_x^{T_n} \frac{dT_n}{di_a} + F_x^{T_d} \frac{dT_d}{di_a} + F_x^{T_{ax}} \frac{dT_{ax}}{di_a}; \\ F_{xk}^{i_a} &= F_{xk}^{T_n} \frac{dT_n}{di_a} + F_{xk}^{T_d} \frac{dT_d}{di_a} + F_{xk}^{T_{ax}} \frac{dT_{ax}}{di_a}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Продифференцировав (15) поочередно по T_n , T_d , T_{ax} и положив остальные н. с. постоянными, получим:

$$\left. \begin{aligned} F_x^{T_n} &= 1 - F_f^{T_n} - \frac{1}{2} (F_{a1}^{T_n} + F_{a2}^{T_n} + F_{c1}^{T_n} + F_{c2}^{T_n}); \\ F_{xk}^{T_n} &= - F_d^{T_n} + \frac{1}{2} (F_{a1}^{T_n} - F_{a2}^{T_n} + F_{c1}^{T_n} - F_{c2}^{T_n}); \\ F_x^{T_d} &= \frac{2x}{\tau} - F_f^{T_d} - \frac{1}{2} (F_{a1}^{T_d} + F_{a2}^{T_d} + F_{c1}^{T_d} + F_{c2}^{T_d}); \\ F_{xk}^{T_d} &= \frac{2x}{\tau} - F_d^{T_d} + \frac{1}{2} (F_{a1}^{T_d} - F_{a2}^{T_d} + F_{c1}^{T_d} - F_{c2}^{T_d}); \\ F_x^{T_{ax}} &= - F_f^{T_{ax}} - \frac{1}{2} (F_{a1}^{T_{ax}} + F_{a2}^{T_{ax}} + F_{c1}^{T_{ax}} + F_{c2}^{T_{ax}}); \\ F_{xk}^{T_{ax}} &= - 1 - F_d^{T_{ax}} + \frac{1}{2} (F_{a1}^{T_{ax}} - F_{a2}^{T_{ax}} + F_{c1}^{T_{ax}} - F_{c2}^{T_{ax}}). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Из (10) имеем:

$$\frac{dT_n}{di_a} = \frac{\omega_n}{a_n}; \quad \frac{dT_d}{di_a} = \frac{\omega_d}{a_d}; \quad \frac{dT_{ax}}{di_a} = \frac{N}{8ap_0}. \quad (18)$$

Подставив (16) в (12), с учетом (17), (18) после несложных преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} L_{aa} &= L_s + \left(\frac{N}{2a} \right)^2 \frac{1}{4p_0} \left[2(\Lambda_{aa} + \Lambda_{aak}) - \right. \\ &\quad - \frac{1}{2} \Lambda_{af} (F_{a1}^{T_a} + F_{a2}^{T_a} + F_{c1}^{T_a} + F_{c2}^{T_a}) - \Lambda_{af} F_f^{T_a} + \\ &\quad + \frac{1}{2} \Lambda_{ak} (F_{a1}^{T_a} - F_{a2}^{T_a} + F_{c1}^{T_a} - F_{c2}^{T_a}) - \Lambda_{ak} F_{xk}^{T_a} \left. \right] + \\ &\quad + \frac{N}{2a} \frac{\omega_n}{a_n} \left[\Lambda_{af} (1 - F_f^{T_n}) - \frac{1}{2} \Lambda_{af} (F_{a1}^{T_n} + F_{a2}^{T_n} + \right. \\ &\quad \left. + F_{c1}^{T_n} + F_{c2}^{T_n}) + \frac{1}{2} \Lambda_{ak} (F_{a1}^{T_n} - F_{a2}^{T_n} + F_{c1}^{T_n} - F_{c2}^{T_n}) - \right. \\ &\quad \left. - \Lambda_{ak} F_{xk}^{T_n} \right] - \frac{N}{2a} \frac{\omega_d}{a_d} \left[\Lambda_{af} F_f^{T_d} + \frac{1}{2} \Lambda_{af} (F_{a1}^{T_d} + F_{a2}^{T_d} + \right. \\ &\quad \left. + F_{c1}^{T_d} + F_{c2}^{T_d}) + \frac{1}{2} \Lambda_{ak} (F_{a1}^{T_d} - F_{a2}^{T_d} + F_{c1}^{T_d} - F_{c2}^{T_d}) - \right. \\ &\quad \left. - \Lambda_{ak} F_{xk}^{T_d} \right] \end{aligned} \right]$$

$$+ F_{c1}^T + F_{c2}^T) - \frac{1}{2} \Lambda_{ak} (F_{a1}^T - F_{a2}^T + F_{c1}^T - F_{c2}^T) + \\ + \Lambda_{ak} (1 + F_{\pi}^T)], \quad (19)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_{af} &= \frac{l_{\delta}}{\tau} \int_{-c}^c \lambda_x x dx; \quad \Lambda_{aa} = \frac{l_{\delta}}{\tau^2} \int_{-c}^c \lambda_x x^2 dx; \\ \Lambda_{ak} &= 2 \frac{l_{\delta}}{\tau} \int_c^{\tau/2} \lambda_{xk} x dx; \quad \Lambda_{aak} = 2 \frac{l_{\delta}}{\tau^2} \int_c^{\tau/2} \lambda_{xk} x^2 dx. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Для определения производных вида F_{α}^T ($\beta = f, \pi, a, d, a = g, d, a1, a2, c1, c2$), входящих в (19), (21), продифференцируем систему (5)–(7) с учетом (8) поочередно по н. с. T_f, T_{π}, T_d, T_a , полагая остальные н. с. постоянными. После несложных преобразований получим системы уравнений, которые удобнее записать в матричной форме:

$$K \cdot F^T_f = A^T_f; \quad K \cdot F^T_{\pi} = A^T_{\pi}; \quad (23a, б)$$

$$K \cdot F^T_a = A^T_a; \quad K \cdot F^T_d = A^T_d, \quad (23b, г)$$

где

$$K = \begin{bmatrix} \left(D + \frac{\Lambda_r}{\Lambda_{ff}} \right) & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \left(\frac{1}{2} + \frac{\Lambda_{\sigma}}{\Lambda_{ff}} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{\Lambda_{\sigma}}{\Lambda_{ff}} \right) \\ 0 & \left(C + \frac{\Lambda_{\pi}}{\Lambda_{kk}} \right) & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\left(\frac{1}{2} + \frac{\Lambda_{\sigma}}{\Lambda_{kk}} \right) \left(\frac{1}{2} + \frac{\Lambda_{\sigma}}{\Lambda_{kk}} \right) \\ 1 & 0 & \left(\frac{1}{2} + \frac{\Lambda_{a1}}{\Lambda_{ff}} \right) & \left(\frac{1}{2} + \frac{\Lambda_{a2}}{\Lambda_{ff}} \right) & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & -\left(\frac{1}{2} + \frac{\Lambda_{a1}}{\Lambda_{kk}} \right) & \left(\frac{1}{2} + \frac{\Lambda_{a2}}{\Lambda_{kk}} \right) & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ (\Lambda_r + \Lambda_{\sigma f}) & 0 & 0 & 0 & -\Lambda_{c1} & -\Lambda_{c2} \\ 0 & (\Lambda_{\pi} + \Lambda_{qD}) & 0 & 0 & \Lambda_{c1} & -\Lambda_{c2} \end{bmatrix}; \quad (24)$$

$$\Lambda_{ff} = l_{\delta} \int_{-c}^c \lambda_x dx; \quad \Lambda_{kk} = 2l_{\delta} \int_c^{\tau/2} \lambda_{xk} dx \quad (25)$$

Аналогично получим выражения для остальных индуктивностей. Ниже приведены окончательные формулы:

$$\left. \begin{aligned} L_{af} &= \frac{N}{2a} \frac{w_f}{a_f} \left[\Lambda_{af} (1 - F_r^T) - \frac{1}{2} \Lambda_{af} (F_{a1}^T + F_{a2}^T + \right. \\ &+ F_{c1}^T + F_{c2}^T) - \Lambda_{ak} F_{\pi}^T + \frac{1}{2} \Lambda_{ak} (F_{a1}^T - \\ &- F_{a2}^T + F_{c1}^T - F_{c2}^T) \right]; \\ L_{ff} &= 2p_0 \left(\frac{w_f}{a_f} \right)^2 \Lambda_r F_r^T; \\ L_{fr} &= 2p_0 \frac{w_f}{a_f} \Lambda_r \left(\frac{w_{\pi}}{a_{\pi}} F_{\pi}^T + \frac{w_d}{a_d} F_{\pi}^T + \frac{N}{8ap_0} F_{\pi}^T \right); \\ L_{pa} &= 2p_0 \frac{w_{\pi}}{a_{\pi}} \Lambda_r \left(\frac{w_{\pi}}{a_{\pi}} F_{\pi}^T + \frac{w_d}{a_d} F_{\pi}^T + \frac{N}{8ap_0} F_{\pi}^T \right); \\ L_{da} &= 2p_0 \frac{w_d}{a_d} \Lambda_r \left(\frac{w_{\pi}}{a_{\pi}} F_{\pi}^T + \frac{w_d}{a_d} F_{\pi}^T + \frac{N}{8ap_0} F_{\pi}^T \right); \\ L_{pf} &= 2p_0 \frac{w_{\pi}}{a_{\pi}} \frac{w_f}{a_f} \Lambda_r F_r^T; \quad L_{df} = 2p_0 \frac{w_d}{a_d} \frac{w_f}{a_f} \Lambda_r F_r^T, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где

$$\Lambda_r = \frac{d\Phi_r}{dF_r} = \Lambda_r (F_r); \quad \Lambda_d = \frac{d\Phi_d}{dF_d} = \Lambda_d (F_d) \quad (22)$$

— дифференциальные магнитные проводимости ГП и ДП, которые определяются путем дифференцирования их характеристик намагничивания в точках, соответствующих значениям F_r и F_d .

— суммарные магнитные проводимости активного слоя соответственно в зоне ГП и в зоне коммутации;

$$\Lambda_{a1} = \frac{d\Phi_{a1}}{dF_{a1}} = \Lambda_{a1} (F_{a1}); \quad \Lambda_{a2} = \frac{d\Phi_{a2}}{dF_{a2}} = \Lambda_{a2} (F_{a2}); \\ \Lambda_{c1} = \frac{d\Phi_{c1}}{dF_{c1}} = \Lambda_{c1} (F_{c1}); \quad \Lambda_{c2} = \frac{d\Phi_{c2}}{dF_{c2}} = \Lambda_{c2} (F_{c2}) \quad (26)$$

— дифференциальные магнитные проводимости участков ярма якоря и станины;

$$D = 1 + \frac{\Lambda_{\sigma f} + 2\Lambda_{\sigma}}{\Lambda_{ff}}; \quad C = 1 + \frac{\Lambda_{qD} + 2\Lambda_{\sigma}}{\Lambda_{kk}}$$

$$F^T_f = \begin{bmatrix} F_r^T \\ F_d^T \\ F_{a1}^T \\ F_{a2}^T \\ F_{c1}^T \\ F_{c2}^T \end{bmatrix}; \quad F^T_{\pi} = \begin{bmatrix} F_{\pi}^T \\ F_{\pi}^T \\ F_{a1}^T \\ F_{a2}^T \\ F_{c1}^T \\ F_{c2}^T \end{bmatrix}; \quad F^T_a = \begin{bmatrix} F_a^T \\ F_d^T \\ F_{a1}^T \\ F_{a2}^T \\ F_{c1}^T \\ F_{c2}^T \end{bmatrix};$$

$$F^T_d = \begin{bmatrix} F_d^T \\ F_d^T \\ F_{a1}^T \\ F_{a2}^T \\ F_{c1}^T \\ F_{c2}^T \end{bmatrix}; \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
 A^{T_f} &= \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \Lambda_{\sigma_f} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad A^{T_n} = \begin{bmatrix} D \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \Lambda_{\sigma_f} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad A^{T_d} = \begin{bmatrix} 0 \\ -C \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ -\Lambda_{\sigma_d} \end{bmatrix}; \\
 A^{T_a} &= \begin{bmatrix} 2 \frac{\Lambda_{af}}{\Lambda_{ff}} \\ 2 \frac{\Lambda_{ak}}{\Lambda_{kk}} \\ 2 \frac{\Lambda_{af}}{\Lambda_{ff}} \\ 2 \frac{\Lambda_{ak}}{\Lambda_{kk}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (28)
 \end{aligned}$$

Уравнения (23a) и (23b) имеют одинаковые матрицы коэффициентов и матрицы правых частей, поэтому $F_a^{T_f} = F_a^{T_n}$. С физической точки зрения это очевидно, поскольку ОНВ и ОПВ размещены на главном полюсе, и влияние приращений н. с. этих обмоток на магнитное состояние машины равноценно.

При расчетах на ЦВМ активная зона в пределах полюсного деления подразделяется на достаточно большое число равновеликих участков, на каждом из которых магнитная индукция может быть принята постоянной, а определенные интегралы (20), (25) заменены суммами:

$$\left. \begin{aligned}
 \Lambda_{ff} &= l_\delta \sum_{j=1}^n \lambda_{xj} \Delta x; \quad \Lambda_{kk} = 2l_\delta \sum_{j=1}^{m/2} \lambda_{xkj} \Delta x; \\
 \Lambda_{af} &= \frac{l_\delta}{\tau} \sum_{j=1}^{m/2} \lambda_{xkj} x_j \Delta x; \\
 \Lambda_{aa} &= \frac{l_\delta}{\tau^2} \sum_{j=1}^n \lambda_{xj} x_j^2 \Delta x; \\
 \Lambda_{akk} &= 2 \frac{l_\delta}{\tau^2} \sum_{j=1}^{m/2} \lambda_{xkj} x_j^2 \Delta x,
 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

где n, m — количество участков соответственно в зоне ГП и в зоне коммутации.

В память ЦВМ вводятся следующие исходные данные: обмоточные данные ($w_f, w_n, w_d, N, a_f, a_n, a_d, 2a, p_0$); геометрические размеры $\Delta x, l_\delta, \tau, b_k$; количества n, m участков активного слоя; величины воздушного зазора, соответствующие каждому из этих участков; магнитные проводимости $\Lambda_a, \Lambda_{\sigma_f}, \Lambda_{\sigma_d}$; зависимости (14), (22), (26) в виде кусочно-линейных аппроксимаций (это соответствует аппроксимации характеристик намагничивания отрезками парабол второй степени, и, следовательно, точность аппроксимации нелинейных свойств участков магнитной цепи при достаточноном количестве отрезков оказывается достаточно высокой).

Проиллюстрируем алгоритм расчета индуктивностей МПТ на примере расчета зависимостей $L_{ff} = L_{ff}(i_f), L_{nf} = L_{nf}(i_f)$ при $i_n = i_{\text{яз}}$ (индексом «з» обозначено заданное значение тока). Расчет выполняется согласно операторной схеме:

$$\begin{aligned}
 &H_1 \mathcal{Z}_2 A_3 \overset{\downarrow}{E}_4^{18} (17, 18) A_5 A_6 A_7 \overset{\uparrow}{P}_8^{14} \overset{\downarrow}{E}_9^{15} (17, 18) \times \\
 &\times A_{10} A_{11} A_{12} H_{13} A_{14} \overset{\uparrow}{P}_{15}^{9} \mathcal{R}_{16}; \quad A_{17} A_{18}.
 \end{aligned}$$

Содержание операторов: H_1 — ввод программы расчета и исходных данных; \mathcal{Z}_2 — засылка нулей в ячейки для i_f, i_n и массив ячеек для F_a, F_{zx}, F_{zkk} ;

A_3 — вычисление $\frac{k_{\delta k} \delta x}{\mu_0}$ для всех участков активного слоя и засылка в массив ячеек; $E_4 (17, 18)$ — оператор обращения к последовательности операторов $A_{17} A_{18}$ с возвратом к оператору A_5 ; A_5 — формирование матриц правых частей (28); A_6 — решение систем уравнений (23); A_7 — вычисление приращений магнитных напряжений на участках магнитной цепи по формулам:

$$\begin{aligned}
 \Delta F_a &= \left(\frac{w_n}{a_n} F_a^{T_n} + \frac{N}{8ap_0} F_a^{T_d} + \frac{w_n}{a_n} F_a^{T_d} \right) \Delta i_n; \\
 \Delta F_x &= \left(\frac{N}{2a \cdot 2p_0 \tau} x + \frac{w_n}{a_n} \right) \Delta i_n - \Delta F_r - \\
 &- \frac{1}{2} (\Delta F_{a1} + \Delta F_{a2} + \Delta F_{c1} + \Delta F_{c2}); \\
 \Delta F_{zx} &= \left(\frac{N}{2a \cdot 2p_0 \tau} x + \frac{w_n}{a_n} \right) \Delta i_n - \Delta F_d + \\
 &+ \frac{1}{2} (\Delta F_{a1} - \Delta F_{a2} + \Delta F_{c1} - \Delta F_{c2}); \\
 \Delta F_{zkk} &= \Delta F_x \left(1 - \frac{k_{\delta x} \delta x}{\mu_0} \lambda_x \right); \\
 \Delta F_{zkk} &= \Delta F_{zx} \left(1 - \frac{k_{\delta dx} \delta dx}{\mu_0} \lambda_{zx} \right),
 \end{aligned}$$

вычисление новых значений магнитных напряжений, тока i_f и их засылка на места прежних значений; P_8 — проверка условия $i_n < i_{\text{яз}}$, при выполнении условия — переход к $E_4 (17, 18)$ — оператор обращения к последовательности операторов $A_{17} A_{18}$ с возвратом к оператору A_{10} ; A_{10} — формирование матрицы правой части системы уравнений (23a); A_{11} — решение системы (23a); A_{12} — вычисление L_{ff} и L_{nf} согласно (4), (21); H_{13} — печать значений $i_f, L_{ff}, L_{nf}, A_{14}$ — вычисление приращений магнитных напряжений на участках магнитной цепи:

$$\begin{aligned}
 \Delta F_a &= \frac{w_f}{a_f} F_a^{T_f} \Delta i_f; \quad \Delta F_x = \frac{w_f}{a_f} \Delta i_f - \Delta F_r - \\
 &- \frac{1}{2} (\Delta F_{a1} + \Delta F_{a2} + \Delta F_{c1} + \Delta F_{c2});
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta F_{zx} &= -\Delta F_d - \frac{1}{2} (\Delta F_{a1} - \Delta F_{a2} + \Delta F_{c1} - \Delta F_{c2}); \\
 \Delta F_{zkk} &= \Delta F_x \left(1 - \frac{k_{\delta x} \delta x}{\mu_0} \lambda_x \right); \\
 \Delta F_{zkk} &= \Delta F_{zx} \left(1 - \frac{k_{\delta dx} \delta dx}{\mu_0} \lambda_{zx} \right),
 \end{aligned}$$

вычисление новых значений магнитных напряжений, тока i_f и их засылка на места прежних значений; P_{45} — проверка условия $i_f < i_{\text{яз}}$, при выполнении усло-

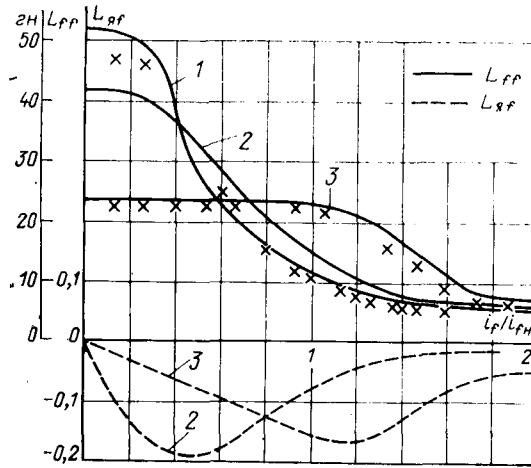


Рис. 2. Расчетные зависимости $L_{ff}=L_{ff}(i_f)$ и $L_{af}=L_{af}(i_f)$ машины П-61 при отключенной последовательной обмотке возбуждения и неизменных токах i_a .
1 — при $i_a=0$; 2 — при $i_a=i_{aH}$; 3 — при $i_a=3i_{aH}$.

вия — переход к E_9 (17, 18); \mathcal{Y}_{16} — останов; A_{17} — вычисление проводимостей (13), (14), (20), (22), (25) и (26); A_{18} — формирование матрицы коэффициентов K (24).

Изложенная операторная схема соответствует алгоритму численного интегрирования систем нелинейных дифференциальных уравнений методом Эйлера. Решение задачи методом Рунге-Кутта не представляет принципиальных затруднений, однако требует для изложения значительно больше места, поэтому мы его здесь не приводим.

На основе разработанного алгоритма составлена рабочая программа для ЦВМ «Минск-22» и рассчитаны зависимости индуктивностей машины П-61 ($P_H=9$ квт, $U_H=230$ в, $i_{aH}=39,1$ а, $i_{fH}=1,5$ а, $n_H=1450$ об/мин) от токов i_f , i_a . На рис. 2 и 3 представлены расчетные зависимости при отключенной стабилизирующей обмотке.

Остановимся кратко на физическом объяснении полученных зависимостей, исходя из нелинейности характеристики намагничивания активного слоя, представляющего наибольшее сопротивление на пути рабочего магнитного потока.

Для примера рассмотрим зависимости $L_{ff}=L_{ff}(i_f)$ и $L_{af}=L_{af}(i_f)$ (рис. 2). При $i_a=0$ магнитная индукция, а следовательно, и проводимость λ_x распределены симметрично относительно оси ГП. Приращения н. с. ОНВ вызывают приращения рабочего поля, симметричные относительно оси ГП, вследствие чего отсутствует поперечная составляющая рабочего поля и $L_{af}=0$. С ростом тока i_f при $i_a=0$ все большее число участков активного слоя с обеих сторон полюсного наконечника насыщается, вследствие чего суммарная проводимость активного слоя Λ_{ff} , а вместе с ней и L_{ff} , уменьшаются.

При $i_a \neq 0$ вследствие совместного действия н. с. ОЯ и ОНВ результирующая н. с., а следовательно, и магнитная индукция распределены несимметрично относительно оси ГП, что обусловливает и несимметричное распределение проводимости λ_x . При этом приращения н. с. ОНВ вызывают приращения рабочего поля, несимметричные по отношению к оси

ГП и, следовательно, содержащие как продольную, так и поперечную составляющие. Изменение поперечной составляющей рабочего поля при изменении н. с. ОНВ обусловливает наличие индуктивной связи, определяемой индуктивностью L_{af} . Из рис. 2 видно, что при $i_a=\text{const}$ и увеличении i_f L_{af} по абсолютной величине вначале возрастает, а затем падает. Объясняется это тем, что вначале с ростом н. с. ОНВ все большее число участков активного слоя под размагничиваемым краем полюсного наконечника переходит в ненасыщенное состояние, и, следовательно, λ_x на этой части увеличивается, тогда как под намагничиваемым краем λ_x уменьшается незначительно. Поэтому суммарный эффект сводится к увеличению несимметрии распределения λ_x относительно оси ГП, а следовательно, и L_{af} . При дальнейшем же увеличении н. с. ОНВ активный слой под размагничиваемым краем полюсного наконечника переходит в насыщенное состояние, при этом несимметрия распределения λ_x относительно оси ГП, а вместе с ней и L_{af} , уменьшаются.

Индуктивность L_{ff} с увеличением тока i_a уменьшается в области малых значений тока i_f и увеличивается в области больших значений. Это объясняется тем, что при небольших н. с. ОЯ, тем больше число участков активного слоя под размагничиваемым краем полюсного наконечника находится в насыщенном состоянии, а следовательно, тем меньше суммарная проводимость Λ_{ff} и индуктивность L_{ff} . При больших же значениях н. с. ОНВ чем больше н. с. ОЯ, тем большее число участков активного слоя под размагничиваемым краем полюсного наконечника ненасыщено, и тем больше Λ_{ff} , а следовательно, и L_{ff} .

Зависимости индуктивностей от тока i_a (рис. 3) имеют такое же простое физическое объяснение на основе анализа магнитного состояния активного слоя и добавочных полюсов.

Для проверки предлагаемого способа расчета проведено опытное определение индуктивностей L_{ff} и $L_{af}=L_{af}(i_f)$ машины П-61.

Опыт проводился следующим образом. К обмотке последовательного возбуждения, служащей датчиком, подключался милливеберметр и измерялось потокосцепление ψ_f ОНВ при включении тока возбуждения заторможенной машины. Измерение про-

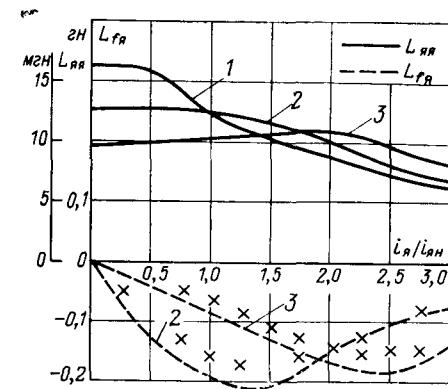
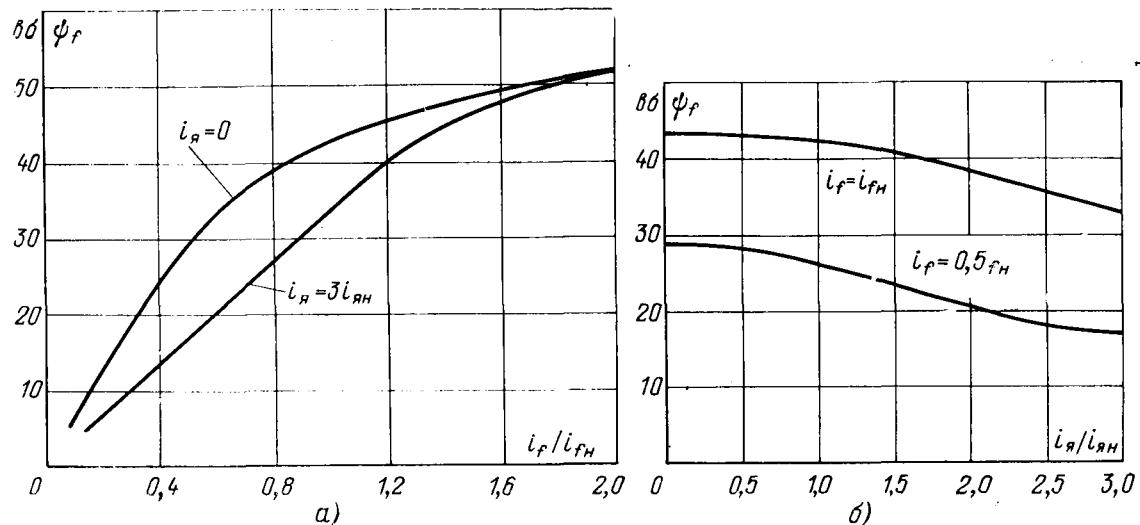


Рис. 3. Расчетные зависимости $L_{ff}=L_{ff}(i_f)$ и $L_{af}=L_{af}(i_f)$ машины П-61 при отключенной последовательной обмотке возбуждения и неизменных токах i_a .
1 — при $i_f=0$; 2 — при $i_f=0,5i_{fH}$; 3 — при $i_f=i_{fH}$.

Рис. 4. Опытные зависимости потокосцепления ψ_f от токов i_f , i_y для машины П-61.

водилось для различных значений токов i_f , i_y . Опытные кривые $\psi_f = \psi_f(i_f)$ при $i_y = \text{const}$ и $\psi_f = \psi_f(i_y)$ при $i_f = \text{const}$, полученные по этим данным, представлены на рис. 4. Индуктивности L_{ff} , L_{fy} определялись согласно (3ж, з). Производные $d\psi_f/di_y$ и $d\psi_f/di_f$ рассчитывались численным дифференцированием опытных кривых [Л. 7]. Полученные таким образом опытные значения индуктивностей нанесены на рис. 2 и 3 крестиками.

Выводы. 1. Предлагаемый метод позволяет определить индуктивности машины постоянного тока при любой совокупности токов i_f , i_y с учетом нелинейности характеристик намагничивания всех участков ее магнитной цепи и неравномерности воздушного зазора вдоль полюсной дуги. Предложенные выражения для расчета индуктивностей удобны для программирования, так как позволяют использовать стандартные подпрограммы ЦВМ.

2. Особенности метода: достаточно высокая точность, обеспечиваемая точностью расчета электромагнитных связей в машине в соответствии с принятыми допущениями; учет взаимосвязи всех кон-

туров машины; простота вносимой в память ЦВМ исходной информации о нелинейных свойствах магнитопровода (одномерные функции).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нелинейность электрических параметров малых машин постоянного тока.—«Изв. Томского политехнического института», 1967, т. 172. Авт.: В. М. Аршинский, А. А. Луконин, В. И. Кузьмин, В. Л. Киршиер.
2. Фетисов В. В. Расчет индуктивности якорной цепи неисполненной машины постоянного тока с учетом насыщения зубцовой зоны.—«Изв. вузов. Электромеханика», 1962, № 11.
3. Рунов Ю. А. Индуктивность якорной обмотки машины постоянного тока.—«Электротехника», 1965, № 6.
4. Фильц Р. В., Глухивский Л. И. Основные положения магнитно-нелинейной теории явнополюсной синхронной машины.—«Электричество», 1970, № 6.
5. Фильц Р. В., Глухивский Л. И. Расчет статических характеристик насыщенных явнополюсных синхронных машин.—«Электричество», 1971, № 3.
6. Находкин М. Д. и др. Проектирование тяговых электрических машин. М., «Транспорт», 1967.
7. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. М., «Наука», 1970.

[22.8.1973]



Критериальная оценка электромагнитных явлений в тонкой ферромагнитной пластине, находящейся в однородном магнитном переменном поле

Доктор техн. наук ИВАНОВ-СМОЛЕНСКИЙ А. В., инж. АБРАМКИН Ю. В.

Московский энергетический институт

Большой практический интерес к величине потерь на перемагничивание шихтованных сердечников электрических машин и электротехнических устройств, в которых встречаются такие элементы, и возрастающие требования к точности расчета этих потерь обуславливают необходимость учета при решении соответствующей задачи таких свойств ферромагнитных материалов, как нелинейность и гистерезис. Однако очевидно, что строгое аналитическое решение подобной задачи без привлечения ЦВМ практически неосуществимо. С другой стороны, иногда и аналитический путь исследования, например проникновения плоской электромагнитной волны в ферромагнитное полупространство с учетом нелинейности среды, приводит к хорошо согласуемым с практикой решениям [Л. 1]. Формулы для расчета потерь в массивных ферромагнитных элементах, находящихся в переменном магнитном поле [Л. 1], весьма просты и наиболее точно совпадают с экспериментально измеренными для сильных магнитных полей при резком проявлении поверхностного эффекта.

В отличие от рассмотренного в [Л. 1] случая плоская электромагнитная волна в тонкой ферромагнитной пластине распространяется по всему ее объему. При анализе электромагнитных явлений в такой пластине в линейном приближении обычно [Л. 2] магнитная проницаемость рассматривается как действительная величина. Представляет интерес исследовать известное решение однородного волнового уравнения Гельмгольца (см., например, [Л. 2]) распространения плоской электромагнитной волны в тонкой пластине при условии, что магнитная проницаемость по-прежнему постоянна, но является комплексной $\mu = \mu e^{-j\beta}$ [Л. 3].

Ниже показан способ оценки в наиболее общей критериальной форме полных электромагнитных потерь, называемых также потерями на перемагничивание [Л. 2], и их составляющих: потери от вихревых токов и потери на гистерезис. Кроме того, для рассматриваемого элемента (рис. 1), представляющего собой часть плоского кольца длиной c , приводится электрическая схема замещения, параметры которой выражаются также в критериальной форме. Первичная обмотка у кольца намотана с плотностью w_1/c витков на единицу длины, радиус сечения равен бесконечности и ширина τ существенно больше толщины $2a$.

Например, согласно [Л. 2] с учетом комплексной магнитной проницаемости $\mu = \mu e^{-j\beta}$ изменение действующих значений напряженности магнитного поля и плотности вихревых токов внутри пластины (рис. 1) может быть представлено выражениями:

$$\dot{H}_z = \dot{H}_a \frac{\operatorname{ch} \frac{2\pi x}{\lambda}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi a}{\lambda}}, \quad \dot{\delta}_y = -\dot{H}_a \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi x}{\lambda}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi a}{\lambda}}, \quad (1)$$

где

$$\left. \begin{aligned} x &= k_1 + jk_2; \\ k_1 &= k \cos(\pi/4 - \beta/2); \\ k_2 &= k \sin(\pi/4 - \beta/2); \\ k &= a \sqrt{\omega_1 \mu}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для последующих выводов важно знать распределение напряженности электрического поля \dot{E}_a на наружной поверхности пластины. Из второго уравнения (1) следует, что

$$\dot{E}_a = \frac{\dot{\delta}_a}{\gamma} = -\frac{\dot{H}_a}{\gamma} \times \operatorname{th} \frac{2\pi a}{\lambda}. \quad (3)$$

Кроме того, отметим еще, что в условиях рассматриваемой задачи напряженность магнитного поля на наружной поверхности пластины определяется внешним магнитным полем и в соответствии с законом полного тока связана с первичным током соотношением:

$$\dot{H}_a = \frac{I_1 w_1}{c}. \quad (4)$$

Полные электромагнитные потери в ферромагнитной пластине согласно теореме Умова — Пойнтинга могут быть найдены как реальная часть P_Σ некоторой комплексной мощности \dot{S} , получающейся в результате интегрирования по наружной поверхности пластины вектора плотности потока мощности $\dot{P} = [\dot{E}_a \times \dot{H}_a]$:

$$\dot{S} = P_\Sigma + jQ = -\oint [\dot{E}_a \times \dot{H}_a] d\theta. \quad (5)$$

Поскольку $\tau \gg 2a$, потоком мощности через узкие боковые грани пластины можно пренебречь ввиду его малости в сравнении с потоком мощности через широкие боковые грани. Поэтому после подстановки в (5) \dot{E}_a из (3) и последующих преобразований получим:

$$\dot{S} = -\dot{E}_a \dot{H}_a 2\pi c = \frac{2\pi c}{\gamma} H_a^2 \operatorname{th} \frac{2\pi a}{\lambda}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) вместо th его выражение из (2), получим выражения для P_Σ и Q :

$$Q = \frac{2\pi c}{\gamma a} H_a^2 \left(\frac{k_2 \operatorname{sh} 2k_1 + k_1 \operatorname{sin} 2k_2}{\operatorname{ch} 2k_1 + \operatorname{cos} 2k_2} \right); \quad (7)$$

$$P_\Sigma = \frac{2\pi c}{\gamma a} H_a^2 \left(\frac{k_1 \operatorname{sh} 2k_1 - k_2 \operatorname{sin} 2k_2}{\operatorname{ch} 2k_1 + \operatorname{cos} 2k_2} \right). \quad (8)$$

Чтобы выделить из мощности полных электромагнитных потерь ту ее часть, которая обусловлена потерями от вихревых токов, воспользуемся законом Джоуля — Ленца:

$$P_B = \frac{2\pi c}{\gamma} \int_0^a |\dot{\delta}_y|^2 dx = \frac{2\pi c}{\gamma a} H_a^2 \frac{(k_2 \operatorname{sh} 2k_1 - k_1 \operatorname{sin} 2k_2)}{\operatorname{cos} \beta (\operatorname{ch} 2k_1 + \operatorname{cos} 2k_2)}. \quad (9)$$

Рассматривая совместно (8) и (9), определяем потери на гистерезис:

$$P_H = P_\Sigma - P_B = \frac{2\pi c}{\gamma a} H_a^2 \operatorname{tg} \beta \frac{k_2 \operatorname{sh} 2k_1 + k_1 \operatorname{sin} 2k_2}{\operatorname{ch} 2k_1 + \operatorname{cos} 2k_2}. \quad (10)$$

Представляется практически целесообразным выразить мощности электромагнитных потерь (8), потерю от вихревых токов (9) и на гистерезис (10) в относительной форме. Удобно при этом в качестве базисной принять абсолютную величину мощности S_0 , поступающей в объем пластины при отсутствии поверхностного эффекта. Расчетное выражение для этой мощности имеет простой вид и вытекает из (6).

Если учесть, что при отсутствии поверхностного эффекта $\frac{\operatorname{th} 2\pi a}{2\pi a} \rightarrow 0$, а $\frac{\operatorname{th} 2\pi a}{\operatorname{sh} 2\pi a} \rightarrow 1$, то из (6) следует, что

$$S_0 = |S_0| = 2\pi a \omega_1 \mu H_a^2. \quad (11)$$

Очевидно, мощности потерь на перемагничивание P_Σ , от вихревых токов P_B и на гистерезис P_H могут быть рассчитаны

как произведение базисной мощности S_0 на некоторые безразмерные коэффициенты соответственно a_p , a_b , a_r , определяемые из совместного рассмотрения уравнений (8)–(10) и (11):

$$a_p = \frac{P_p}{S_0} = \frac{a_p}{a} = \frac{k_1 \sinh 2k_1 - k_2 \sin 2k_2}{k^2 (\cosh 2k_1 + \cos 2k_2)}; \quad (12)$$

$$a_b = \frac{P_b}{S_0} = \frac{a_b}{a} = \frac{k_2 \sinh 2k_1 - k_1 \sin 2k_2}{k^2 \cos \beta (\cosh 2k_1 + \cos 2k_2)}; \quad (13)$$

$$a_r = \frac{P_r}{S_0} = \frac{a_r}{a} = \frac{k_2 \sinh 2k_1 + k_1 \sin 2k_2}{k^2 (\cosh 2k_1 + \cos 2k_2)}. \quad (14)$$

Из (12)–(14) следует, что представленные в них безразмерные соотношения, умноженные на половину a толщины пластины, имеют смысл эквивалентных глубин проникновения электромагнитного поля по мощности полных электромагнитных потерь a_p , по мощности потерь от вихревых токов a_b , по мощности потерь на гистерезис a_r .

На рис. 2 представлены отдельными семействами кривых зависимости безразмерных коэффициентов a_p (пунктирная линия), a_b (сплошная линия) в функции относительного параметра k для ряда значений аргумента β комплексной магнитной проницаемости μ . Коэффициент a_r , отсутствующий на рис. 2, определяется для данного значения параметра k как разность $a_p - a_b$.

Обратимся вновь к уравнению (6) и преобразуем его, заметив, что э. д. с. $\dot{\mathcal{E}} = E_a \times 2\pi$ в контуре пластины, совпадающем с внешним очертанием поперечного сечения пластины, есть не что иное, как э. д. с. одного витка первичной обмотки. Выражая далее \dot{H}_a в (6) через первичный ток I_1 по (4) и имея в виду, что $\dot{\mathcal{E}} \omega$, есть не что иное, как э. д. с. $\dot{\mathcal{E}}_1$ первичной обмотки, комплекс мощности \dot{S} представляем в виде:

$$\dot{S} = -\dot{\mathcal{E}}_1 I_1, \quad (15)$$

где согласно сказанному выше

$$\dot{\mathcal{E}}_1 = -j\omega \dot{\mathcal{E}} = -j\omega \mu 2\pi \dot{H}_a \frac{\tanh \kappa a}{\kappa}. \quad (16)$$

Рассматривая совместно (16) и (4), определяем полное комплексное сопротивление первичному току:

$$Z_1 = -\frac{\dot{\mathcal{E}}_1}{I_1} = j\omega \mu 2\pi w_1^2 \frac{\tanh \kappa a}{\kappa c}. \quad (17)$$

Последнее уравнение в сущности и определяет электрическую схему замещения проводящего элемента (пластины). Вполне очевидно, что первичный ток I_1 можно выразить через пока еще неопределенные намагничивающий ток I_0 и приведенный к первичной обмотке вихревой ток I'_b , т. е. принять, что

$$I_1 = I_0 - I'_b. \quad (18)$$

Комплексное сопротивление Z_0 намагничивающему току I_0 может быть определено исходя из следующих соображений. Допустим, что электрическая проводимость пластины γ равна нулю, тогда первичный и намагничивающий токи совпадают, т. е.

$$I_{0/\gamma=0} = I_1 = \frac{c \dot{H}_a}{w_1}. \quad (19)$$

Заметив, что при $\gamma \rightarrow 0$ (это означает, что и $\kappa a \rightarrow 0$) отношение $\frac{\tanh \kappa a}{\kappa a} \rightarrow 1$, из совместного рассмотрения (19) и (16) получим:

$$Z_0 = \left(-\frac{\dot{\mathcal{E}}_1}{I_1} \right)_{\gamma=0} = j\omega \frac{2\pi a}{c} \mu w_1^2. \quad (20)$$

Из (20) следует, что если пластина немагнитная, комплексное сопротивление Z_0 и намагничивающий ток I_0 являются чисто реактивными. Если пластина магнитная, намагничивающий ток будет содержать еще и активную составляющую, обусловливаемую потерями на перемагничивание при отсутствии поверхностного эффекта, т. е. когда отсутствует экранирующее действие вихревых токов ($I'_b = 0$), а результатирующее магнитное поле совпадает с внешним.

Рассматривая совместно (4), (16), (18), (20), получаем, что в общем случае ($\gamma \neq 0$, $\kappa a \neq 0$) намагничивающий ток I_0 и приведенный к первичной обмотке вихревой ток I'_b определяются выражениями:

$$I_0 = \frac{c \dot{H}_a}{w_1} \frac{\tanh \kappa a}{\kappa a}; \quad (21)$$

$$I'_b = -\frac{c \dot{H}_a}{w_1} \left(1 - \frac{\tanh \kappa a}{\kappa a} \right). \quad (22)$$

Соответственно для приведенного комплексного сопротивления Z'_b вихревому току I'_b имеем:

$$Z'_b = \frac{\dot{\mathcal{E}}_1}{I'_b} = \frac{2\pi}{\gamma ac} \times \times w_1^2 \frac{(\kappa a)^2}{(\kappa a \tanh \kappa a - 1)}. \quad (23)$$

Установим соотношение между приведенным вихревым током I'_b и полным током, заключенным между осью пластины и ее краем (рис. 1) и определяем равенством:

$$I_b = c \int_0^a \delta_y dx = \oint H_z dl = -c \dot{H}_a \frac{\tanh \kappa a - 1}{\kappa a}. \quad (24)$$

С учетом (22) и (24) определяем коэффициент приведения полного тока I_b к первичной обмотке:

$$k_i = \frac{I'_b}{I_b} = \frac{\tanh \left(\frac{\kappa a}{2} \right)}{w_1 \kappa a} (\kappa a \tanh \kappa a - 1). \quad (25)$$

Интересно, в случае резкого поверхностного эффекта ($k \gg 1$) равенство (25) приводится к известному при анализе работы трансформаторов виду $k_i = w_2/w_1 = 1/w_1$, где w_2 – вторичный короткозамкнутый виток, совпадающий с внешним контуром поперечного сечения пластины. Точно также фиктивное комплексное сопротивление $Z_b = \frac{\dot{\mathcal{E}}_1}{I_b} k_i$ связано с приведенным сопротивлением Z'_b соотношением:

$$k_z = \frac{Z'_b}{Z_b} = \frac{1}{k_i^2}. \quad (26)$$

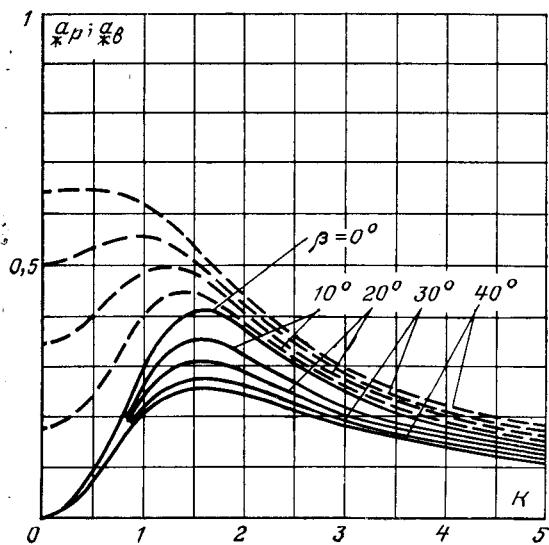


Рис. 1.

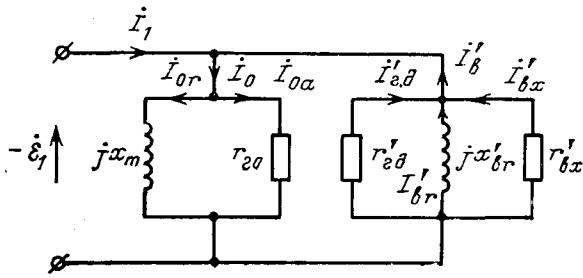


Рис. 3.

При резком поверхностном эффекте выражение (26) имеет вид:

$$k_z = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 = w_1^2.$$

В результате последующих несложных преобразований, заключающихся в выделении из полученных выше комплексных сопротивлений Z_0 и Z' в активной и реактивной составляющих, получим наиболее удобный для анализа вид электрической схемы замещения проводящего элемента (рис. 3). Оказывается, что активные и индуктивные сопротивления схемы замещения (рис. 3) весьма просто выражаются в критериальной (относительной) форме: при этом за базисное следует принять омическое сопротивление:

$$r = \tilde{r} w_1^2,$$

где

$$\tilde{r} = \frac{2\pi}{\gamma a c},$$

можно рассматривать как сопротивление постоянному току некоторого фиктивного витка в виде плоского кольца, имеющего длину в развернутом виде, равную удвоенной ширине $2t$ реальной пластины, ширину c и в 2 раза меньшую толщину a . Тогда сопротивление r можно трактовать как сопротивление этого витка, приведенное к первичной обмотке. При этих условиях, как показывает анализ, выражения для активных сопротивлений схемы замещения (рис. 3) в относительной форме

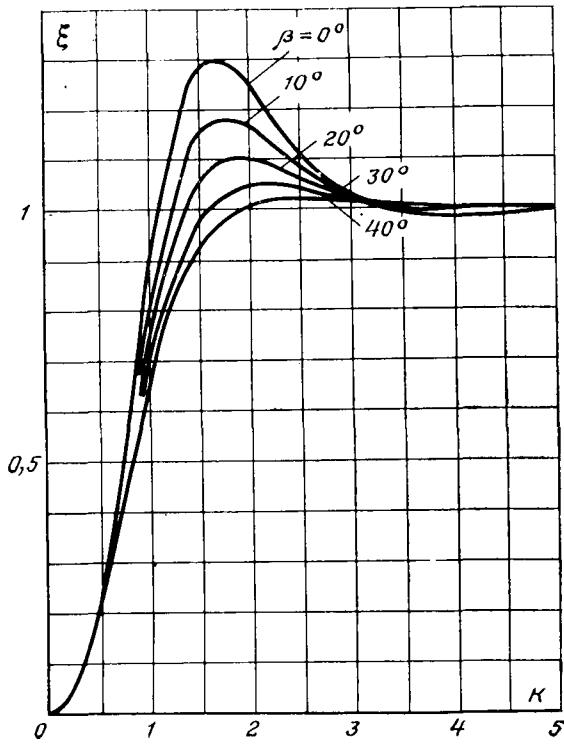


Рис. 4.

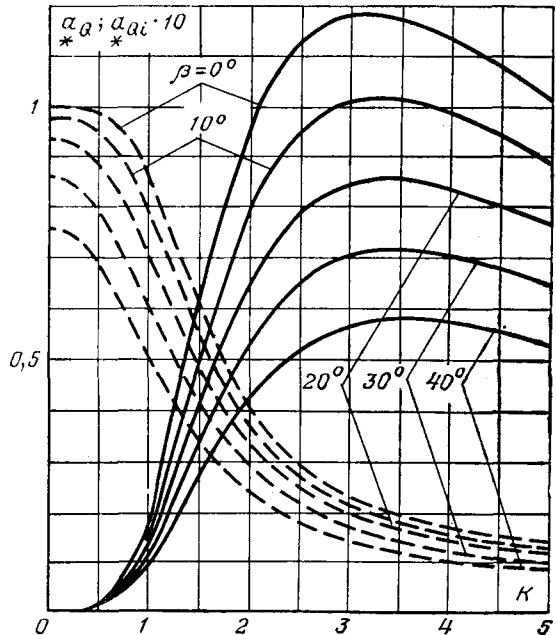


Рис. 5.

имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} r'_{* \text{вх}} &= \frac{r'_{\text{вх}}}{r} = a_{* \text{в}}^{-1} \xi; \\ r'_{\text{т. о}} &= \frac{r'_{\text{т. о}}}{r} = \frac{k^2}{\sin \beta}; \\ r'_{\text{т. д}} &= \frac{r'_{\text{т. д}}}{r} = \frac{1}{a_{* \text{т. д}} \xi^{-1} - r_{\text{т. д}}^{-1}}, \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

где ξ — некоторый безразмерный коэффициент, зависимость которого от параметра k для ряда значений аргумента β комплексной магнитной проницаемости представлена на рис. 4:

$$\xi = \frac{\sinh 2k_1 - \cos 2k_2}{\sinh 2k_1 + \cos 2k_2}.$$

Легко убедиться в том, что в сопротивлениях $r'_{\text{вх}}$, $r'_{\text{т. о}}$, $r'_{\text{т. д}}$ выделяются соответственно потери от вихревых токов, потери на гистерезис при отсутствии поверхностного эффекта, добавочные потери на гистерезис, обусловленные действительным неравномерным распределением напряженности магнитного поля вследствие экранирующего действия вихревых токов. Рассматривая совместно равенства (27), можно получить выражения:

$$r'_{* \text{т}} = \frac{r'_{\text{т}}}{r} = a_{* \text{т}}^{-1} \xi;$$

$$r'_{* \text{т. в}} = \frac{r'_{\text{т. в}}}{r} = a_{* \text{т. в}}^{-1} \xi,$$

в которых выделяются соответственно полные потери на гистерезис, полные электромагнитные потери.

Аналогично активным индуктивным параметрам схемы замещения удобно выразить в относительной форме через некоторые безразмерные коэффициенты, имеющие смысл эквивалентных глубин проникновения электромагнитного поля:

a_{*Q} — по полной реактивной мощности Q , потребляемой из первичной обмотки; a_{*Q_0} — по реактивной мощности Q_0 , эквивалентной мощности энергии магнитного поля; a_{*Q_i} — по реактивной мощности Q_i , потребляемой из первичной обмотки для компенсации размагничивающего действия вихревых токов. Согласно определению и с учетом (7), (11), (16) в итоге

несложных преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} a_{*Q} &= \frac{Q}{S_0} = \frac{a_Q}{a} = \frac{k_2 \sinh 2k_1 + k_1 \sin 2k_2}{k^2 (\cosh 2k_1 + \cos 2k_2)} = \\ &= a_r^* \operatorname{ctg} \beta; \\ a_{*Q_0} &= \frac{a_{Q_0}}{a} = \frac{Q_0}{S_0} = \frac{|\mathcal{E}_1|^2}{x_m S_0} = \frac{\cos \beta}{k^2} \xi; \\ a_{*Q_i} &= \frac{Q_i}{S_0} = a_Q - a_{*Q_0} = \cos \beta \left(\frac{a_r^*}{\sin \beta} - \frac{\xi}{k^2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Как показывает анализ, индуктивные параметры схемы замещения (рис. 3) в относительной форме имеют вид:

$$\begin{aligned} x_m &= \frac{x_m}{r} = \frac{k^2}{\cos \beta}; \\ a_{*Q_i}^* &= \frac{x_{*Q_i}^*}{r} = \frac{1}{a_r^* \xi^{-1} - x_m^{-1}}. \end{aligned}$$

Приведенные на рис. 5 семейства коэффициентов a_{*Q} (пунктирная линия), $a_{*Q_i}^*$ (сплошная линия) в функции параметров k, β удобны еще и тем, что позволяют по заданным значениям

последних и известной базисной мощности S_0 (11) сравнительно легко определить полную реактивную мощность и ее составляющие Q_0 и Q_i .

Из (28) (см. также рис. 5) видно, что при отсутствии поверхностного эффекта полная реактивная мощность, потребляемая из первичной обмотки, эквивалентна мощности энергии магнитного поля Q_0 и соответственно $Q_i=0$. Наоборот, при резком поверхностном эффекте реактивная энергия, потребляемая из первичной обмотки для образования магнитного поля взаимоиндукции, существенно меньше реактивной энергии для образования поля рассеяния вихревого тока, равной $|\mathcal{E}_1|^2 / x_m$: при этом, как нетрудно видеть из (21), (22), намагничивающий ток $I_0 \approx 0$, а $I_1 \approx -I'_v$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1949, 190 с.
- Поливанов К. М. Основы электротехники, ч. 3. М., «Энергия», 1969, 352 с.
- Поливанов К. М. Определение комплексной магнитной проницаемости вещества из эффективной комплексной проницаемости тела по методу В. К. Аркадьева. — В сб.: Проблемы ферромагнетизма и магнетодинамики. М.—Л., Изд. АН СССР, 1946, с. 29—41.

[4.2.1974]



УДК 621.313.322—81.016.35 + 621.313.322—81.013.8

Быстродействие систем возбуждения и устойчивость параллельной работы турбогенераторов

Инж. КОРЯКИН М. А., канд. техн. наук МАНГИЛЕВ В. И.

Свердловск

С применением на мощных генераторах различных систем возбуждения и регуляторов, а также их усовершенствованием появляется необходимость сравнительной оценки эффективности работы той или иной системы возбуждения в отношении повышения пределов динамической устойчивости. В настоящее время возможности возбудителей по повышению пределов динамической устойчивости оценивается коэффициентом — значением потолочного возбуждения (кратности форсировки) и скоростью нарастания напряжения на обмотке ротора.

Динамическая устойчивость генератора определяется тем, что после возмущения в энергосистеме, вызвавшего значительное изменение угла Θ , новое положение равновесия устанавливается без асинхронных проворотов, т. е. без нарушения синхронизма. В аварийных режимах при резких изменениях электрических параметров системы поддержание угла Θ в определенных границах может быть в принципе обеспечено соответствующим изменением э. д. с. генератора (тока возбуждения). На основании этого можно предположить, что в пост-аварийном режиме, например к моменту максимального вылета ротора относительный прирост величин токов возбуждения генераторов, определяемых кратностью форсировки k , постоянными времени возбудителя с АРВ (T_e) и цепи возбуждения T'_d при всех прочих равных условиях (вид, длительность, точка короткого замыкания, доаварийный и пост-аварийный режимы энергосистемы) может быть показателем, по которому можно сопоставлять эффективность различных систем возбуждения в отношении повышения пределов динамической устойчивости.

В соответствии с нормами, действующими в СССР, значение потолочного возбуждения для всех турбогенераторов устанавливается двухкратной по отношению к номинальному значению. При заданной кратности форсировки скорость нарастания напряжения на кольцах ротора при экспоненциальном характере процесса определяется постоянной времени T_e . Минимальная скорость нарастания напряжения на кольцах ротора существующими нормами принята равной двум относительным единицам в секунду (2 о. е./сек), где 1 о. е. — напряжение на кольцах ротора в номинальном режиме.

В [Л. 1 и 2] отмечается, что для современных турбогенераторов большой мощности, имеющих инерционную постоянную $H_j=5-6$ сек, первый максимальный вылет ротора достигается за время, приблизительно равное 0,5 сек.

Величина тока возбуждения генератора по отношению к номинальному значению (без учета свободных токов в момент короткого замыкания) к моменту максимального вылета при двухкратной форсировке и экспоненциальном характере процесса нарастания напряжения на кольцах ротора может быть приближенно определена по начальной скорости изменения тока, которая в свою очередь есть величина, обратная постоянной времени изменения тока в обмотке ротора. Эта постоянная слагается из постоянной времени возбудителя с АРВ T_e (постоянной времени нарастания напряжения на кольцах ротора) и постоянной времени цепи возбуждения генератора в переходном режиме T'_d и поэтому может быть названа суммарной постоянной времени изменения тока в обмотке ротора T_Σ . В соответствии с этим относительное значение тока возбуждения к моменту максимального вылета ротора, например через 0,5 сек, при сравнительно длительном процессе изменения тока в цепи возбуждения:

$$\frac{I_v}{I_{v,n}} = (k-1) \frac{0,5}{T_\Sigma} + 1. \quad (1)$$

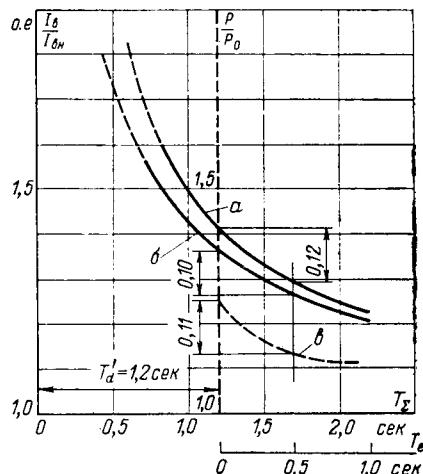
Значение тока возбуждения к моменту максимального вылета может быть более точно определена по средней скорости изменения тока v_{I_v} за время вылета.

Однотипность процесса и исходных данных дают возможность для определения v_{I_v} за время первого вылета применить формулу определения средней скорости нарастания напряжения на кольцах ротора, приведенную в ГОСТ-183-66:

$$\frac{I_v}{I_{v,n}} = v_{I_v} t + 1 = 8(k-1) \left[0,5 - T_\Sigma \left(1 - e^{-\frac{0,5}{T_\Sigma}} \right) \right] 0,5 + 1, \quad (2)$$

где $I_v/I_{v,n}$ — относительное значение тока возбуждения к моменту максимального вылета, о. е.; v_{I_v} — средняя скорость изменения тока возбуждения за время первого вылета, о. е./сек; t — нормативное время, в данном случае время первого вылета, сек; k — кратность форсировки; T_Σ — суммарная постоянная времени изменения тока в обмотке ротора.

Таблица 2



Изменения токов возбуждения через 0,5 сек с начала форсировки (*a* и *b*) и изменение предела динамической устойчивости при трехфазном коротком замыкании при изменении быстродействия возбудителя (*c*).

a — определенные по формуле (1); *b* — определенные по формуле (2).

На рисунке приведены графики изменения величины тока возбуждения по отношению к номинальному значению через 0,5 сек с момента начала форсировки в зависимости от T_Σ , вычисленные по формулам (1) и (2) при нормированной кратности форсировки $k=2$. Различия в величинах токов, подсчитанных по указанным формулам при $T_\Sigma > 1$ сек незначительны.

Для сопоставления изменения относительных значений токов возбуждения к моменту максимального вылета и изменения пределов динамической устойчивости в зависимости от быстродействия возбудителя T_e на основании опытных данных, приведенных [Л. 1] для генератора 300 Мвт, связанного с системой посредством относительно длинной линии, на рисунке построен график изменения пределов динамической устойчивости (P/P_0) при трехфазном коротком замыкании.

Минимальное значение T_Σ будет в случае применения современных безынерционных систем возбуждения с АВР сильного действия, когда $T_e \rightarrow 0$. В этом случае $T_\Sigma \approx T_d'$, т. е. скорость изменения тока возбуждения будет определяться постоянной времени цепи возбудителя в переходном режиме, которую можно определить из опыта ударного возбуждения при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора.

У современных генераторов T_d' определяется величиной в пределах 0,8–1,5 сек. На рисунке график изменения пределов динамической устойчивости генератора 300 Мвт в зависимости от T_e совмещен с графиком изменения величины тока возбуждения в зависимости от T_Σ с учетом $T_d' = 1,2$ сек, определенной из опыта ударного возбуждения для генератора

Таблица 1

| Изменение P/P_0 (по отношению к P/P_0 при работе генератора с неизменным током возбуждения) при изменении T_e и различных видах короткого замыкания | При изменении постоянной времени цепи возбудителя с АВР T_e , сек | |
|---|---|-------------|
| | от 0 до 0,1 | от 0 до 0,5 |
| Однофазное на землю | — | 14 |
| Двухфазное | — | 12,5 |
| Двухфазное на землю | — | 11,7 |
| Трехфазное | 3,6 | 10,8 |
| Прирост токов возбуждения (%) за 0,5 сек, определенный по формуле (1) | ~3 | 12 |
| по формуле (2) | ~3 | 11 |

| Тип генератора | Мощность, Мвт | T_d' , сек | Изменение прироста тока возбуждения за 0,5 сек при изменении T_e с 0,3 сек до 0 (%) |
|----------------|---------------|--------------|---|
| ТВ2-150-2 | 150 | 1,44 | 6 |
| ТВВ-150-2 | 150 | 0,9 | 14 |

ТГВ-300, работающего в блоке с трансформатором при трехфазном коротком замыкании на его выводах.

В табл. 1 на основании исследований [Л. 1] приведены значения изменений пределов динамической устойчивости (в %) при изменении быстродействия возбудителя с регулятором (при изменении T_e) и расчетные величины приростов тока возбуждения за время первого вылета при принятом значении постоянной времени цепи возбуждения $T_d' = 1,2$ сек.

Анализируя приведенные на рисунке и в табл. 1 данные, можно отметить следующее.

1. Величины, характеризующие изменение приростов тока возбуждения за время первого вылета, определенные с учетом суммарной постоянной изменения тока возбуждения T_Σ и изменения пределов динамической устойчивости при изменении постоянной возбудителя (T_e) близки друг другу, поэтому изменение приростов тока возбуждения за время первого вылета может характеризовать возможности повышения пределов динамической устойчивости увеличением быстродействия возбудителя.

2. Учитывая близкий к гиперболическому закон изменения прироста тока возбуждения в зависимости от суммарной постоянной времени T_Σ есть основания предположить, что на генераторах, имеющих менее инерционную цепь возбуждения, т. е. меньшие значения T_d' (при всех прочих равных условиях), мероприятия по увеличению скорости действия возбудителя с АВР — уменьшению T_e — в отношении повышения пределов динамической устойчивости дадут больший эффект.

В табл. 2 приведен пример изменения приростов тока возбуждения (в %) при двухкратной форсировке за принятую время первого вылета 0,5 сек для генераторов одной мощности разных типов, вычисленных по вышеприведенному выражению (2) при увеличении быстродействия возбудителя с $T_e = 0,3$ сек до $T_e = 0$, т. е. при переходе с машинного возбуждения на безынерционное тиристорное возбуждение с регулятором сильного действия.

Соответственно с отмечаемым изменением прироста тока на приведенных двух типах генераторов, имеющих отличные друг от друга постоянные времена цепи возбуждения можно предположить, что выполнение мероприятий по увеличению быстродействия возбудителей на генераторе ТВВ-150-2 с $T_e = 0,3$ сек до $T_e = 0$ в отношении увеличения пределов динамической устойчивости даст в 2,3 раза больший эффект, чем на генераторе ТВ2-150-2, на котором применение, например, безынерционного тиристорного возбудителя с АВР сильного действия в этом отношении может быть и нецелесообразно.

Вывод. Эффективность систем возбуждения мощных турбогенераторов и мероприятий по увеличению их быстродействия в отношении повышения пределов динамической устойчивости может определяться сравнением приростов токов возбуждения за время первого вылета по данным постоянных времени возбудителя с АВР T_e и цепи возбуждения генератора T_d' .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каштелян В. Е., Глебов И. А., Герценберг Г. Р. Эффективность быстродействия систем возбуждения и условия автоматического регулирования напряжения мощных турбогенераторов. — «Электричество», 1963, № 10.

2. Костенко М. П., Казовский Е. Я. Параметры и эксплуатационные характеристики современных высокоподтвержденных турбо- и гидрогенераторов. — «Электрические машины. Исследования, вопросы теории и расчета». М., АН СССР, 1965.

12.3.1973

◆ ◆ ◆

Расчет параметров эквивалентных роторных контуров синхронных машин по их экспериментальным частотным характеристикам

Канд. техн. наук РОГОЗИН Г. Г., инж. ЛАРИН А. М.

Донецк

Расчеты переходных процессов в синхронных машинах или системах, содержащих синхронные машины, путем решения дифференциальных уравнений Горева-Парка требуют задания исходной информации в форме параметров схем замещения. Последние предполагают равенство магнитного потока взаимной индукции между всеми контурами, эквивалентирующими массивные элементы в каждой оси ротора синхронной машины (рис. 1).

Метод синтеза эквивалентных схем замещения машин переменного тока [Л. 1] использует исходную информацию, получаемую в опытах затухания постоянного тока, в виде параметров, аппроксимирующих кривую затухания экспонент [Л. 2]. Получаемые при этом схемы замещения по оси d включают в себя одну из цепочек, близкую по значениям параметров активному сопротивлению и индуктивному сопротивлению рас- сеяния обмотки возбуждения синхронной машины (r_f, x_{af}).

Замена параметров указанного контура на опытные значения приводит к деформации экспериментальной характеристики в области малых значений частот. Введение дополнительного корректирующего контура в этом случае неэффективно, так как параметры этого контура оказываются переменными величинами, зависящими от частоты тока ротора.

Однако параметры синхронных машин, характеризующие активные и индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора, а также индуктивное сопротивление намагничивания, могут быть достаточно точно определены методами обычных промышленных испытаний. В этой связи экспериментальные частотные характеристики машин переменного тока при синтезе эквивалентных схем замещения целесообразно использовать только для расчета параметров контуров, отражающих демпфирующие свойства массивных конструктивных элементов ротора. Количество таких контуров и значение существенных для решения этой задачи частот должно быть предварительно исследовано для различных конструктивных исполнений ротора синхронных машин. Подобная задача ставилась в [Л. 3] для расчета частотных характеристик асинхронных двигателей.

Рассматриваемый ниже метод расчета параметров эквивалентных роторных контуров позволяет с учетом возможностей обычных промышленных испытаний построить эквивалентные схемы замещения машин переменного тока.

В соответствии со схемой замещения (рис. 1), параметры которой выражены в системе относительных единиц, входное сопротивление синхронной машины со стороны статора для оси d равно:

$$Z(js) = x_\sigma + \frac{r_s}{j} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{js}{r_f + jsx_{sf}} + \sum_{k=1}^n \frac{js}{r_{kd} + jsx_{skd}}}, \quad (1)$$

где r_s — активное сопротивление обмотки статора на фазу

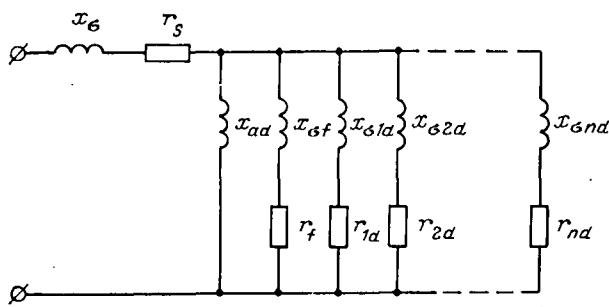


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения синхронной машины по оси d .

— проводимость эквивалентных демпферных контуров, обозначаемая в дальнейшем $\sum_{k=1}^n y_{kd} (js)$.

Учитывая, что при единичном приложенном напряжении $i_s(j) = \frac{1}{Z(is)}$, из (1) получаем:

$$\sum_{k=1}^n y_{kd}(js) = \frac{1}{\frac{1}{i_s(js)} - x_\sigma + jr_s} - \frac{1}{x_{ad}} - \frac{js}{r_f + jsx_{of}}. \quad (2)$$

Параметры роторных контуров r_{kd} , x_{okd} определяются по значениям проводимостей $\sum_{b=1}^n y_{kd}(is)$, рассчитываемых по (2)

для скольжений s_1, s_2, \dots, s_n путем решения итерационным методом следующей системы из n уравнений:

$$\begin{aligned}
 y_{1d}(js_1) &= \sum_{k=1}^n y_{kd}(js_1) - y_{2d}(js_1) - y_{3d}(js_1) - \\
 &\quad \cdots - y_{nd}(js_1); \\
 y_{2d}(js_2) &= \sum_{k=1}^n y_{kd}(js_2) - y_{1d}(js_2) - y_{3d}(js_2) - \\
 &\quad \cdots - y_{nd}(js_2); \\
 &\quad \cdots \quad \cdots \\
 y_{nd}(js_n) &= \sum_{k=1}^n y_{kd}(js_n) - y_{1d}(js_n) - y_{2d}(js_n) - \\
 &\quad \cdots - y_{n-1d}(js_n).
 \end{aligned} \tag{3}$$

В первом приближении в начале первого цикла расчета значения параметров всех контуров за исключением первого следует принять равными бесконечности.

следует принять равными бесконечности.

Очевидно, сходимость процесса итерации при использовании частотных характеристик, определяемых по методу затухания постоянного тока, всегда обеспечивается. При использовании комплексных проводимостей, определяемых для электрических машин по методу гармонических колебаний [Л. 4] или непосредственно из опытов установившегося режима (например, для асинхронных двигателей), сходимость следует проверить по критерию приведенному в [Л. 3].

В соответствии с последним, если

$$\left. \begin{array}{l} y'_{1d}(s_1) < y'_{2d}(s_2) < \dots < y'_{nd}(s_n); \\ \alpha'_{1-d}(s_1) < \alpha'_{2-d}(s_2) < \dots < \alpha'_{n-d}(s_n). \end{array} \right\} \quad (4)$$

Где

$$y'_{hd}(s_h) = \operatorname{Re} \sum_{k=1}^n y_{kd}(js_h) + \frac{\left(\operatorname{Im} \left[\sum_{k=1}^n y_{kd}(js_h) \right] \right)^2}{\operatorname{Re} \left[\sum_{k=1}^n y_{kd}(js_h) \right]}; \quad (5)$$

$$\alpha'_{hd}(s_k) = \frac{\operatorname{Im} \left[\sum_{k=1}^n y_{hd}(js_k) \right]}{\operatorname{Re} \left[\sum_{k=1}^n y_{hd}(js_k) \right]} s_k. \quad (6)$$

Активные и индуктивные сопротивления рассеяния контуров, эквивалентирующих демпферную систему, определяются в каждом цикле итерации по выражениям:

$$r_{hd} = \frac{\operatorname{Im} [y_{hd}(js_k)]}{|y_{hd}(js_k)|^2} s_k; \quad (7)$$

$$x_{okd} = \frac{\operatorname{Re} [y_{hd}(js_k)]}{|y_{hd}(js_k)|^2}, \quad (8)$$

которые следуют из формулы для комплексной проводимости роторного контура вращающейся синхронной машины.

Программа расчетов, составленная для ЦВМ «Минск-22», позволила рассмотреть вопрос о выборе оптимального количества комплексов, определяющих частотные характеристики $i_s(js)$ и значение их скольжений. При этом в качестве исходной информации были приняты экспериментальные частотные характеристики турбогенератора ТГВ-200, которые определялись по методу затухания постоянного тока в обмотке статора неподвижной машины.

Комплексы тока частотной характеристики $i_{sd}(js)$, полученной при короткозамкнутом состоянии обмотки возбуждения (рис. 2), использовались для расчета на ЦВМ схем замещения по продольной оси для следующих вариантов по скольжению:

1. $s_1 = 0,0025, s_2 = 0,05, s_3 = 0,7;$
2. $s_1 = 0,0025, s_2 = 0,05, s_3 = 0,7, s_4 = 10;$
3. $s_1 = 0,0001, s_2 = 0,001, s_3 = 0,0035, s_4 = 0,1, s_5 = 10.$

Первые два варианта выбраны для выявления влияния характерных скольжений, соответствующих экстремальным значениям мнимой части заданной совокупности геометрических мест. В третьем варианте расчетные комплексы задавались через шаг по модулю, примерно равный одной относительной единице тока статора; параметры ОВГ при этом предполагались неизвестными.

Результаты расчета параметров роторных контуров для указанных вариантов ($x_{ad} = 1,724$ о. е., $x_s = 0,175$ о. е.) приведены в таблице. На рис. 2 показаны частотные характеристики

Параметры эквивалентных контуров

| Номер варианта | Параметр, о. е. | Номер контура | | | | |
|----------------|-----------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | x_{okd} r_{hd} | 0,217 0,000749 | 0,486 0,0117 | 0,0513 0,0768 | — — | — — |
| 2 | x_{okd} r_{hd} | 0,266 0,000824 | 0,410 0,00441 | 0,794 0,0970 | 0,0449 0,0840 | — — |
| 3 | x_{okd} r_{hd} | 274 0,0106 | 2,81 0,00151 | 0,186 0,000841 | 0,678 0,0483 | 0,0444 0,0822 |
| 4 | x_{okd} r_{hd} | 0,512 0,0020 | 1,23 0,0385 | 0,943 0,129 | 0,0449 0,0841 | — — |

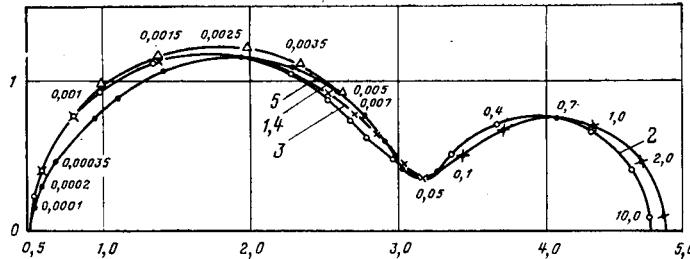


Рис. 2. Частотные характеристики $i_{sd}(js)$ турбогенератора ТГВ-200.

1 — экспериментальная при короткозамкнутой ОВГ; 2 — расчетная, соответствующая параметрам схемы замещения по варианту 1; 3 — то же по варианту 2; 4 — то же по варианту 3; 5 — то же по варианту 4.

ки, соответствующие этим схемам замещения. Там же (кривая 5) построена характеристика для случая, когда в расчете использовались параметры ОВГ, соответствующие справочным данным ($x_{sf} = 0,275$ о. е., $r_f = 0,00095$ о. е.), и комплексы тока для скольжений: $s_1 = 0,007, s_2 = 0,05, s_3 = 1,0, s_4 = 10,0$.

Из сопоставления кривых 1 и 5 следует, что использование при расчете схемы замещения параметров ОВГ, соответствующих справочным данным, приводит, как это и следовало ожидать, к деформации частотной характеристики в области малых значений скольжений ($s = 0 \div 0,005$ о. е.). В диапазоне скольжений более 0,005 о. е. характеристики практически совпадают.

Проведенные исследования показали, что минимальное значение скольжения расчетных комплексов тока в этом случае должно быть больше критического скольжения, определяемого справочным значением постоянной времени обмотки возбуждения T'_d при замкнутой обмотке статора.

Как следует из рассмотрения кривых 1, 2, 3 и 4 (рис. 2), для определения параметров роторных контуров целесообразно использовать комплексы тока частотной характеристики через шаг, примерно равный 1 о. е. тока.

Наиболее точное совпадение расчетной и экспериментальной частотных характеристик при синтезе схем замещения по поперечной оси также достигается при выборе исходных комплексов подобным образом.

Оценка оптимальности эквивалентирования спектральных совокупностей электромагнитных параметров с помощью схем замещения рассмотренного типа может быть проведена по известному критерию минимума среднеквадратичных уклонений:

$$\int_0^{\tau} [i(t) - i_s(t)]^2 dt, \quad (9)$$

где $i(t), i_s(t)$ — реакции на входе исходной системы и эквивалентной, соответствующей расчетной схеме замещения, при единичном возмущении по напряжению; τ — предел интегрирования по времени, определяемый значением постоянной времени изменения свободных токов в расчетной схеме замещения.

Параметры эквивалентных демпферных контуров могут быть получены также по экспериментальным частотным характеристикам роторной проводимости $G(js)$. Действительно, характеристика $G(js)$ для принятой схемы замещения (рис. 1) определяется следующим выражением:

$$G(js) = \frac{x_{ad}}{r_f + jsx_{sf} + \frac{1}{x_{ad}} + \sum_{k=1}^n \frac{js}{r_{hd} + jsx_{okd}}} C_{ad}(js), \quad (10)$$

где

$$C_{ad}(js) = \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{\sum_{k=1}^n y_{hd}(js)}};$$

$$\sum_{k=1}^n y_{hd}(js) = \sum_{k=1}^n \frac{js}{r_{hd} + jsx_{okd}},$$

откуда проводимость эквивалентных роторных контуров

$$\sum_{k=1}^n y_{hd}(js) = \frac{1}{(r_f + jsx_{sf})G(js)} - \frac{js}{r_f + jsx_{sf}} - \frac{1}{x_{ad}}. \quad (11)$$

Дальнейший расчет проводится с использованием системы уравнений (3).

Рассмотренный метод расчета позволяет также выполнить коррекцию частотных характеристик, полученных по методу

затухания постоянного тока, по достоверным значениям комплексных проводимостей при $s=1$ и $s=0$. Это дает возможность устранить влияние погрешностей, связанных с регистрацией и обработкой опытной кривой затухания, и наиболее правильно учесть насыщение от основного магнитного потока и потоков рассеяния.

Выполненная работа позволяет сделать вывод о целесообразности расчета эквивалентных схем замещения турбогенераторов по экспериментальным частотным характеристикам их проводимостей при использовании данных обычных промышленных испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сидельников А. В. О синтезе схем замещения электрических машин переменного тока по заданным частотным характеристикам. — В кн.: Теория, расчет и исследование высокочастотных электрических машин. М., «Наука», 1965.
 - Казовский Е. Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М., Изд. АН СССР, 1962.
 - Миляев М. С. Метод определения переходной проводимости машин переменного тока. — «Электричество», 1969, № 4.
 - Соколов Н. И., Киркин Б. И. Определение частотных характеристик синхронных машин. — «Электричество», 1962, № 1.
- [29.8.1973]



УДК 621.372:621.315.592

Расчет наработки до предельного состояния и уровня резервирования высоковольтных вентильных схем

Инж. ШУЛЬМАН М. Х.

ВЭИ им. В. И. Ленина

Введение. В связи с интенсивной разработкой высоковольтных схем на полупроводниковых вентилях (диодах и тиристорах) приобрела актуальность проблема расчета и анализа их эксплуатационных характеристик. В частности, важно уметь правильно определять срок межремонтной эксплуатации схемы, который зависит как от ненадежности составляющих ее элементов, так и от ее внутренней структуры. Большой интерес представляет и обратная задача: по заданному сроку межремонтной эксплуатации и известным характеристикам надежности элементов схемы выбрать оптимальный структурный вариант.

Ниже предлагается решение указанных задач для схемы, состоящей из вентиляй или вентильных ячеек, в которые входят вентили, элементы их защиты, управления и т. п. Для краткости в дальнейшем употребляется термин «вентиль».

Постановка задачи. Обобщенная схема изображена на рис. 1,а. В этой схеме n вентиляй, соединенных последовательно, образуют ветвь; m ветвей, соединенных параллельно, составляют модуль. Схема состоит из s последовательно соединенных модулей.

Вероятность отказа типа «обрыв вентиля» будем пренебречь по сравнению с вероятностью отказа типа «пробой

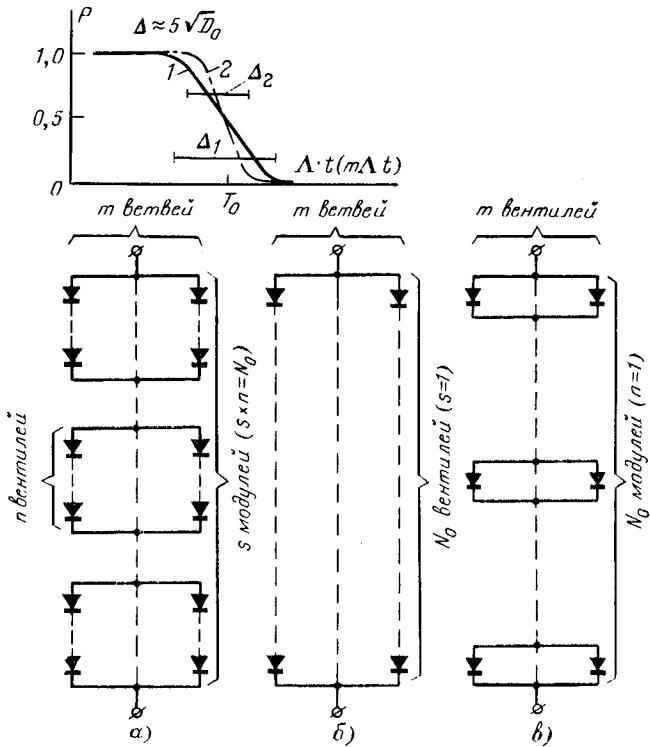


Рис. 1.

вентиля». Назовем отношение выдерживаемого схемой напряжения к напряжению, выдерживающему одним вентилем, уровнем ее работоспособности. Очевидно, что уровень работоспособности ветви y_v равен количеству непробитых вентиляй в ней. Столь же очевидно, что уровень работоспособности модуля y_m равен уровню работоспособности ветви этого модуля с наибольшим числом пробитых вентиляй, т. е.

$$y_m = \min \{y_{v1}, \dots, y_{vs}\}, \quad (1)$$

а уровень работоспособности схемы y_{cx} есть сумма соответствующих величин всех модулей

$$y_{cx} = \sum_{i=1}^s y_{mi}. \quad (2)$$

Резервирование по напряжению обеспечивается избыточным количеством включенных последовательно вентиляй.

Отметим, что необходимость иметь повышенную номинальную мощность схемы обуславливает наличие нескольких параллельных вентильных ветвей, что, очевидно, снижает вероятность работоспособного состояния схемы. Последнее определяется минимально допустимым уровнем работоспособности. Нашей основной задачей и будет вычисление этой вероятности, т. е. вычисление вероятности P того, что уровень работоспособности схемы не окажется за время t ниже заданного значения.

Понятно, что интенсивность отказа вентиляй в процессе эксплуатации схемы может возрастать вследствие увеличения удельной нагрузки на каждый вентиль. Будем считать в дальнейшем изменяющимся параметром нагрузки амплитуду прикладываемого к вентилю «обратного» напряжения; изменением других параметров, определяющих интенсивность отказа вентиляй, пренебрегаем.

Методика расчета. Логически простая схема расчета получается, если принять гипотезу о независимости вероятности $x(t)$ безотказной работы отдельно взятого вентиля от числа отказавших к моменту t вентиляй и от моментов предыдущих отказов других вентиляй. Эта гипотеза может соответствовать действительности в течение начальной стадии отказа резерва. Однако полученные в такой модели окончательные выражения оказываются весьма громоздкими, как это обычно имеет место при решении ряда комбинаторных задач. Производить вычисления с помощью этих выражений без применения средств вычислительной техники затруднительно.

Можно получить намного более общие и удобные выражения, если воспользоваться известной теоретико-вероятностной «схемой гибели» [Л. 1], описывающей ряд необратимых переходов между состояниями системы. Если число таких переходов достаточно велико, то вероятность достижения конечного состояния с течением времени изменяется по нормальному закону, причем среднее значение достижения конечного состояния и дисперсия этой величины выражаются, как известно, через интенсивность переходов между соседними состояниями.

Эта модель с успехом может быть использована при расчете вероятности работоспособного состояния ветви в схеме рис. 1,б, а также для расчета вероятности аналогичной величины для всей схемы рис. 1,а, в которой в качестве одного

элемента надежности принятая совокупность m соединенных электрических параллельно вентилями. Интенсивность перехода λ_k из «состояния» с k пробитыми вентилями в «состояние» с $(k+1)$ пробитым вентилем дается соответственно выражениями:

$$\lambda'_{k+1} = (N_0 - k) \Lambda \left(\frac{U_0}{N_0 - k} \right); \quad (3)$$

$$\lambda''_{k+1} = (N_0 - k) m \Lambda \left(\frac{U_0}{N_0 - k} \right), \quad (4)$$

где N_0 — исходный уровень работоспособности схемы; m — число параллельных вентильных ветвей, а через $\Lambda \left(\frac{U_0}{N_0 - k} \right)$ обозначена интенсивность отказов вентиля или вентильной ячейки при воздействии на него соответствующей части напряжения U_0 , приложенного к ветви (схеме) в целом.

Поскольку суммарный поток отказов, характеризуемый интенсивностью λ_k , складывается из большого числа слабо зависящих один от другого индивидуальных потоков отказов вентилями, сравнимых по интенсивности, то с помощью предельной теоремы удалось легко выразить λ_k через интенсивность отказов одного вентиля и число не отказавших к моменту t_k вентилями, где t_k — момент отказа $(k+1)$ -го вентиля.

С помощью вероятностного моделирования, алгоритм которого приведен в приложении, по известным величинам λ_k можно получить реализации случайной величины — наработки до предельного состояния работоспособности схемы общего вида (рис. 1, a). Однако часто можно ограничиться расчетом наработки для схем, соответствующих рис. 1, б и в. При заданном уровне работоспособности схемы и числе m параллельных вентильных цепей первая из них ($s=1$, $n=N_0$) характеризуется наибольшим, а вторая ($n=1$, $s=N_0$) — наименьшим средним значением наработки.

«Схема гибели» дает возможность также оценить «снизу» вероятность работоспособного состояния схемы рис. 1, а в том предельном случае сильной зависимости Λ от нагрузки U , когда выполняется условие:

$$(m-1) n \Lambda \left(\frac{U_m}{n} \right) \ll (n-k) \Lambda \left(\frac{U_m}{n-k} \right), \quad (5)$$

т. е. когда в модуле с вероятностью, очень близкой к единице, после пробоя первого вентиля какой-либо ветви в дальнейшем пробиваются вентили лишь той же самой ветви (U_m — напряжение, приложенное к модулю, и, следовательно, к каждой его ветви). В этом случае пробой каждого вентиля снижает уровень работоспособности схемы на единицу; соответствующим образом перераспределяется напряжение между модулями. Наиболее «быстрый» вариант отказа схемы при этом следующий: сначала пробивается «слабейшая» ветвь одного модуля, затем начинает пробиваться ветвь другого модуля и так далее. Соответствующие выражения для λ_k имеют вид:

$$\lambda'''_{k+1} = [m(n-s-j-1) + n-l] \Lambda \left(\frac{U_0}{N_0 - k} \right). \quad (6)$$

Здесь j — число ранее пробитых модулей; l — число ранее пробитых вентиляй в данном модуле; величины j , k , l связаны условиями:

$$k = jn + l; \quad 0 \leq j \leq s; \quad 0 \leq l \leq n. \quad (7)$$

В (3) — (7) число пробитых вентиляй k ограничено условием:

$$0 \leq k \leq N_0 - N_1, \quad (8)$$

где N_1 — минимально допустимый уровень работоспособности схемы.

Рассчитав величины λ_k в зависимости от структуры схемы и с учетом изменения Λ в функции нагрузки по напряжению, можно в соответствии с известными результатами [Л. 1] «схемы гибели», определить среднее значение и дисперсию случайной длительности эксплуатации схемы:

$$T_{cp} = \sum_{k=0}^{N_0 - N_1} \frac{1}{\lambda_k}; \quad (9)$$

$$D = \sum_{k=0}^{N_0 - N_1} \frac{1}{\lambda_k^2}. \quad (10)$$

Легко также определить вероятность P того, что за время t не откажет весь резерв:

$$P(t) = \int_{-\infty}^{(T_{cp}-t)/\sqrt{D}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \equiv \Phi \left(\frac{T_{cp}-t}{\sqrt{D}} \right). \quad (11)$$

Нормальное распределение, которому соответствует (11), применимо при $t \geq T_{cp} - 3\sqrt{D}$.

Соотношение (11) позволяет определить $P''(t)$, T_{cp} и D'' для схемы рис. 1, в. С помощью этого же выражения для схемы рис. 1, б находится вероятность работоспособности состояния ветви P_v , через которую простым образом выражается соответствующая вероятность для всей схемы:

$$P'(t) = [P_v(t)]^m. \quad (12)$$

Анализ результатов. Попытаемся найти удобную оценку для сумм (9) и (10). Для этого заменим суммы общего вида суммами из одинаковых слагаемых (в одном случае наибольших, в других — наименьших). В знаменатель каждого слагаемого суммы входят два сомножителя — интенсивность отказов вентильной ячейки Λ_N и число неотказавшихся ячеек N . Пусть Λ_{\max} — наибольшая, а Λ_{\min} — наименьшая из величин Λ_N . Произведя элементарные выкладки и воспользовавшись выражением для так называемого коэффициента резервирования

$$\alpha = \frac{N_0 - N_1}{N_0}, \quad (13)$$

нетрудно для цепочки, содержащей N_0 последовательно соединенных ячеек, для которой справедливо (3), найти соотношения:

$$\frac{\alpha}{\Lambda_{\min}(1-\alpha)} > T_{cp} > \frac{\alpha}{\Lambda_{\max}}; \quad (14)$$

$$\frac{\alpha}{\Lambda_{\min}^2(1-\alpha)^2 N_0} > D > \frac{\alpha}{\Lambda_{\max}^2 N_0}. \quad (15)$$

Для дальнейшего анализа удобно выразить T_{cp} и D через коэффициент резервирования α , исходный уровень работоспособности схемы N_0 и эквивалентную расчетную интенсивность отказов ячейки Λ^* :

$$\Lambda^* T_{cp} \approx \alpha; \quad (16)$$

$$(\Lambda^*)^2 D \approx \frac{\alpha}{N_0}. \quad (17)$$

Тогда для величины Λ^* неравенства (14) и (15) дают одну и ту же верхнюю границу, равную Λ_{\max} ; в качестве нижней границы для Λ^* из (14) получаем $\Lambda_{\min}(1-\alpha)$, а из (15) — $\Lambda_{\min}\sqrt{1-\alpha}$.

Пусть, например, $\Lambda_{\max} = \Lambda_{\min} = \Lambda_0$ (т. е. интенсивность отказов ячейки не зависит от числа ранее отказавших ячеек), тогда

$$\Lambda_0(1-\alpha) < \Lambda^* < \Lambda_0. \quad (18)$$

Рассмотрим теперь другой случай, когда интенсивность отказов ячейки Λ_N обратно пропорциональна числу N еще не отказавших ячеек, т. е.

$$\Lambda_N = \Lambda_0 \frac{N_0}{N}. \quad (19)$$

Легко показать, что в этом случае получим:

$$\frac{\Lambda_0}{1-\alpha} > \Lambda^* > \Lambda_0(1-\alpha). \quad (20)$$

Известно, что технико-экономические соображения существенно ограничивают величину коэффициента резервирования, так что можно принять $\alpha \ll 1$; отсюда вытекает, что с достаточной для расчетов точностью в обоих рассмотренных только что случаях можно положить:

$$\Lambda^* \approx \Lambda_0. \quad (21)$$

Вообще соотношения (16), (17) и (21) можно использовать во всех тех случаях, когда

$$\frac{N_0 \Lambda_{\max} - N_1 \Lambda_{\min}}{N_0 \Lambda_{\max}} \ll 1. \quad (22)$$

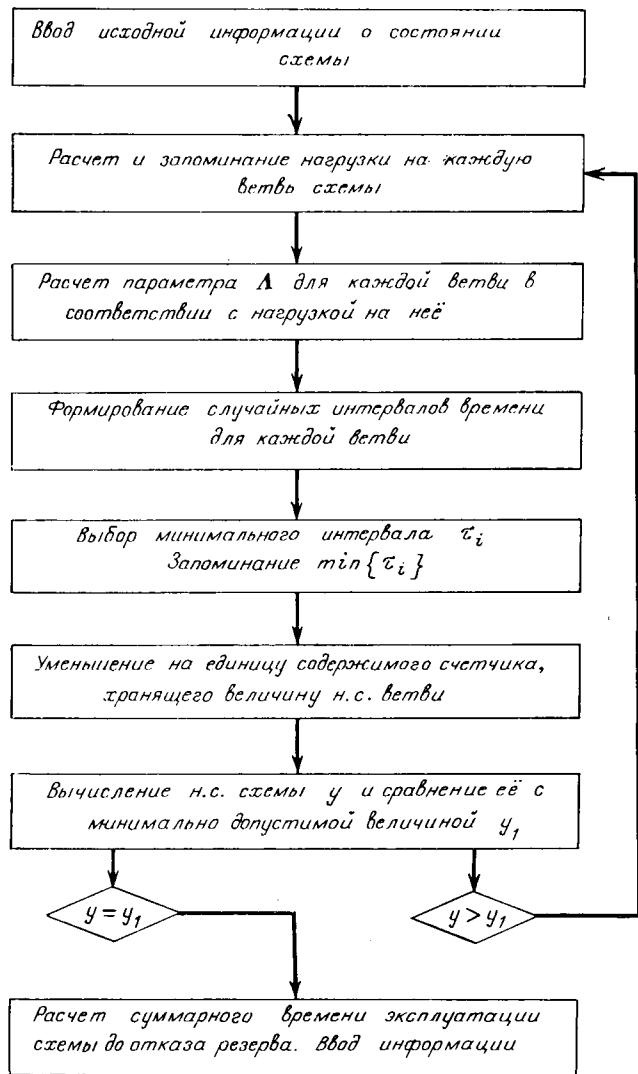


Рис. 2.

Введем безразмерные величины математического ожидания T_0 и дисперсии D_0 случайного времени эксплуатации:

$$T_0 = T_{ср} \Lambda^*; \quad (23)$$

$$D_0 = D(\Lambda^*)^2, \quad (24)$$

смысл которых раскрывается соотношениями (16) и (17). Тогда для схем на рис. 1, б и в получим выражения:

$$P'(t) = \left[\Phi \left(\frac{T_0 \Lambda^* t}{\sqrt{D_0}} \right) \right]^m; \quad (25)$$

$$P''(t) = \Phi \left(\frac{T_0 - m \Lambda^* t}{\sqrt{D_0}} \right), \quad (26)$$

где $P'(t)$ и $P''(t)$ — соответствующие вероятности работоспособного состояния схемы за время t с начального момента эксплуатации.

Таким образом, среднее значение случайного срока эксплуатации схемы до предельного состояния определяется исключительно коэффициентом резервирования, тогда как дисперсия зависит дополнительно от исходного уровня работоспособности схемы. Легко также видеть, что основной спад вероят-

ности работоспособного состояния схемы с течением времени (рис. 2) происходит в «критической области» шириной (5—6) $\sqrt{D_0}$ с центром в точке T_0 . Следовательно, если безразмерная величина Λt попадает в эту область, то следует ожидать весьма низкой надежности схемы. Отметим также, что с ростом N_0 вероятность работоспособного состояния P схемы может как убывать, так и возрастать, в зависимости от знака разности между величинами T_0 и Λt или соответственно $m\Lambda t$. Поскольку обычно стремятся к весьма высокому значению P , то выполняется условие $\Lambda t < T_0$ или соответственно $m\Lambda t < T_0$ и при возрастании N_0 значение этой вероятности увеличивается. Во всех случаях с увеличением разности $(N_0 - N_1)$ фактическое время работоспособного состояния схемы все меньше отличается от математического ожидания этой величины.

Формулы (13) и (14) позволяют при заданных вероятности работоспособного состояния схемы за время t , предельно допустимом уровне работоспособности схемы N_1 и интенсивности отказов одного вентиля (или вентильной ячейки) определить необходимый коэффициент резервирования α для соответствующих схем. Следовательно, появляется возможность рационального, обоснованного подхода к выбору этой величины, к выбору того или иного варианта схемы.

В таблице приведены результаты расчета вероятности работоспособного состояния для схем рис. 1, б и в за $t = 15000$ ч при $\alpha = 0,1$, $N_0 = 100, 200$ и 300 , $m = 2$ и 3 , $\Lambda = 5 \cdot 10^{-6} 1/\text{ч}$.

| m | N_0 | | |
|---|---|---|----------------------------------|
| | 100 | 200 | 300 |
| 2 | $P' \approx 0,80$ $P'' \approx 0,20$ | $P' \approx 0,94$ $P'' \approx 0,11$ | $P' \approx 0,98$ $P'' < 0,1$ |
| 3 | $P' \approx 0,71$ $P'' < 0,1$ | $P' \approx 0,91$ $P'' < 0,1$ | $P' \approx 0,96$ $P'' < 0,1$ |

Видно, что недостаточно высокая надежность вентиляй приводит к резкому снижению наработки схемы. Отметим, что аналогичные расчеты при значении $\Lambda = 5 \cdot 10^{-7} 1/\text{ч}$ дали при тех же величинах других параметров значения $P(t)$, превышающие 0,99.

Вывод. Найденное значение наработки до предельного состояния при известном времени восстановления позволяет определить показатели надежности схемы. Определение уровня резервирования и срока межремонтной эксплуатации в соответствии с заданной величиной наработки поможет оптимизировать технико-экономические показатели схемы.

Приложение. Алгоритм вероятностного моделирования отказа резерва на ЦВМ. В ходе выполнения алгоритма по заданному состоянию схемы определяется воздействие, приложенное к каждой ветви, и вычисляется зависящая от этого воздействия интенсивность λ_i отказов для данной ветви, а затем формируется соответствующий величине этого параметра случайный интервал времени t_i . Методика формирования случайных величин описана в [Л. 2]. Далее выбирается минимальное значение τ , и содержимое счетчика, фиксирующего уровень работоспособности соответствующей ветви, уменьшается на единицу. После вычисления изменившегося уровня работоспособности схемы цикл работы алгоритма повторяется, либо в случае недопустимого снижения величины этого уровня осуществляется вывод информации из ячейки, которая содержит результат суммирования минимальных интервалов, сформированных за предыдущие циклы.

Хотя описанный алгоритм предполагает нагрузку, действующую на схему, неизменной, в принципе возможна его модификация таким образом, чтобы учесть изменение нагрузки с течением времени или под действием дополнительных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Л. Математические методы в теории надежности. М., «Наука», 1965.
- Решение задач надежности и эксплуатации на универсальных ЦВМ. М., «Советское радио», 1967, Авт.: Креденцер Б. П., Ластовченко М. М., Санецкий С. А., Шишинок Н. А.

13.5.1973



Автоматизированный стенд для исследования загрязненной высоковольтной изоляции в полевых условиях

ГОРШЕНИН Н. А., ЖИРНИКОВ Г. А., ЗАКИРОВ Н. М., САБИТОВ М. З.,
ШАРГОРОДСКИЙ В. Л., ДУЙСЕНБАЕВ Б.

Ташкент

Одним из методов исследования высоковольтных изоляторов в условиях естественных загрязнений являются полевые стендовые испытания, которые дают материал для выбора наиболее эффективных видов изоляции в районе испытаний, позволяют выявить реакцию разных типов изоляторов на различные виды загрязнений при воздействии определенных метеофакторов. Это также важно для понимания процессов, происходящих на поверхности загрязненных изоляторов при увлажнении.

Для проведения таких исследований в 1969 г. в солончаковом районе Кара-Калпакской АССР был создан высоковольтный испытательный стенд.

Назначение стендов и его труднодоступность предопределили ряд требований к оборудованию и схеме, сводящихся в основном в необходимости непрерывной или осуществляющей по возникновению определенных условий регистрации большого количества электрических и метеорологических параметров с высокой надежностью. При этом весь комплекс контрольно-измерительной аппаратуры должен работать автоматически, без постоянного обслуживания, с профилактикой и сменой диграммных лент примерно один раз в месяц.

В настоящее время на стенде испытываются 32 объекта, представляющие собой подвесные и опорные изоляторы, размещенные в соответствии с программой исследований, рассмотрение которой не является предметом настоящей статьи.

Стенд подключен к одной фазе действующей ВЛ 110 кВ через разъединитель и масляный выключатель, который оборудован токовой отсечкой и однократным АПВ (см. рисунок). Вспомогательные изоляторы, отделяющие испытуемые объекты от земли, служат для отвода тока, протекающего через объект, на измерительную аппаратуру и для подключения трансформатора тока. В нормальном режиме токи испытуемых изоляторов по кабелю поступают через измерительную аппаратуру в землю. Заваривающийся разрядник P_1 и разрядник P_2 с координирующим сопротивлением R_K предохраняют измерительную аппаратуру от разрушения при перекрытии испытуемого объекта, а ток короткого замыкания, протекая через трансформатор тока, вызывает срабатывание сигнального устройства.

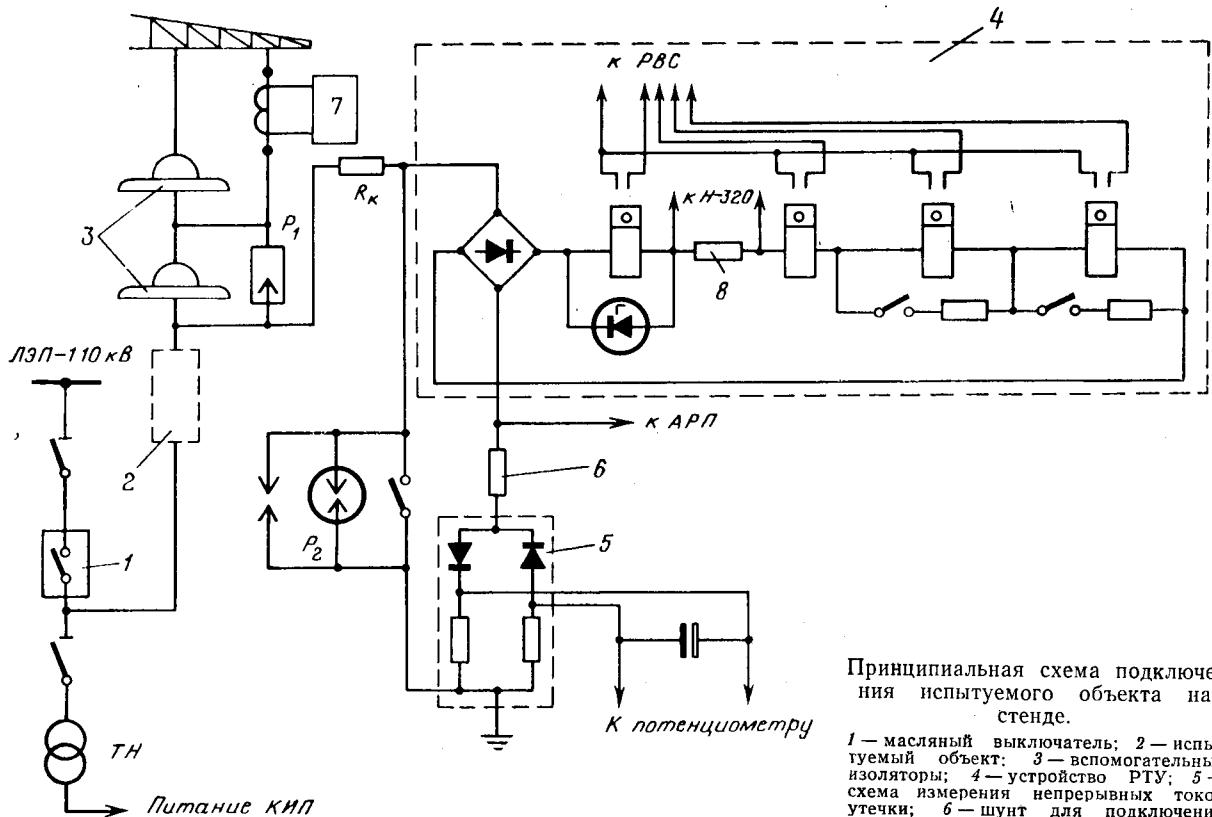
Для обеспечения бесперебойности работы измерительная аппаратура стендов имеет двухстороннее питание (от ВЛ 110 кВ через трансформатор напряжения НКФ-110 и от ВЛ 6 кВ) с автоматическим вводом резерва. Наиболее ответственные узлы снабжены автономным питанием от аккумуляторной и гальванической батареи. Мощность, потребляемая всем измерительным комплексом, не превышает 2 кВт.

Сведения о характере и объеме производимых на стенде измерений приведены в таблице.

Измерение электрических параметров. Как известно, в токе, протекающем через находящиеся под напряжением в условиях загрязнения и увлажнения изоляторы, можно различать две составляющие — непрерывный ток и броски тока утечки, возникающие при перекрытии сухих зон на поверхности увлажненной изоляции. Измерительная аппаратура стендов позволяет фиксировать обе составляющие тока во всем возможном диапазоне их величин.

Измерение и регистрация бросков тока утечки производится с помощью системы регистраторов токов утечки (РТУ), быстродействующих самопищущих миллиамперметров типа Н-320 и автоматических электронных осциллографов.

Каждый РТУ состоит из четырех электромагнитных счетчиков, последовательно включенных в цепь тока утечки через выпрямительный мост и настроенных на токи срабатывания 25, 50, 100 и 150 мА соответственно (эффективное значение). Шунтирование счетчиков регулируемыми сопротивлениями позволяет при необходимости изменить пределы срабатывания двух последних ступеней РТУ соответственно на 150 и 250 мА. Стабилитрон, шунтирующий счетчик первой ступени, обеспечивает термическую устойчивость его обмотки при протекании больших токов. Вход РТУ может быть закорочен специальным рубильником. Чувствительность счетчиков РТУ при импульсах синусоидального тока 50 Гц длительностью 60 мсек и более практически не изменяется. При меньших длительностях в силу инерционности счетчиков чувствительность снижается, достигая 50% при 15 мсек. Однако проведенные исследования показали, что при величинах импульсов тока утечки 25 мА и более дли-



Принципиальная схема подключения испытуемого объекта на стенде.

1 — масляный выключатель; 2 — испытуемый объект; 3 — вспомогательные изоляторы; 4 — устройство РТУ; 5 — схема измерения непрерывных токов утечки; 6 — шунт для подключения АРП; 7 — шунт для подключения Н-320.

| Вид измерений | Измеряемый параметр | Пределы измерений | Количество каналов | Характер измерения | Измерительный прибор или устройство |
|-----------------------------|---|-------------------------------|--------------------|--|--|
| Электрические измерения | Непрерывный ток утечки | 0÷2,5 ма 0÷5 ма 0÷10 ма | 40 | Непрерывно | Выпрямитель, шунт, потенциометр ЭПП-09МЗ |
| | Величина бросков тока утечки (дискретно) | 25, 50, 100, 150, 250 ма | 40 | Непрерывно | Устройство РТУ |
| | Величина бросков тока утечки | 250 или 500 ма | 15 | Запись в течение 1 ч при появлениях бросков тока от 25 ма и выше | Самопищущие миллиамперметры Н-320-5 с шунтами |
| | Форма и величина бросков тока утечки | 50 ма | 6 | Запись при достижении определенного уровня тока | АРП-III шунтами |
| Метеорологические измерения | Уровень напряжения 110 кв | 84÷143 кв | 1 | Непрерывно | Потенциометр ЭПП-09МЗ |
| | Температура воздуха на высоте 0,5; 2,0; 28 м | -50 до 50 °С | 3 | То же | Термосопротивление, неравновесный мост, потенциометры ЭПП-09МЗ и КСП-4 |
| | Относительная влажность воздуха на высоте 0,5; 2; 12; 28 м | 0÷100 % | 4 | “ ” | Гигрометр М-39, преобразователь, потенциометры ЭПП-09МЗ и КСП-4 |
| | Скорость ветра на высоте 12 м | 0÷50 м/сек | 1 | “ ” | Тахогенератор метеостанции М-47, выпрямитель, нелинейный делитель напряжения, потенциометр КСП-4 |
| | Направление ветра | 0÷360° | 1 | “ ” | Флюгажка метеостанции М-47, сельсины, фазометр, потенциометр КСП-4 |
| | Количество и интенсивность осадков | 10 мм | 1 | “ ” | Реконструированный плювиограф П-2 с индукционным преобразователем, потенциометр КСП-4 |
| | Измерение количества, интенсивности и времени выпадения росы на высоте 0; 1; 12; 18 м | 0,02÷0,3 ма | 4 | Эпизодически | Росограф М-35 |
| | Скорость ветра на высоте 1; 4; 12; 18; 28 м | 0÷50 м/сек | 5 | То же | Контактные анемометры М-25 |

тельность импульсов значительно превышает 60 мсек (для изоляции с нормальной длиной пути утечки). Настройка РТУ производится импульсами синусоидального тока 50 гц длительностью 140—160 мсек (7—8 периодов). Счетчик считается настроенным, если при токе 1,02I_{уст} на десять импульсов приходится не менее восьми, а при токе 0,98I_{уст} — не более двух срабатываний. Несмотря на относительную простоту, РТУ достаточно стабильны во времени — настройка сохраняется не менее года.

Достаточно удобные для контроля за большим количеством объектов РТУ, однако, не обеспечивают фиксации всех параметров импульсов. Поэтому на пятнадцати наиболее интересных с точки зрения исследований объектах дополнительно производится запись бросков токов утечки многоканальными быстродействующими самопищущими миллиамперметрами типа Н-320, включенными в рассечку цепи счетчиков РТУ. Амперсекундная характеристика этих измерителей близка к характеристикам РТУ, — при импульсах более 50 мсек показание прибора уже не зависит от длительности импульса.

Как показали длительные измерения системой РТУ, импульсные токи утечки с эффективной величиной более 25 ма появляются относительно редко, но при возникновении благоприятных для появления таких частичных разрядов условий эти импульсы идут с достаточно малой скважностью в течение 1—3 ч. Попытки записывать их самописцами с постоянно включенной на малой скорости протяжкой ленты привели к тому, что на большей части ленты импульсы не записывались, а там, где они имелись, их запись сливалась друг с другом из-за малой скорости движения ленты. Увеличение же скорости приводило к быстрому расходованию диаграммной ленты и необходимости ее частой замены, что входило в противоречие с требованием длительной (около одного месяца) работы аппаратуры стенда без обслуживающего персонала.

Для разрешения этих противоречивых требований было разработано устройство¹, автоматически запускающее самописец на большой скорости записи только при появлении импульсов, превышающих заданную величину. Запись продолжается в течение 1 ч после исчезновения последнего импульса. Это время принято на основании опыта регистрации серий импульсов токов утечки. Высокая скорость записи, возможная при такой системе пуска, позволяет выделять записи отдельных импульсов и определять интенсивность их следования во времени.

Для предотвращения высыхания чернил в самописцах предусмотрена ежедневная автоматическая протяжка диаграммной ленты на 4—5 см.

¹ Устройство для запуска самопищущих приборов. А. С. № 364105 (СССР). Опубл. в бюлл. «Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1973, № 4. Авт.: М. З. Сабитов, Н. А. Горшенин, Н. М. Закиров, В. Л. Шаргородский.

Упомянутые приборы обладают интегральным характером регистрации. Форма же токов утечки записывается на шести исследуемых объектах ждущими осциллографами типа АРП-III. Эти приборы, предназначенные для регистрации внутренних перенапряжений, стало возможным использовать для регистрации бросков токов утечки после внесения в них некоторых изменений. Так, были изменены скорости развертки, скорректирована работа элементов блока автоматики и подсвета луча, увеличено напряжение развертки. В качестве фоторегистратора была использована несколько реконструированная киносъемочная камера «Аврора» с электрическим приводом механизма перевода кадров и возможностью покадровой съемки (с запуском от блока автоматики АРП-III), за счет чего удалось увеличить объем записываемой информации с 80 до 2000 кадров. Трехлучевые осциллографы, включенные в цепь тока утечки исследуемых объектов, запускаются импульсом тока утечки заданной величины с задержкой развертки, не превышающей 100 мсек. Максимальная длительность регистрируемых импульсов — 20 периодов тока частотой 50 гц.

Измерение и регистрация непрерывных токов утечки осуществляется с помощью 12-канальных электронных потенциометров типа ЭПП-09М, подключенных к специальным выпрямительным схемам с измерительными шунтами, рассчитанными на измерение токов от нуля до 2; 5 и 10 ма. При необходимости эти пределы можно легко изменить. Установленные скорости движения ленты позволяют потенциометрам работать без замены диаграммной ленты в течение 25—30 суток.

Измерение напряжения линии 110 кв производится от вторичной обмотки трансформатора напряжения НКФ-110 одним из каналов потенциометра ЭПП-09М через разделительный трансформатор. В связи с тем, что интерес представляет измерение напряжения при изменении его в пределах $\pm 10\text{--}15\%$ от номинального, для повышения точности измерения применена специальная схема, рассчитанная таким образом, чтобы отклонение стрелки потенциометра на всю шкалу соответствовало изменению напряжения линии от 84 до 143 кв.

Кроме записи величины напряжения на стенде имеется счетчик числа отключений, срабатывающий при исчезновении напряжения 110 кв.

Нанесение отметок времени оказалось необходимым ввиду того, что большое число различных измерительных устройств и устройств автоматики стенда работают независимо друг от друга. Кроме того, из-за неравномерности движения диаграммной ленты в потенциометрах возникает погрешность в определении истинного времени записи параметров. Поэтому важнейшим элементом измерительного комплекса является устройство для определения времени (УОВ), позволяющее увязать записи всех приборов и с необходимой точностью определить момент производства измерения или срабатывания того или иного устройства.

Основным элементом УОВ являются электронные часы с двумя парами встроенных контактов, одни из которых («часовые») замыкаются через 1 ч, а другие («суточные») — через каждые 12 ч. Сигналы, поступающие от часов, воздействуют на релейное устройство, которое закорачивает на 3 мин входы всех потенциометров. Таким образом, метки времени наносятся на ленты пяти потенциометров. Работа всех остальных устройств фиксируется на лентах потенциометров, чем и достигается общая увязка во времени действия всего комплекса аппаратов и устройств стенда. При этом часть устройств при срабатывании выдает сигналы на специально выделенные каналы потенциометров, а срабатывание счетчиков РТУ и автоматических осциллографов АРП-III фиксируется с помощью устройства регистрации времени срабатывания (РВС). Это устройство состоит из отдельных однотипных ячеек, представляющих собой соленоид, внутри которого находится стальной сердечник с иглой на конце и возвратная пружина. Каждому счетчику РТУ соответствует определенная ячейка РВС. Блоки РВС, собранные из сорока ячеек каждый, устанавливаются на электронные потенциометры.

При срабатывании РТУ на соответствующую катушку РВС через вспомогательные контакты счетчика подается напряжение, сердечник втягивается в соленоид и игла наносит прокол на бумажную ленту потенциометра. При исчезновении тока пружина возвращает сердечник в исходное состояние. По месту проколов на ленте можно легко определить время срабатывания счетчика. Наличие проколов на ленте не ухудшает качества основной записи потенциометра.

Измерение метеорологических параметров. Как известно, на работу загрязненной изоляции решающее влияние оказывают метеорологические условия. Для выяснения их влияния одновременно с записью электрических параметров необходима непрерывная регистрация основных метеорологических факторов. Использовать для этой цели данные ближайших метеостанций не представляется возможным по следующим причинам: во-первых, на метеостанциях не производится непрерывная запись всех метеофакторов; во-вторых, из-за различия метеоклиматических параметров в районах испытательного стенда и метеостанции как по величине, так и во времени; в-третьих, из-за значительного изменения некоторых метеофакторов по высоте. В связи с этим возникла необходимость оборудования на испытательном стенде собственной метеостанции, которая позволяла бы непрерывно и автоматически измерять и записывать метеорологические параметры на стандартном двухметровом уровне и на уровнях подвески линейных изоляторов.

При разработке метеостанции за основу взяты типовые метеорологические приборы, которые были модернизированы и приспособлены для длительной автоматической работы без обслуживания с непрерывной записью измеряемых параметров автоматическими потенциометрами. Измерения производятся принятыми в метеорологии методами (типовые метеобудки, типовые метеомачты и пр.). Метеорологические приборы, укомплектованные электрическими преобразователями, проходили проверку и тарировку по существующим инструкциям без снижения требований к точности, так как погрешности, вносимые преобразователями, значительно ниже допускаемых в метеорологической практике.

Измерение температуры воздуха производится с помощью типового медного термометра сопротивления типа ГГО, включенного в одно из плеч неравновесного моста. Мост питается от термостабильного стабилизатора напряжения. Для повышения точности измерения весь измеряемый диапазон разделен на два: от -50 до $+10$ °С (зимой) и от -10 до $+50$ °С (летом). Переход с одного диапазона на другой осуществляется вручную с помощью тумблера, переключающего сопротивления в плече и диагонали моста. Термосопротивление помещается в стандартной метеобудке, а вся остальная схема — в шкафу приборов в помещении. Для защиты от помех соединение термосопротивления со схемой сделано отдельными экранированными проводами без промежуточных клеммников. Точность измерения составляет $\pm 0,5$ °С.

Измерение влажности воздуха производится с помощью пленочного гигрометра типа М-39, который позволяет с достаточной точностью непрерывно измерять влажность при положительных и отрицательных температурах, не требует обслуживания и дополнительных операций при заме-

рах. Для преобразования показаний гигрометра в пропорциональный электрический сигнал используется индукционный преобразователь. Гигрометр с преобразователем устанавливается в метеобудке, причем для защиты от пыли и повышенной влажности преобразователь помещен в корпус из оргстекла. За счет подогрева внутри корпуса обеспечивается превышение температуры над окружающей на 7 °С. Конструкция прибора позволяет легко заменять гигрометр, не нарушая тарировки преобразователя, что весьма важно, так как гигрометры требуют регулярной поверки и замены пленок. Подключение преобразователя практически не вносит дополнительных погрешностей в показания гигрометра.

Измерение скорости ветра производится с помощью дистанционной метеорологической станции М-47. В качестве датчика скорости ветра в метеостанции М-47 применен тахогенератор, который приводится во вращение анометрической вертушкой. Датчик скорости ветра, конструктивно объединенный с датчиком направления ветра, установлен на стандартной метеомачте. Метеостанция М-47 рассчитана для измерения скорости ветра до 50 м/сек, в то время как преобладающая скорость ветра на стенде равна 5—15 м/сек. Для более удобного и точного считываия показаний в рабочей части диапазона скоростей ветра была произведена растяжка шкалы таким образом, чтобы диапазон скоростей от 0 до 15 м/сек занимал примерно половину шкалы.

Определение направления ветра осуществляется с помощью сельсина-датчика направления ветра метеостанции М-47. Трехфазная обмотка связи питается пониженным трехфазным напряжением (5—7 в, 50 гц). На однофазной обмотке наводится э. д. с., фаза которой зависит от положения ротора сельсина. Измерение фазы производится с помощью специальной схемы, выполненной на транзисторах. Угол поворота флюгарки неограничен. Величина выходного сигнала линейно изменяется от нуля до максимального значения при изменении угла поворота от 0 до 360° с разрывом в точке 360°. Величина выходного напряжения, подаваемого на потенциометр, зависит только от фазы, т. е. от угла поворота флюгарки, и не зависит от амплитуды входных напряжений, поэтому изменение величины питающего напряжения не оказывается на точности работы преобразователя.

Измерение количества и интенсивности осадков ведется прибором, выполненным на базе плювиографа типа П-2. Плювиограф П-2 позволяет записывать количество и интенсивность осадков, но требует ежедневной смены диагностической бумаги и еженедельного завода часовогого механизма. Кроме того, с наступлением периода, когда возможно появление заморозков, плювиограф необходимо демонтировать, так как при замерзании воды он может выйти из строя, в то время как по условиям проводимых на стенде исследований этот период с оттепелями и заморозками представляет определенный интерес.

При разработке автоматизированного плювиографа, предназначенног для работы в условиях испытательного стенда при любых температурах воздуха, предусмотрены измерение и запись автоматическим потенциометром количества и интенсивности осадков и автоматическое включение подогрева при снижении температуры внутри кожуха прибора до +2 °С. При наполнении измерительного цилиндра до контрольного уровня или снижении температуры внутри кожуха ниже допустимого предела осуществляется автоматический сброс воды из измерительного цилиндра.

Преобразователь плювиографа представляет собой воздушный трансформатор с подвижной вторичной обмоткой, связанной с поплавком. Для предохранения от механических повреждений и действия повышенной влажности катушки залиты эпоксидным компаундом. Схема автоматики плювиографа питается от аккумуляторной батареи, находящейся в режиме постоянного подзаряда, а цепи подогрева и преобразователя — от сети 220 в.

Описанный стенд успешно эксплуатируется более трех лет, в течение которых многие его узлы и элементы претерпели ряд изменений, улучшивших их характеристики. К настоящему времени он представляет собой достаточно надежно работающий комплекс, принципиальные решения отдельных узлов которого целесообразно использовать при создании подобных устройств.

[13.9.1973]



Влияние режима работы и метеорологических условий на активные сопротивления и проводимости линий электропередачи 220-1150 кв

Инж. МЕЛЬЗАК И. Я., доктор техн. наук [МЕЛЬНИКОВ Н. А.],
кандидаты техн. наук РОДДАТИС В. К., ШЕРЕНЦИС А. Н.

Активные сопротивления и проводимости воздушных линий электропередачи не являются постоянными, а изменяются в широких пределах. При расчетах активные сопротивления сталеалюминиевых проводов при промышленной частоте принимаются по данным приложения к ГОСТ 839-59 на неизолированные провода. Рекомендуемые значения активных сопротивлений получены на основании результатов непосредственных измерений, произведенных на заводских образцах при температуре +20 °С. Удельное активное сопротивление различных партий алюминиевых проволок одинакового стандартного сечения зависит от производственных допусков, которые были приняты при изготовлении алюминия. В то же время фактические сопротивления многопроволочных сталеалюминиевых проводов в зависимости от их сечения и конструкции оказываются на 1,5-3% больше по сравнению с вычисленными по известным сопротивлениям отдельных проволок.

Активные сопротивления сталеалюминиевых проводов переменному току всегда больше сопротивлений постоянному току [Л. 11]. Протекание переменного тока в многопроволочных сталеалюминиевых проводах сопровождается возникновением продольной составляющей магнитного потока, способствующей втягиванию тока в середину провода. Ток частично следует по оси каждой из проволок, а частично переходит из одной проволоки в другую не только в пределах одного повива, но и между повивами. Вследствие этого происходит неравномерное распределение тока по сечению провода. Степень неравномерности и втягивания тока в сердечник зависит от состояния поверхности проволок, качества контактов между алюминиевыми проводками, количества повивов и т. д. Возникающие при этом потери на гистерезис и вихревые токи приводят к увеличению активных сопротивлений.

На значение активного сопротивления проводов заметное влияние оказывает число концентрических повивов.

В СССР сталеалюминиевые провода марки АС сечением до 95 $мм^2$ включительно изготавливаются с одним концентрическим повивом; провода марок АС и АСУ сечением 120 $мм^2$ и выше имеют два повива; провода АС0-300, АС0-400 и АС0-500 — три повива.

Исследования [Л. 2 и 3] показали, что активное сопротивление переменному току двухповивовых проводов по сравнению с сопротивлением постоянному току увеличивается на 1-4%, а трехповивовых на 1-12%. В еще большей степени втягивание тока в стальной сердечник характерно для одноповивовых проводов, применяемых на линиях напряжением 35 кв и ниже.

В условиях эксплуатации активные сопротивления и проводимости воздушных линий изменяются в зависимости от режима работы (ток, напряжение), метеорологических условий трассы (температура воздуха, скорость ветра, погода) и т. д.

В районах с агрессивной средой одной из причин увеличения активного сопротивления проводов, достигающего по данным [Л. 4] 24%, является коррозия. Причем провод неодинаково корродирует по длине, в результате чего сопротивления отдельных участков линий оказываются неодинаковыми. Кроме того, колебания проводов под действием ветра и изменение температуры провода приводят к тому, что контакты между соседними проволоками постоянно перемещаются. Вследствие этого активное сопротивление одного и того же участка провода может изменяться на несколько процентов [Л. 5].

При электрических расчетах влияние отмеченных выше конструктивных, режимных и метеорологических факторов на значения активных сопротивлений и проводимостей воздушных линий электропередачи либо совсем не учитывается, либо

учитывается весьма приближенно. Возникающие погрешности могут существенно исказить результаты расчетов потерь мощности в проводах линии, условий возникновения резонансных явлений и т. д. Поэтому целесообразно определить возможные диапазоны изменения активных сопротивлений и проводимостей линий электропередачи 220-1150 кв вследствие совместного воздействия режимных и метеорологических факторов и показать необходимость более строгого учета реальных условий работы проводов при выполнении соответствующих расчетов.

Активное сопротивление. Погонное активное сопротивление провода зависит от температуры его нагрева:

$$R = R_{20^\circ} [1 + \alpha (t_{\text{пров}} - 20^\circ)], \quad (1)$$

где R_{20° — активное сопротивление провода при температуре +20 °С, $ом/км$; $\alpha = 0,004 1/град$ — температурный коэффициент электрического сопротивления для сталеалюминиевых проводов; $t_{\text{пров}}$ — температура провода, °С.

Входящая в (1) температура провода может быть определена из уравнения теплового баланса, которое в случае пренебрежения солнечной радиацией имеет вид:

$$\left(\frac{I}{n}\right)^2 R = (C_{\text{л}} + C_{\text{к}}) 10\pi d (t_{\text{пров}} - t_{\text{возд}}), \quad (2)$$

где I — рабочий ток, $а$; n — число проводов в фазе; $C_{\text{л}}$ — коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием, $вт/(см^2 \cdot град)$; $C_{\text{к}}$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией, $вт/(см^2 \cdot град)$; d — диаметр провода, $мм$; $t_{\text{возд}}$ — температура воздуха, °С;

$$C_{\text{л}} = 2,8(100 + 0,6t_{\text{пров}}) \cdot 10^{-6}; \quad (3)$$

$$C_{\text{к}} = 9 \sqrt{\frac{Pv}{d}} \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где P — атмосферное давление, $кгс/см^2$; v — скорость ветра, $м/сек$.

Подставляя (1), (3) и (4) во (2) и решая относительно $t_{\text{пров}}$ при $P = 1 \text{ кгс/см}^2$, имеем:

$$t_{\text{пров}} = \left(-\frac{250}{3} - \frac{t_{\text{возд}}}{2} + \frac{18750}{7} \sqrt{\frac{v}{d}} - \frac{5I^2 R_{20^\circ}}{42\pi d n^2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{250}{3} - \frac{t_{\text{возд}}}{2} + \frac{18750}{7} \sqrt{\frac{v}{d}} - \frac{5I^2 R_{20^\circ}}{42\pi d n^2} \right)^2 + \left(\frac{500}{3} + \frac{37500}{7} \sqrt{\frac{v}{d}} \right) t_{\text{возд}} + \frac{1150I^2 R_{20^\circ}}{21\pi d n^2}}. \quad (5)$$

Анализ формул (1) и (5) показывает, что при заданной конструкции фазы линии активное сопротивление провода является функцией трех переменных величин: рабочего тока, температуры воздуха и скорости ветра.

Токовая нагрузка проводов непосредственно зависит от класса напряжения линии, ее роли в объединенной энергосистеме. Наибольшие допустимые по условиям устойчивости параллельной работы примыкающих энергосистем значения передаваемых мощностей и соответствующих им рабочих токов линий электропередачи 220-1150 кв ориентировочно могут быть приняты в соответствии с данными, приведенными в табл. 1.

На большей части территории СССР температура воздуха не выходит за пределы $\pm 40^\circ$ С, а скорость ветра изменяется от 0 до 30 $м/сек$. При этом максимальные положительные и отрицательные значения температуры воздуха $t_{\text{возд}}$, как правило, регистрируются при скорости ветра v , близкой к нулю,

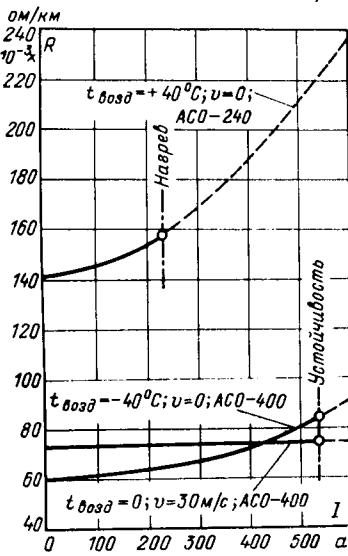


Рис. 1. Зависимости активных сопротивлений линий электропередачи 220 кв от рабочего тока и метеорологических условий.

наилучшим условиям охлаждения ($t_{возд} = -40^{\circ}\text{C}$, $v = 0$ или $t_{возд} = 0$, $v = 30 \text{ м/сек}$) провода ACO-400, сечение которого является практически наибольшим из числа применяемых на линиях электропередачи 220 кв. Токовая нагрузка изменилась от нуля до значения, соответствующего допустимой температуре нагрева проводов $+70^{\circ}\text{C}$ (кривая 1) или допустимого по условиям обеспечения устойчивости параллельной работы (кривые 2 и 3). С учетом сказанного выше экстремальные значения активного сопротивления линий электропередачи 220 кв составили $60 \cdot 10^{-3} \text{ ом/км}$ и $158 \cdot 10^{-3} \text{ ом/км}$, а их отношение приблизительно 2,6.

Аналогичные расчеты были выполнены для линий электропередачи классов напряжения 500 и 1150 кв. Все полученные результаты совмещены на рис. 2, позволяющем проанализировать зависимость экстремальных значений активного сопротивления от класса напряжения линий электропередачи.

Рассмотрение рис. 1 и 2 показывает, что условия охлаждения проводов при $t_{возд} = -40^{\circ}\text{C}$ и $v = 0$ более благоприятны, чем при $t_{возд} = 0$ и $v = 30 \text{ м/сек}$.

Из табл. 1 следует, что с ростом номинального напряжения в диапазоне 220—1150 кв наибольшая токовая нагрузка, приходящаяся на каждый провод фазы, уменьшается более чем в 2 раза. Тем не менее при одинаковых метеорологических условиях отношение экстремальных значений активного сопротивления линий электропередачи этих классов напряжения изменяется весьма незначительно и составляет $2,6 \div 2,3$. В то же время вследствие увеличения числа проводов в фазе и уменьшения их токовой нагрузки диапазоны изменения абсолютных значений активного сопротивления уменьшаются и во все меньшей степени зависят от сечения провода, а также режима работы и метеорологических условий. Поэтому, чем ниже номинальное напряжение линии, тем более точно необходимо учитывать реальные условия работы проводов. В первую очередь этот вывод относится к линиям электропередачи напряжением 220 кв и ниже с одиночными проводами в фазе.

Активная проводимость. Погонная активная проводимость линий электропередачи

$$q = \frac{\Delta P_k}{U^2}, \quad (6)$$

где ΔP_k — потери мощности на корону проводов, квт/км; U — рабочее напряжение линии, кв.

При заданной конструкции линии потери мощности на корону зависят от рабочего напряжения, погоды на трассе и

¹ Авторы выражают признательность И. С. Хазиной, Г. В. Чучкину, Л. А. Шмидту за помощь при проведении весьма трудоемких расчетов.

а максимальные значения скорости ветра v — при температуре воздуха $t_{возд}$, близкой к нулю.

Расстояния между фазами и между проводами в расщепленной фазе, высота опоры и другие конструктивные параметры (за исключением радиуса провода и числа проводов в фазе) на значение активного сопротивления линии не оказывают никакого влияния. Поэтому можно проанализировать изменение активного сопротивления в пределах класса напряжения. На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости R от тока для линий электропередачи 220 кв при различных сочетаниях расчетных метеорологических условий¹.

Кривая 1 соответствует наихудшим условиям охлаждения ($t_{возд} = +40^{\circ}\text{C}$, $v = 0$) минимально допустимого по условиям охлаждения провода ACO-240. Кривые 2 и 3 соответствуют

| Таблица 1 | | | | |
|----------------------|---|---------------------------------|------------------|--|
| Напряжение линии, кв | Наибольшая передаваемая мощность по одной цепи, Мвт | Наибольший рабочий ток линии, а | Конструкция фазы | Наибольшая токовая нагрузка на один провод фазы, а |
| 220 | 200 | 535 | ACO-240-400 | 535 |
| 500 | 900 | 1035 | 3×ACO-330-500 | 345 |
| 1150 | 4000 | 2010 | 8×ACO-300-400 | 250 |

относительной плотности воздуха [Л. 6]. В [Л. 7] было показано, что колебание относительной плотности воздуха определяется в основном изменением температуры воздуха и почти не зависит от изменения атмосферного давления. С учетом сказанного следует, что при заданной конструкции линии значение активной проводимости для каждой расчетной группы погоды является функцией двух переменных величин: рабочего напряжения и температуры воздуха.

В соответствии с опытом эксплуатации отклонения рабочего напряжения от номинального значения приняты равными для напряжений $220 \text{ кв} \pm 15\%$; $330 \text{ кв} \pm 10\%$; 500 кв и выше $\pm 5\%$.

Диапазоны изменения температуры воздуха для расчетных групп погоды составляют:

| | |
|----------------|--------------------------------|
| Хорошая погода | $+40 \div -40^{\circ}\text{C}$ |
| Дождь | $+40 \div 0^{\circ}\text{C}$ |
| Снег, изморозь | $0 \div -40^{\circ}\text{C}$ |

Активная проводимость при прочих равных условиях находится в весьма сложной зависимости от конструктивных параметров линии. Кроме того, с ростом номинального напряжения относительный диапазон изменения рабочего напряжения не остается постоянным. Поэтому в отличие от активного сопротивления не удалось получить зависимостей экстремальных значений активной проводимости от класса напряжения линий электропередачи.

Расчеты активной проводимости, результаты которых приведены в табл. 2, были выполнены применительно к отдельным вариантам конструктивного выполнения линий электропередачи 220, 330, 500, 750 и 1150 кв.

На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости q от U для одной из линий электропередачи 330 кв ($2 \times \text{ACO}-300/40$ на опоре ПБ-330-3) при различных расчетных группах погоды и соответствующих им диапазонах изменения температуры воздуха.

Для хорошей погоды и дождя при температуре воздуха $+40^{\circ}\text{C}$ максимальное значение расчетного напряжения было уменьшено по сравнению с наибольшим допустимым по условиям работы изоляции до значения, соответствующего нормируемой напряженности электрического поля на поверхности проводов, равной 0,9 напряженности начала общей короны.

Из рассмотрения табл. 2 и рис. 3 видно, что изменение рабочего напряжения, температуры воздуха и погодных условий оказывает на значение активной проводимости линий электропередачи сильное влияние. Причем с ростом номинального напряжения и уменьшением относительных пределов его регулирования влияние напряжения на величину активной проводимости снижается, а температуры воздуха — возрастает. Начиная с напряжения 500 кв экстремальные значения активной проводимости в основном зависят от температуры воздуха.

С ростом номинального напряжения абсолютные значения активной проводимости уменьшаются. Это объясняет

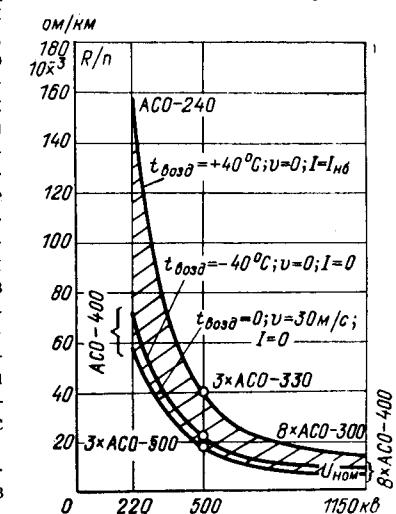


Рис. 2. Зависимости экстремальных значений активных сопротивлений линий электропередачи от класса напряжения.

Таблица 2

| Номинальное напряжение линии, кВ | Тип промежуточной опоры | Конструкция фазы | Расчетная температура воздуха | Погонная активная проводимость линии, $10^{-8} \text{ А/ом} \cdot \text{км}$ | | | | | | | |
|----------------------------------|--|------------------|-------------------------------|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | Хорошая погода | | Дождь | | Снег | | Изморозь | |
| | | | | U_{\min} | U_{\max} | U_{\min} | U_{\max} | U_{\min} | U_{\max} | U_{\min} | U_{\max} |
| 220 | ПБ-220-1 | ACO-300 | Минимальная | 0,3 | 1,1 | 14,5 | 33,0* | 1,7 | 7,4 | 20,0 | 48,8 |
| | | | Максимальная | 1,9 | 3,5* | 24,0 | 36,0* | 3,9 | 13,5* | 38,3 | 65,0* |
| 330 | ПБ-330-3 | 2×ACO-300/40 | Минимальная | 0,2 | 0,6 | 13,8 | 21,0 | 2,0 | 4,0 | 22,2 | 32,4 |
| | | | Максимальная | 0,8 | 2,2* | 20,4 | 28,0* | 3,6 | 7,3 | 33,6 | 43,6 |
| 500 | ПОФМ | 3×ACO-400/40 | Минимальная | 0,2 | 0,3 | 11,2 | 13,8 | 1,6 | 2,4 | 16,8 | 20,8 |
| | | | Максимальная | 0,7 | 1,0 | 15,6 | 18,4 | 3,0 | 4,1 | 25,6 | 29,6 |
| 750 | ПО | 4×ACO-600/60 | Минимальная | 0,2 | 0,4 | 14,6 | 17,4 | 2,0 | 3,2 | 19,2 | 24,4 |
| | | | Максимальная | 1,1 | 2,0 | 19,8 | 21,8 | 4,0 | 6,0 | 30,1 | 34,3 |
| 1150 | $D=22,6 \text{ м}$ $H=35 \text{ м}$ | 8×ACO-300/40 | Минимальная | 0,2 | 0,4 | 10,4 | 11,4 | 2,2 | 3,0 | 15,6 | 17,0 |
| | | | Максимальная | 1,3 | 1,5* | 13,2 | 13,5* | 4,0 | 5,2 | 20,6 | 21,8 |

* С учетом ограничения напряженности электрического поля на поверхности проводов до 90 % напряженности начала общей короны.

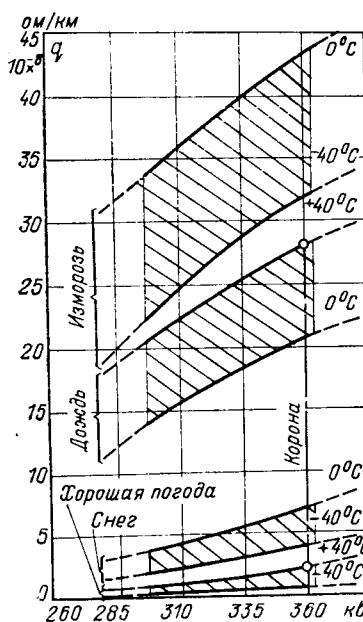


Рис. 3. Зависимости активной проводимости линии 330 кВ от рабочего напряжения и метеорологических условий.

ся тем, что значение U^2 растет быстрее, чем потери мощности на корону проводов. Несколько повышенные значения активной проводимости линии электропередачи 750 кВ являются следствием того, что сечение проводов ее на 2–3 ступени выше остальных сравниваемых линий.

Наименьшие значения активной проводимости соответствуют хорошей погоде, возрастают при снеге и дожде и достигают наибольших величин при изморози. В связи с тем, что диапазон изменения температуры воздуха при хорошей погоде в 2 раза шире, отношения экстремальных значений активной проводимости для нее оказались гораздо выше, чем для остальных расчетных групп погоды:

| | |
|----------------|----------|
| Хорошая погода | 5,0–11,7 |
| Дождь | 1,3–2,5 |
| Снег | 2,4–8,0 |
| Изморозь | 1,4–3,3 |

Результирующие отношения экстремальных значений активных проводимостей для рассматриваемых линий электропередачи следующие: 220 кВ — 216; 330 кВ — 218; 500 кВ — 148; 750 кВ — 172; 1150 кВ — 109.

Приведенные выше цифры показывают, что с ростом номинального напряжения влияние рабочего напряжения, температуры воздуха и погодных условий на значение активной проводимости линий электропередачи ослабевает, но тем не менее продолжает оставаться весьма значительным. Поэтому учет реальных условий работы проводов целесообразен для линий электропередачи всех классов напряжения.

Выводы. 1. При экстремальных значениях режимных и метеорологических параметров относительные диапазоны изменения активных сопротивлений и проводимостей линий электропередачи 220–1150 кВ с учетом существующих ограничений по устойчивости, нагреву и короне проводов примерно составляют: для активного сопротивления — 2,5; для активной проводимости — 200÷100.

Таким образом, активное сопротивление проводов в значительно большей степени зависит от режимных и метеорологических условий, чем от конструкции проводов и их разрушения под действием коррозии.

2. С ростом номинального напряжения абсолютные значения активного сопротивления и активной проводимости уменьшаются и во все меньшей степени зависят от режима работы и метеорологических условий трассы. Поэтому чем ниже номинальное напряжение, тем более строго необходимо учитывать реальные условия работы проводов линий электропередачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман Л. Р., Зайцев И. А. Электрические параметры сталеалюминиевых проводов. — «Электричество», 1935, № 19, с. 7–9.

2. Кузнецов И. Ф., Каган В. Г., Малоян К. Ф. Электрические параметры сталеалюминиевых проводов на промышленной и высоких частотах. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1968, № 3, с. 38–46.

3. Кузнецов И. Ф., Ганичев Г. Л. Активное сопротивление сталеалюминиевых проводов для линий сверхвысокого напряжения. — «Электрические станции», 1972, № 7, с. 48–50.

4. К исследованию роста активных сопротивлений проводов воздушных ЛЭП морских нефтяных промыслов от коррозии. — «Изв. вузов. Нефть и газ», 1969, № 3, с. 107–111. Авт.: Рудзкий З. И., Метт Ю. С., Бруно В. В., Гурфинкель Е. Б.

5. Активное сопротивление проводов воздушных линий в районах с коррозионно-агрессивными условиями. — «Электрические станции», 1973, № 5, с. 43–45. Авт.: Спирин А. А. Салам-заде М. М., Бруно В. В., Гурфинкель Е. Б.

6. Емельянов Н. П., Козлов В. С. Коронный разряд на проводах. Минск, «Наука и техника», 1971, 239 с.

7. Лыков Ю. И., Мельзак И. Я. О статистико-вероятностной оценке атмосферного давления и относительной плотности воздуха. — «Электричество», 1972, № 10, с. 16–19.

[6.3.1974]



О применении принципов векторной оптимизации к задаче расстановки опор линий электропередачи по профилю

Канд. техн. наук ШНЕЛЛЬ Р. В., инженеры МИТРОФАНОВ Е. Н.,

ЗАИКИН В. С.

Новосибирск

Настоящая статья является дальнейшим развитием принципов автоматизации проектирования, изложенных в [Л. 1 и 4], применительно к конкретной области электроэнергетики — проектированию воздушных линий электропередачи (ВЛ). При автоматизации проектирования ВЛ одним из существенных вопросов является разработка алгоритма оптимальной расстановки опор по профилю трассы ВЛ.

В общем случае расстановка опор представляет собой процесс последовательного нахождения мест установки отдельных опор на основании данных о предыдущих опорах путем расположения кривой провисания провода (в пределах пролета) в соответствии с допустимым габаритом до земли или пересекаемых сооружений. При этом определяются количества опор, их типы, фундаменты, объемы строительных работ и транспортных перевозок и т. п., т. е. основная информация для выполнения большинства этапов процесса проектирования ВЛ. В практике проектирования на выполнение расстановки опор затрачивается обычно более 1/3 всего времени выполнения проекта ВЛ.

Место установки опоры на анкерном участке определяется типом и взаимным расположением рассматриваемой и соседних опор, параметрами провода, а также климатическими, геологическими, топографическими и другими условиями. При применении унифицированных опор всякое уменьшение пролета (относительно пролета, согласованного с кривой провисания провода) приводит к недогрузке конструкций опор и соответственно ухудшает экономические показатели линии в целом. Увеличение же пролета относительно согласованного недопустимо, так как приводит к выходу из области допустимых технических решений. Таким образом, пролет может быть только уменьшен и лишь в случаях попадания места установки опоры в запретную зону (дороги, овраги и т. п.) или при возникновении невязки (несовпадения места установки последней опоры с заданной концевой точкой анкерного участка), когда из эстетических соображений невязку следует «разбросать» по пролетам.

Из опыта проектирования известно, что наиболее распространен случай использования в качестве промежуточных опор какого-либо одного типа, при этом пересечения преодолеваются одним из следующих способов: установкой подставок, переносом пересекаемой линии более низкого напряжения, укладкой пересекаемой линии на данном участке в кабель, подсыпкой грунта под опору и др. Проектные решения, при-

нимаемые в каждом конкретном случае, выбираются на основании технико-экономического сравнения вариантов только для этого случая и не учитывают его влияния на экономические показатели линии в целом. Между тем для средне- и сильно-пересеченной трассы установка опор разной высоты или типов при условии их вписывания в рельеф может оказаться более эффективной. Однако количество вариантов расстановок в этом случае значительно возрастает, и выбор наилучшего из них становится затруднителен.

Удобнее при наличии нескольких типов опор и последовательном прохождении трассы от одного конца процесс расстановки опор представить в виде графа — дерева вариантов, множество вершин которого представляет множество точек установки опор, а цепь связных точек, начинающаяся от висячей вершины и до начальной вершины — вариант расстановки. Таким образом, количество вариантов будет определяться количеством висячих вершин дерева, которое возрастает с каждым шагом в соответствии со степенной функцией $k = m^t$, где m — количество типов опор; t — число шагов.

При такой трактовке задачи расстановки опор проблема выбора решения при значительных m и t не может быть сведена к полному перебору вариантов в силу их большого количества. Поэтому необходимо найти способы определения на некоторых промежуточных этапах тех ветвей дерева вариантов, которые не приводят к оптимальному решению и в силу чего могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения. Такое усечение позволяет организовать поиск оптимального решения в ограниченном множестве вариантов. Рис. 1 иллюстрирует процесс расстановки двумя типами опор и его представление в виде графа.

Проблема оптимальной расстановки опор в основном состоит в выборе:

- 1) принципа оптимальности, на основании которого дается оценка эффективности вариантов;
- 2) метода усечения дерева вариантов и организация поиска оптимальных решений.

В известных решениях проблемы оптимальной расстановки оба указанных вопроса так или иначе рассматривались исследователями, причем, если при выборе метода поиска вариантов реализуются наряду с полным перебором [Л. 6] также различные методы частичного перебора [Л. 5], то при выборе принципа оптимальности в качестве единственного критерия оптимальности во всех разработках выбирался критерий минимальных расчетных затрат.

Между тем опыт проектирования ВЛ показывает, что решения, принимаемые в соответствии с указанным критерием, часто не согласуются с решениями, принимаемыми в практике проектирования. Причина такой несогласованности состоит в том, что хотя критерий минимальных расчетных затрат и является основным при выборе оптимальных решений, он может успешно применяться лишь в случае выбора решения в системах, которые характеризуются достаточно полной определенностью при задании исходной информации, в которых выявлены все внутренние и внешние связи, найдены их функциональные зависимости и оценены все влияющие факторы в рублях [Л. 2].

Для задач, характеризующихся сложными внутренними и внешними связями, к которым с полным правом можно отнести расстановку опор ВЛ по профилю, оценка выбранного решения по одному скалярному критерию снижает эффективность получаемых оптимальных решений гораздо настолько, что оказывает серьезное влияние на качество проектирования. Поэтому, моделируя процесс расстановки опор, следует учитывать наличие большого числа факторов и возможные влияния их друг на друга.

На рис. 2 представлена структурная схема этапа расстановки опор в его связи с другими этапами выполнения проекта ВЛ. Этап расстановки тесно связан с информационно-алгоритмической базой всего процесса проектирования и при автоматизации проектирования ВЛ должен являться центральным звеном, увязывающим комплекс отдельных программ в единую систему. В настоящее время для решения задач, имеющих сложные внутренние и многочисленные внешние связи, характерен многокритериальный подход, учитывающий влияние на

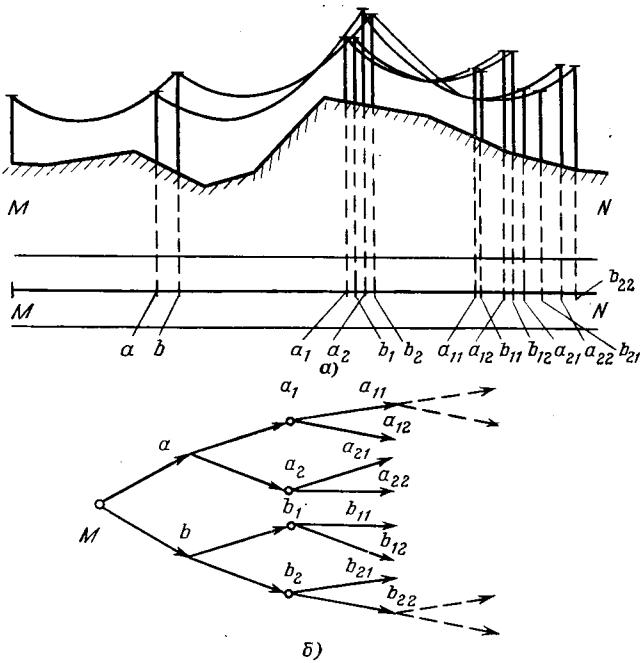


Рис. 1.

В результате применения принципов векторной оптимизации для расстановки опор в конечном счете может получиться не одно решение, а несколько равнооптимальных. Выбор решения в этом случае следует передать лицу, ответственному за принятие решения.

Перейдем к рассмотрению вопроса о выборе метода усечения дерева вариантов. Из вышеизложенного ясно, что при многокритериальном подходе к выбору оптимального решения возрастают вычислительные трудности, связанные с учетом дополнительных факторов, отсутствующих при однокритериальной оптимизации. Это приводит к поиску эффективного метода усечения вариантов дерева, позволяющего сократить объем вычислений и организовать поиск оптимальных решений среди усеченного множества вариантов.

Идея выбора метода усечения дерева вариантов в задаче расстановки опор основана на том факте, что при последовательной расстановке от одного конца все множество вариантов дерева располагается по одной линии, к которой можно привести, несколько идеализируя, анкерный участок. Поэтому, начиная с некоторого шага, в соответствии с пройденным расстоянием вершины отдельных ветвей дерева вариантов (точки установки опор), проектируясь на линию, будут совпадать либо располагаться в непосредственной близости друг от друга (рис. 1). В этом случае для таких точек, представляющих на данном шаге висячие вершины дерева и соответственно принадлежащие им варианты расстановок, имеет смысл провести промежуточную оптимизацию согласно выбранному принципу оптимальности и отсечь варианты, не удовлетворяющие данному принципу.

Таким образом, усечение вариантов заключается в выявлении на каждом шаге расстановки опор некоторого подмножества вариантов, для которых координаты установки последних опор снятой степенью точности практически совпадают, и проведении внутри найденного подмножества промежуточной оптимизации, позволяющей отсечь варианты, образующиеся из висячих вершин, не удовлетворяющие выбранным принципам оптимальности. Реализация такого метода усечения позволяет получить на конечной точке число вариантов $k' \ll k$, среди которых и определяется один или несколько равнооптимальных вариантов.



Влияние способа учета нагрузки на динамическую устойчивость сложных энергетических систем

Канд. техн. наук СТЕФАН ИЛИЕВ

Болгария

При исследовании переходных электромеханических процессов в сложных энергетических системах комплексная нагрузка представляется обычно постоянным полным сопротивлением или с помощью эквивалентного двигателя. Исследования погрешности, которая вносится в расчет динамической устойчивости при этих двух видах представления нагрузки, проведены для простой электрической системы — два генератора, питающие общую нагрузку [Л. 1]. В [Л. 1] показано, что отклонения углов роторов генераторов получаются меньшими, когда нагрузка представлена посредством $\tau = \text{const}$, т. е. решение об устойчивости системы может оказаться неверным. Независимо от этого при практических расчетах устойчивости энергетических систем в большинстве случаев нагрузка представляется посредством постоянного полного сопротивления.

В условиях сложных энергетических систем, однако, как это показано в [Л. 3], влияние параметров системы на качание генераторов независимо от их близости до места возмущения может отличаться от результатов, полученных для простых схем. Отсутствуют работы, которые указали бы подходящий способ представления комплексной нагрузки в разных узловых точках сложных энергетических систем, несмотря на большое практическое значение этого вопроса при решении задач с оперативными, перспективными и научно-исследовательскими целями.

Очевидно, что применение точного метода представления нагрузки эквивалентным асинхронным двигателем во всех узлах системы на практике трудно осуществить даже при использовании современной вычислительной техники. Кроме того, время, необходимое для проведения вычислений, может

Выводы. 1. Проблема оптимальной расстановки опор должна решаться на основе многокритериального подхода, предполагающего учет совместно с основным критерием минимума затрат ряда дополнительных критериев.

2. Компоновка вектора эффективности на основе заданной предпочтительности ряда частных критериев дает возможность проектировщику получать компромиссные решения, отвечающие реальным условиям проектирования.

3. Стратегия поиска оптимального решения, основанная на методе усечения дерева вариантов по совпадающим вершинам графа, существенно уменьшает перебор вариантов при поиске решения.

4. Многокритериальный подход к задаче не предполагает получение единственного оптимального решения, поэтому окончательный выбор среди равнооптимальных вариантов должен осуществляться лицом, ответственным за принятие решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заикин В. С., Ирлахман М. Я., Митрофанов Е. Н., Шнелль Р. В. Принципы автоматизированной системы проектирования линий электропередачи. — «Электричество», 1973, № 2.
2. Веников В. А., Арзамасцев Д. А. О построении экономико-математических моделей электроэнергетических систем. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1970, № 2.
3. Борисов В. И. Проблемы векторной оптимизации. — В сб.: Исследование операций. Методологические аспекты. М., «Наука», 1972.
4. Веников В. А., Шнелль Р. В. Моделирование и автоматизация процесса проектирования электроэнергетических объектов. — «Электричество», 1970, № 8.
5. Кадешвили В. Г., Урушадзе Л. С. Оптимальное размещение опор по трассе с помощью ЭЦВМ. — «Электричество», 1968, № 5.
6. Converti V., Hyland E. I., Tickle D. E. Optimized Transmission Tower Spotting on Digital Computer. — «IEEE Power Apparatus and Systems», April, 1962, № 23.

[22.10.1973]

УДК 621.311.016.352.016.3

оказаться неприемлемым для целей проводимого исследования. Учитывая обстоятельство, что точное определение параметров эквивалентного двигателя связано с большими затруднениями, вопрос о виде представления нагрузки в проведенных исследованиях связывается с исследованием влияния неточности исходных данных о мощностях и постоянных времени инерции двигателей на динамическую устойчивость сложной энергетической системы.

Основные положения используемого метода. Вычисления проводятся с применением теории планирования эксперимента. В общем случае исследуемая зависимость, так называемая поверхность отклика, выражает связь между величиной, играющей роль критерия оценки характера определенного процесса или параметра, подлежащего оптимизации, и определенным числом независимых переменных, изменяющихся в определенных границах. Эту зависимость можно представить аналитически с помощью заданной функции. Так как исследование проводится обычно при неполном познании механизма исследуемого явления, то точное выражение этой функции неизвестно. Вот почему ее можно принять как полином, полученный от разложения функции в степенной ряд Тейлора [Л. 4],

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i>j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_{ii}^2 + \dots, \quad (1)$$

где y — исследуемая функция; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} — коэффициенты уравнения регрессии; x_i — независимые переменные; k — число независимых переменных.

Таблица 1

| Опыты | Переменный параметр | | | Кодовое обозначение | Результат опытов |
|-------|---------------------|-------|-------|---------------------|------------------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | | |
| 1 | — | — | + | (1) | y_1 |
| 2 | + | — | — | a | y_2 |
| 3 | — | + | — | b | y_3 |
| 4 | + | + | + | ab | y_4 |

Особенности используемых схем планирования будут иллюстрироваться посредством указанной в табл. 1 схемы планирования типа 2² для обеих переменных x_1 и x_2 , изменяющихся в двух уровнях.

В указанной схеме приняты следующие символические обозначения: плюс и минус — верхняя и нижняя границы изменения переменных x_1 и x_2 ; буквы a , b показывают, что в соответствующем ряду схемы планирования одна из переменных находится на верхней своей границе; произведение ab — обе переменные находятся на своей верхней границе; символ (1) — все переменные находятся на нижних границах.

Если исследования проводятся с применением схемы, указанной в табл. 1, то их проводят при так называемом полном факторном планировании. Когда некоторые из взаимодействий x_1x_2 , x_1x_3 и т. д. заменяются новой переменной величиной ($x_1x_2=x_3$ и т. д.), то переходят к факторному планированию, а когда все взаимодействия заменены новыми параметрами — к насыщенному планированию эксперимента.

Принятие факторного или насыщенного планирования показывает, что соответственно для некоторой части или для всех переменных поверхность отклика (1) изменяется линейно в принятых границах изменений этих переменных. Факторное планирование, при котором p эффекты взаимодействия заменяются новыми независимыми, обозначается 2^{k-p} (k — число независимых переменных).

При исследованиях, связанных с применением теории планирования эксперимента, существенным моментом является правильный выбор степени полинома, выражающего уравнение регрессии. Так как не существует метода предварительного определения степени этого уравнения, то решение этого вопроса на практике осуществляется следующим образом:

а) интуитивно — в зависимости от опыта и познаний исследователя относительно исследуемого процесса;

б) с помощью последовательного регрессионного анализа. Вычисления начинают с принятия линейной зависимости. Проводится анализ для определения значимости полученного уравнения с помощью критерия Фишера [Л. 5]. Если уравнение окажется незначимым, расчеты проводят снова, выбирая более узкие границы варьирования параметров, или же проводят дополнительные эксперименты для определения коэффициентов нового уравнения высшего порядка;

в) посредством принятия неполного или в некоторых случаях полного квадратичного уравнения. Анализ значимости коэффициентов с помощью критерия Стьюдента [Л. 5] устанавливает точный вид уравнения регрессии. Этот более точный подход обычно применяется для определения оптимальных условий процесса и применяется только в случаях небольшого количества независимых переменных, так как число экспериментов чувствительно растет с увеличением числа переменных.

Поставленную цель проведенного исследования можно достичь посредством применения факторного планирования, т. е. когда уравнение (1) является неполным квадратичным уравнением. В таком случае коэффициенты уравнения регрессии определяются выражениями:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N y_u}{N}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{N};$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{N}; \quad (2)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, k; \quad u = 1, 2, \dots, N; \quad i \neq j;$$

где N — число опытов, вычислений; x_{iu} — значение (± 1) i -го опыта соответствующего i -столбцу схемы планирования; y_u — результат u -го опыта.

В уравнении (1) значения переменных x_i определены выражением

$$x_i = \frac{X_i - X_{i6}}{\Delta X_i}, \quad (3)$$

где ΔX_i — диапазон изменения параметра x_i ; X_{i6} — базисное значение, вокруг которого варьирует параметр x_i .

Статистический анализ уравнения регрессии состоит в следующем:

а) Проверяется значимость коэффициентов b_i уравнения с помощью критерия Стьюдента. Если выполнено условие

$$|t_i| = \left| \frac{b_i \sqrt{N}}{s_y} \right| < t_T, \quad (4)$$

где t_T — критическое значение, определенное соответствующими таблицами Стьюдента [Л. 5] при степени свободы $f_1 = N - 1$ и уверенности $p = 0,95$, то можно принять, что переменные, связанные с коэффициентами b_i , не влияют на исследуемую величину и их можно исключить из уравнения регрессии.

б) Проверяется адекватность принятого полинома исследуемой зависимости, используя критерий Фишера. Если выполнено неравенство

$$F = \frac{s_R^2}{s_y^2} < F_{Tf_Rf_2} \text{ при } s_R^2 > s_y^2, \quad (5)$$

где s_R^2 — дисперсия, характеризующая рассеяние точек по отношению к функции регрессии; s_y^2 — дисперсия оцениваемой величины; $F_{Tf_Rf_2}$ — табличное значение [Л. 5] при степени свободы f_R и f_2 и уверенности $p = 0,95$; $f_2 = N - 1$ — степень свободы при вычислении дисперсии s_y^2 , то можно утверждать с уверенностью $p = 0,95$, что принятый полином адекватен исследуемой зависимости.

Дисперсия s_R^2 определяется выражениями:

$$s_R^2 = \frac{S_R}{f_R};$$

$$S_R = \sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2; \quad f_R = N - k_3 - 1, \quad \left. \right\} \quad (6)$$

где \hat{y}_u — результат, полученный для u -го опыта с помощью уравнения регрессии; k_3 — число независимых значимых переменных.

Дисперсия s_y^2 характеризует ошибку эксперимента s_y . Когда эта дисперсия не известна, ее можно принять равной

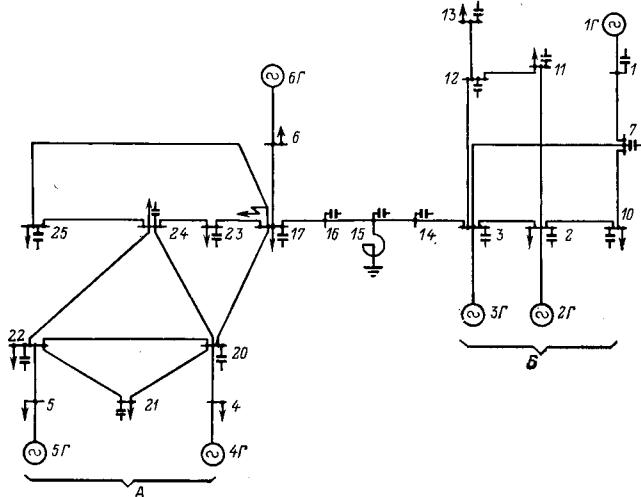
$$s_y^2 = [(0,025 \pm 0,05) b_0]^2. \quad (7)$$

Критерий Фишера нельзя применять, когда эксперименты проведены согласно насыщенному планированию и когда все переменные окажутся значимыми, так как тогда $f_R = 0$. В таком случае для приближенной оценки адекватности уравнения регрессии вычисляется разница ($y_0 - b_0$), где y_0 — значение исследуемой величины при базисных значениях переменных. Если эта разница не больше ошибки эксперимента (2,5—5% от y_0), то считается, что полученное уравнение с достаточной точностью отражает исследуемую зависимость.

Условия и предпосылки исследования. Исследования проводятся для энергетической системы, приведенной на рис. 1 при следующих условиях: регуляторы возбуждения всех генераторов учитываются упрощенно как $E' = \text{const}$ за соответствующим индуктивным сопротивлением; регуляторы скорости обладают статизмом $\sigma = 7\%$ и постоянной времени $T_p = 0,5$ сек; проводится успешное АПВ на линии 17—25 через 0,4 сек при продолжительности двухфазного короткого замыкания на землю 0,12 сек.

С целью установления влияния удаленности от места возмущения исследуемые параметры — мощность комплексной нагрузки ($S = P + jQ$) и постоянная времени инерции T_J определяются в заданных узловых точках системы 4, 5 и 17. Данные о нагрузках в этих узлах указаны в табл. 2. Мощность эквивалентного асинхронного двигателя принимается равной 60% от мощности комплексной нагрузки в соответствии выбранной узловой точке системы. Момент сопротивления приводимых в действие механизмов принимается постоянным. Кроме того,

Таблица 3



для установления одинаковых условий и возможности сравнения результатов настоящих исследований с результатами, полученными в [Л. 3], параметры регуляторов скорости (σ и T_p) генераторов Г4, Г5 и Г6 включены в схему планирования эксперимента. Расчеты проводятся при изменении исследуемых параметров в границах $\pm 25\%$.

Критерием при исследовании влияния параметров являются изменения, которые они вносят в максимальные взаимные углы между роторами генераторов по отношению к ротору первого генератора в продолжении всего переходного процесса. Расчеты при моделировании динамической составляющей комплексной нагрузки эквивалентным асинхронным двигателем и статической — постоянным сопротивлением проводятся согласно схеме планирования эксперимента типа 2¹²⁻⁸ [Л. 4] с использованием программы ВНИИЭ и цифровой машины М-220М.

Анализ результатов вычислений. Полученные результаты регрессии даны в табл. 3. Анализ оценки влияния исследуемых параметров показывает следующее.

а) Влияние параметров эквивалентного двигателя. Влияние мощности эквивалентного двигателя на качания генераторов оказывается значительно сильнее на генераторах в подсистеме А, чем на генераторах в отдаленной подсистеме Б. Допущенная неточность в учете полной мощности двигателей примерно на 1% вносит ошибку в максимальные углы отклонения роторов генераторов в системе порядка 10%. Эти результаты указывают на сильное влияние нагрузки на устойчивость системы и являются близкими к результатам, полученным в [Л. 3]. Влияние неточности постоянной времени инерции эквивалентного двигателя, величина которой изменяется в обычных пределах, указанных в литературе (3—5 сек), оказалось весьма слабым. Влияние T_p следует учитывать только тогда, когда асинхронные двигатели расположены вблизи генераторов, так как оно уменьшается при их удалении от них.

б) Влияние регуляторов скорости. Из табл. 3 видно, что допущенная ошибка (неточность) в значениях параметров регуляторов скорости порядка 10% может внести погрешность в рассчитанные максимальные углы качания роторов генераторов до 5%. Это показывает, что их влияние слабее, чем в случае, когда комплексная нагрузка в системе представляется постоянным полным сопротивлением [Л. 3].

в) Влияние вида моделирования комплексной нагрузки. С целью оценки этого влияния сравним результаты, полученные при представлении одной части комплексной нагрузки в сложной энергетической системе эквивалентным двигателем (табл. 3) и постоянным полным сопротивлением [Л. 3].

| Параметр | Коэффициент | Уравнение регрессии | | | | |
|---------------------|-------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | δ_{21} | δ_{31} | δ_{41} | δ_{51} | δ_{61} |
| — | b_0 | 33,46 | 32,52 | -12,49 | -17,30 | 21,65 |
| S_{ag17} | b_1 | -0,52* | -0,10* | 7,56 | 7,35 | -12,36 |
| T_{J17} | b_2 | 0,36* | -0,12 | -0,94 | -1,02 | -0,24* |
| S_{ag4} | b_3 | -1,23 | -1,88 | -18,97 | -18,90 | -16,28 |
| T_{J4} | b_4 | -0,67* | -0,27* | -1,31 | -1,17 | -1,37 |
| S_{ag5} | b_5 | -2,35 | -1,86 | -19,43 | -21,94 | -15,53 |
| T_{J5} | b_6 | 0,70* | 0,30* | 0,86 | 0,76 | 0,10* |
| $\sigma_{\Gamma 4}$ | b_7 | -0,64* | -0,24* | -0,44 | -0,74 | -0,37* |
| T_{p4} | b_8 | -0,51* | 0,10* | 0,65 | -0,98 | -0,47* |
| $\sigma_{\Gamma 5}$ | b_9 | 0,20* | -0,28* | -1,05 | -1,26 | -0,47* |
| T_{p5} | b_{10} | 0,35* | -0,12* | -0,16* | -0,18* | -0,76* |
| $\sigma_{\Gamma 6}$ | b_{11} | -0,07* | 0,44* | 0,93 | 0,95 | 1,34 |
| T_{p6} | b_{12} | -0,2)* | 0,20* | 0,50 | 0,30* | 0,92 |

* Этот коэффициент оказывается незначимым по критерию Стьюдента.

Уравнения регрессии [Л. 3], описывающие изменения максимальных значений взаимных углов δ_{ij} между роторами генераторов в системе в зависимости от активных и реактивных мощностей в узлах 4, 5 и 17, для сравнения с данными табл. 3 пересчитываются к полной мощности в соответствующих узлах. Тогда, регрессионные уравнения при представлении нагрузки постоянным сопротивлением принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}\delta_{21} &= 33,77 - 2,95S_4 - 3,30S_5 + 0,26S_{17} \\ \delta_{31} &= 33,40 - 3,05S_4 - 3,54S_5 + 0,25S_{17} \\ \delta_{41} &= -9,92 - 18,42S_4 - 21,56S_5 - 1,97S_{17} \\ \delta_{51} &= -16,51 - 16,88S_4 - 29,52S_5 + 2,32S_{17} \\ \delta_{61} &= 16,35 - 10,36S_4 - 19,56S_5 - 15,32S_{17}\end{aligned}\quad (8)$$

Из сравнивания соответствующих уравнений регрессии при двух различных представлениях нагрузки видно, что существует разница только в степени влияния исследуемых параметров (абсолютные значения b_i), а не в характере этого влияния, определяемом знаком коэффициентов b_i .

В уравнениях регрессии коэффициенты b_0 показывают средние значения углов δ_{ij} при варьировании переменных или их значения при нулевых отклонениях параметров по отношению к базисным величинам. Из сравнения коэффициентов b_0 уравнений регрессии для качаний соответствующих генераторов (уравнения (8) и табл. 3), видно, что ближайший к месту возмущения генератор Г6 в случае, когда комплексная нагрузка вблизи короткого замыкания представляется асинхронным двигателем, качается на 32% сильнее, чем при представлении нагрузки постоянным полным сопротивлением $z=\text{const}$.

С удалением генераторов от места возмущения влияние различного представления нагрузки уменьшается и теряет свое значение для удаленных генераторов в подсистеме Б. Из этого следует, что если в сложной энергетической системе переходные электромеханические процессы исследуются при представлении нагрузки вблизи места короткого замыкания посредством $z=\text{const}$, то по результатам вычислений можно прийти к выводу об устойчивости системы, а в действительности система может находиться в неустойчивом режиме. Этот вывод для частного случая простых энергетических систем согласуется с исследованиями в [Л. 1 и 2]. Следовательно, для практических исследований динамической устойчивости в сложных энергетических системах достаточно учитывать динамическую со-

Таблица 4

| δ_{ij} | Относительное влияние $ b_i / b_0 $ | | | | | |
|---------------|-------------------------------------|------|------|-----------------------------|------|------|
| | При постоянном сопротивлении | | | При эквивалентном двигателе | | |
| | Узлы | | | Узлы | | |
| | 4 | 5 | 17 | 4 | 5 | 17 |
| δ_{31} | 0,10 | 0,10 | 0,01 | 0,05 | 0,05 | — |
| δ_{41} | 1,90 | 2,16 | 0,20 | 1,50 | 1,55 | 0,59 |
| δ_{51} | 1,01 | 1,80 | 0,14 | 1,10 | 1,27 | 0,43 |
| δ_{61} | 0,64 | 1,20 | 0,04 | 0,75 | 0,72 | 0,57 |

ставляющую только ближайшей к месту возмущения нагрузки эквивалентным асинхронным двигателем, а нагрузки в других узловых точках системы — постоянными сопротивлениями. Этим достигается упрощение математической модели системы и значительное ускорение процесса вычисления без существенного влияния на точность исследования.

Практический интерес представляет вопрос, каково относительное влияние удаленности нагрузок от места возмущения в условиях изменения и неточности исходных данных ($\pm 25\%$), а также влияние различного представления нагрузок на ближайшие генераторы. Этую оценку можно сделать, вычисляя изменение отношения $|b_1|/|b_0|$ для исследуемых нагрузок в системе (табл. 4). Из табл. 4 видно, что относительное влияние отношения $|b_1|/|b_0|$ нагрузок, удаленных от места возмущения, на качания генераторов больше для близких к ним генераторов при их представлении $z=\text{const}$.

Этот вывод следует согласовать с тем обстоятельством, что в сложных энергетических системах влияние данного параметра системы на качания генераторов системы весьма различно (табл. 3 и [Л. 3]) и с точки зрения устойчивости не всегда ближайший к месту возмущения генератор находится в самом неблагоприятном положении.

Следовательно, если вычисления покажут, что нарушается устойчивость генератора, удаленного от места возмущения,

когда ближайшая к нему нагрузка была представлена $z=\text{const}$, то желательно провести дополнительное исследование при представлении этой нагрузки эквивалентным двигателем. В таком случае не исключено, что система окажется устойчивой, если этот генератор был в граничном по отношению к устойчивости режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азарьев Д. И. Математическое моделирование электрических систем. М., Госэнергоиздат, 1962.
2. Дерзкий В. Г., Цукерник Л. В. Применение метода статистических испытаний для анализа влияния упрощений методики расчета и неточности исходной информации при расчете на ЦВМ динамической устойчивости энергосистем. — В сб.: Анализ режимов электроэнергетических систем при помощи вычислительных машин. Киев, «Наукова думка», 1968.
3. Илиев С. Влияние некоторых факторов и их погрешности на динамическую устойчивость энергосистем. — «Электричество», 1972, № 11.
4. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М., «Наука», 1965.
5. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М., «Наука», 1971.

[11.4 1973]



УДК 621.314.6

Шестифазные мостовые преобразователи

Канд. техн. наук ПАЛВАНОВ В. Г.
Ташкент

Существует ряд схем вентильных преобразователей, весьма несходных друг с другом по названиям и по назначению и тем не менее принадлежащих к одному и тому же классу. Отождествление главных признаков этих схем, т. е. способа включения вентилей и числа первичных и вторичных фаз трансформатора, позволяет объединить их под названием шестифазных мостовых преобразователей. Эти схемы, как и однофазная мостовая имеют четное число вторичных фаз и, таким образом, предусмотрены в общей классификации вентильных преобразователей [Л. 1 и 2].

Шестифазные мостовые схемы по аналогии с шестифазными нулевыми могут быть простыми и сложными. Простые схемы состоят из шестифазного вентильного моста и трансформатора, вторичные обмотки которого создают шестифазную систему э. д. с. (рис. 1). В зависимости от способа соединения вторичных обмоток трансформатора шестифазные мостовые можно разделить на три группы: схемы разомкнутого типа (рис. 1, б и в); схемы замкнутого типа (рис. 1, г—е); комбинированные схемы разомкнутого-замкнутого типа (рис. 1, ж—з).

Продолжительность работы вентиляй в простых шестифазных мостовых схемах, как и в соответствующих нулевых, составляет 60° , а соотношение между средним значением напряжения на стороне постоянного тока в режиме холостого хода и линейным напряжением вторичных обмоток трансформатора равно:

$$U_{d0} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 2,3U_2.$$

Схемы соединения вторичных обмоток трансформатора на рис. 1, б—г являются стандартными. Схема на рис. 1, е также напоминает стандартную схему «два треугольника», но отличается от последней наличием в точках пересечения сторон треугольников электрических соединений, без которых шестифазная мостовая схема превращается в параллельное соединение двух трехфазных мостовых схем.

В таблице приведены некоторые показатели простых шестифазных мостовых схем при различных способах соединения вторичных обмоток трансформатора.

Наибольшую мощность имеет трансформатор при соединении его вторичных обмоток шестифазной звездой (рис. 1, б), что объясняется большой величиной 3-й и кратных ей гармонических в токах первичных и вторичных обмоток в этой схеме (величина 3-й гармонической по отношению к 1-й составляет 66,7%). Содержание этих гармонических снижается вдвое

при соединении вторичных обмоток шестиугольником (рис. 1, г), благодаря чему заметно улучшается использование трансформатора. Общим для схем на рис. 1, б и г является то, что н. с., создаваемые 3-й и кратными ей гармоническими токов вторичных обмоток, взаимно не компенсируются на вторичной стороне, поэтому для устранения потока вынужденного однофаз-

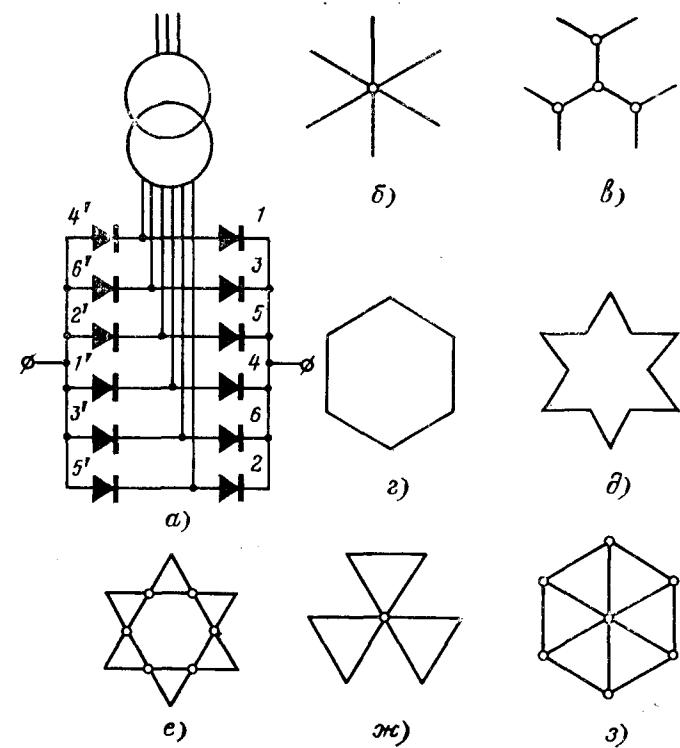


Рис. 1. Схема простого шестифазного мостового преобразователя (а) и способы соединения вторичных обмоток трансформатора (б—з).

| Наименование схемы | Количество вторичных обмоток на стержне | Мощность преобразователя любого трансформатора $S_{Tp}/U_{d0} I_d$ | Примечания |
|----------------------------|---|--|---|
| Разомкнутая (рис. 1,б) | 2 | $\frac{\pi}{V6} = 1,282$ | |
| Замкнутая (рис. 1,г) | 2 | $\frac{\pi}{2V2} = 1,111$ | |
| Разомкнутая (рис. 1,б) | 3 | $\frac{\pi}{12} (3 + V2) = 1,155$ | |
| Замкнутая (рис. 1,г) | 4 | $\frac{\pi}{6V2} (V2 + V3) = 1,164$ | Намагничивающие силы 3-й гармонической тока на вторичной стороне трансформатора не компенсированы |
| Замкнутая (рис. 1,г) | 6 | $\frac{\pi}{18V2} (4V2 + V11) = 1,107$ | |
| Комбинированная (рис. 1,ж) | 3 | $\frac{\pi}{12V3} (1 + 2V3 + V10) = 1,152$ | |
| Комбинированная (рис. 1,з) | 4 | $\frac{\pi}{6V6} (1 + V3 + V6) = 1,107$ | То же, при условии равенства активных сопротивлений всех вторичных обмоток трансформатора |

ного намагничивания трансформатора его первичные обмотки следует соединять треугольником.

Этот недостаток устраняется при соединении вторичных обмоток двойным зигзагом (рис. 1,в) или по схеме на рис. 1,д. Обеспечить полную компенсацию и. с. 3-й и кратных ей гармонических на вторичной стороне трансформатора можно и в схеме на рис. 1,з [Л. 3], благодаря тому, что эти гармонические в обмотках шестиугольника и шестифазной звезды имеют различные направления. Расчеты показывают, что полная компенсация достигается в том случае, когда активное сопротивление обмоток шестиугольника вдвое больше активного сопротивления обмоток шестифазной звезды. Недостатком схемы на рис. 1,з является сложность изготовления обмоток трансформатора с указанным соотношением их активных сопротивлений и поддержания постоянства этого соотношения в процессе работы тем более, что действующие значения токов этих обмоток находятся в другом отношении и нагрев обмоток может оказаться различным.

Полная компенсация н. с. 3-й и кратных ей гармонических на вторичной стороне трансформатора может быть достигнута также и в схемах на рис. 1,а и ж при условии равенства активных сопротивлений всех вторичных обмоток. При этом действующие значения токов во вторичных обмотках, расположенных на одном стержне, также получаются неодинаковыми.

Использование вентиля по напряжению в шестифазных мостовых схемах такое же, как и в трехфазной мостовой, но по току вентили используются несколько хуже: при одинаковых средних значениях анодного тока действующее его значение в шестифазных мостовых схемах в 1,41 раза больше.

Таким образом, по использованию вентиляй и трансформатора шестифазные мостовые схемы несколько уступают трехфазной мостовой, тем не менее в отдельных случаях их применение может оказаться более выгодным. Примером могут служить глубокорегулируемые преобразователи, в которых с целью повышения коэффициента мощности управление осуществляется только одной (катодной или анодной) группой вентиляй. Как известно, в трехфазной мостовой схеме при таком управлении в значительной степени возрастают пульсации выпрямленного напряжения в связи с появлением в его кривой 3-й гармонической, а в первичном токе появляются четные гармонические, приводящие к заметному снижению коэффициента искажения, в результате чего эффект повышения коэффициента мощности оказывается небольшим. Для устранения этих нежелательных явлений в [Л. 4] было предложено строить такие преобразователи на основе трехфазной двухмостовой схемы, в которой пульсации выпрямленного напряжения оказываются даже меньше, чем при симметричном управлении, а коэффициент искажения остается высоким на большей части диапазона регулирования выпрямленного напряжения. Парал-

ельную работу двухфазных мостов в этой схеме обеспечивают уравнительные реакторы, типовая мощность которых составляет около 15% от мощности преобразовательного трансформатора ($S_{tp} = 1,05 U_{dq} I_a$). Такие же результаты, но при более высоком использовании трансформаторного оборудования преобразователя достигаются в случае применения простых шестифазных мостовых схем. Очень важным является отсутствие в них уравнительных реакторов, которые предъявляют к системе управления вентилями особые требования и могут переходить в режим насыщения при несимметрии отпирающих импульсов [Л. 5].

Широкое применение могут получить сложные схемы шестифазных мостовых преобразователей, в состав которых кроме вентилей и трансформатора входят другие элементы (реакторы, конденсаторы). Примером сложной шестифазной мостовой схемы является схема, в которой для улучшения коэффициента сдвига преобразователя между нулевыми точками двух трехфазных вторичных обмоток включен конденсатор [Л. 5]. Весьма экономичная шестифазная мостовая схема с соединением вторичных обмоток трансформатора шестигранником была использована в основе предложенного в [Л. 6] механического (контактного) выпрямителя с коммутирующим устройством.

Несколько весьма экономичных схем шестифазных мостовых компенсационных выпрямителей описано в [Л. 7]. В этих схемах в отличие от схем со 120-градусной продолжительностью работы вентиляй требуется вдвое меньшая мощность трехфазного реактора коммутирующего устройства и обеспечивается умеренный рост обратного напряжения вентиляй при переводе выпрямителя в компенсационный режим.

Особую группу образуют шестифазные мостовые схемы с уравнительными реакторами, благодаря которым продолжительность работы вентиляй увеличивается до 120° . Одна из таких схем (рис. 2) предложена в [Л. 4] и использована в качестве основы для нескольких вариантов преобразователей с коммутирующими конденсаторами [Л. 8]. Эта схема была названа трехфазной двухмостовой, поскольку ее работа почти не отличается от работы двух параллельно включенных трехфазных мостовых схем. Все же название «шестифазная мостовая схема с уравнительными реакторами» представляется более точным, а двухмостовой можно назвать схему, состоящую из двух параллельно или последовательно включенных трехфазных мостов, питавшихся от двух изолированных друг от друга трехфазных обмоток трансформатора. В двухмостовой схеме вторичные обмотки трансформатора могут быть соединены только двумя способами — звездой или треугольником, тогда как в шестифазной мостовой схеме с уравнительными реакторами — любым из указанных на рис. 1, б — 3.

В шестифазных мостовых схемах с уравнительными реакторами нет необходимости принимать меры по устранению вынужденного однофазного намагничивания трансформатора, поэтому в них целесообразно использовать наиболее простые схемы соединения вторичных обмоток — шестифазной звездой

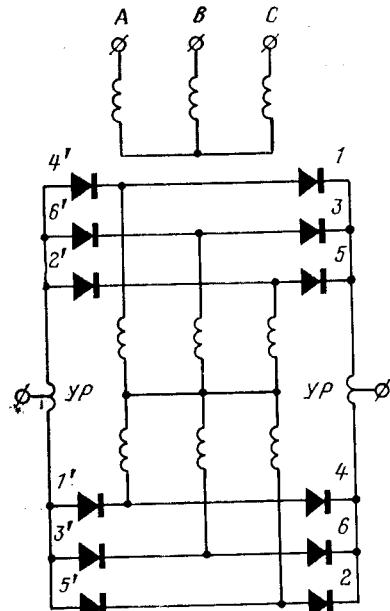


Рис. 2. Схема шестифазного мостового преобразователя с уравнительными реакторами.

или шестиугольником, которые в данном случае во всех отношениях эквивалентны друг другу.

Остановимся на одном свойстве схемы на рис. 2. При симметричном режиме ее работы ток в соединениях средних точек фаз вторичных обмоток равен нулю, и эти соединения можно не делать. Другими словами, эта схема может быть выполнена на двухобмоточном трансформаторе, причем в этом случае можно ограничиться установкой только одного уравнительного реактора. Важным свойством получаемой при этом схемы является ее эквивалентность по соотношениям между входом и выходом шестифазной нулевой схеме с уравнительным реактором. Это означает, что последняя может быть преобразована в шестифазную мостовую схему с двухобмоточным трансформатором и уравнительным реактором путем сравнительно несложных переключений. В результате такого преобразования ток вторичных обмоток трансформатора снижается в 1,41 раза, а потери в них — в 2 раза. Осуществление такого преобразования на широко распространенных в промышленности полупроводниковых шестифазных нулевых выпрямителях с уравнительным реактором позволит получить значительную экономию электроэнергии и увеличить срок службы трансформаторов за счет улучшения их температурного режима. Так, только на одном выпрямительном агрегате мощностью 10 тыс. кв·а годовая экономия электроэнергии составит 300—350 тыс. квт·ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Свечников С. В. Основы технической электроники. Киев, Гостехиздат, УССР, 1959, 454 с.
- Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей. М., «Наука», 1970, 320 с.
- Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов. М., «Энергия», 1969, 280 с.
- Чиженко И. М. О способе улучшения коэффициента мощности двухтактного преобразователя при глубоком регулировании напряжения управляющими сетками. — «Изв. Киевского политехнического института», 1957, т. XXII, с. 296—308.
- Каганов И. Л. Электронные и ионные преобразователи, ч. III. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956, 528 с.
- Механический выпрямитель с искусственной коммутацией. А. С. № 155220 (СССР). Опубл. в бюлл. «Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1963, № 12. Авт.: Клепиков В. Б., Гончаров Ю. П., Данилевич О. И., Хименко Л. Т.
- Хамудханов М. З., Палванов В. Г. Компенсационные выпрямители. Ташкент, «Фан», 1973, 192 с.
- Чиженко И. М. Исследование компенсационных преобразователей. Автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук. Киев, 1963 (КПИ).

[19.9.1973]



УДК 621.372.001.24

Сравнительная оценка объема вычислений при аналитических методах расчета коэффициентов чувствительности системных функций цепей

Канд. техн. наук АВДЕЕВ И. И.

Рига

Известно, что оценка стабильности электрической или электронной цепи при использовании аналитических методов связана с определением коэффициентов чувствительности той или иной ее системной функции к вариациям параметров элементов. При заданных предельных значениях погрешностей параметров элементов цепи или числовых характеристиках их вероятностного распределения наиболее трудоемкую часть анализа стабильности составляет расчет коэффициентов чувствительности [Л. 1—4]. Это подтверждается тем обстоятельством, что после определения коэффициентов чувствительности относительная погрешность системной функции для цепи, состоящей из элементов, и ее числовые характеристики могут быть рассчитаны по несложным приближенным зависимостям [Л. 1—6]:

$$\left. \begin{aligned} \delta T &= \sum_{i=1}^B S_{q_i}^T \delta q_i; \\ m_{\delta T} &= \sum_{i=1}^B S_{q_i}^T m_i; \\ \sigma_{\delta T}^2 &= \sum_{i=1}^B (S_{q_i}^T)^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i < j} r_{ij} S_{q_i}^T S_{q_j}^T \sigma_i \sigma_j, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $S_{q_i}^T = \frac{\partial T}{\partial q_i} \frac{q_i}{T}$; $S_{q_j}^T = \frac{\partial T}{\partial q_j} \frac{q_j}{T}$ — коэффициенты чувствительности системной функции цепи к вариациям параметров элементов; m_i , σ_i , σ_j — характеристики стабильности параметров элементов, постоянные или измеряющиеся во времени; $r_{ij} \neq 0$ — коэффициенты корреляции между параметрами элементов; δT , δq_i — относительные погрешности системной функции и параметров элементов.

Коэффициенты чувствительности $S_{q_i}^T$, $S_{q_j}^T$, погрешности системной функции δT и параметров элементов δq_i , а также характеристики стабильности их m_i , σ_i , σ_j , $\sigma_{\delta T}$ являются безразмерными величинами, так как они выражаются в виде отношений соответствующих вариаций указанных величин к их номинальным значениям.

6 Электричество № 6. 1974.

Формулы (1) можно использовать при анализе стабильности цепи по различным системным функциям ее T : выходным и передаточным проводимостям и сопротивлениям, коэффициентам передачи тока, напряжения и мощности.

При необходимости указанные характеристики стабильности системной функции могут быть уточнены путем учета нелинейных членов ряда относительной погрешности.

Это приведет к усложнению формул (1) примерно в 2—3 раза, но не вызовет существенных трудностей в проведении необходимых расчетов по ним. В то же время объем вычислений, связанных с определением коэффициентов чувствительности для цепи, состоящей из 20 и более элементов, оказывается настолько велик, что выполнить эти вычисления не всегда возможно даже при использовании ЦВМ.

В настоящее время известно несколько методов определения коэффициентов чувствительности системных функций цепи по заданной ее схеме и параметрам элементов. Среди них наибольшее распространение получили следующие: метод преобразованных цепей с использованием матричной записи уравнений [Л. 1, 5 и 12], метод полной вариации [Л. 2], комбинаторный метод [Л. 5], метод структурных [Л. 6] и обобщенных чисел [Л. 9], топологический метод и метод графов [Л. 7].

Каждый из перечисленных методов имеет определенные преимущества и недостатки. Однако в опубликованных работах они не сравниваются по каким-либо объективным количественным критериям. В качестве таких критерии в настоящей статье приняты объемы вычислений и памяти ЦВМ, необходимые для вычислений коэффициентов чувствительности системных функций цепей различной сложности при обеспечении равнозначной точности расчетов. В случае одинаковых показателей, полученных в ходе оценки методов по указанным критериям, лучше считать тот из них, который обеспечивает возможность использования разработанных программ при анализе более широкого класса электрических и электронных цепей.

Вывод аналитических зависимостей для объемов вычислений O_x и памяти P_x , необходимых при расчете коэффициентов чувствительности системных функций различными методами, сделан в предположении, что схема цепи известна и характеризуется числом элементов (ветвей) B , узлов N , графом, структурной матрицей или матрицей контуров [Л. 5], либо структурными и обобщенными числами [Л. 6 и 9].

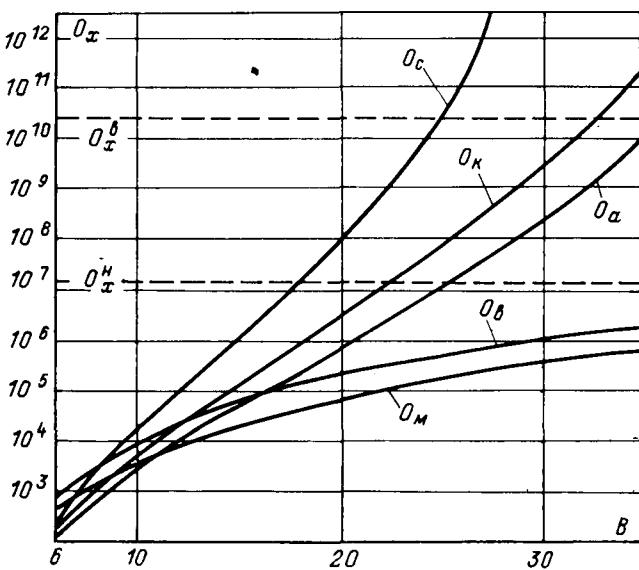


Рис. 1.

Сложность различных вычислительных операций учитывалась путем введения коэффициентов, численные значения которых принимались равными средним значениям отношений времени выполнения этих операций ко времени выполнения операции умножения на ЦВМ. Тем самым объем вычислений выражается числом условных операций, которые необходимо выполнить ЦВМ при расчете коэффициентов чувствительности системной функции цепи, а объем памяти — числом ячеек памяти.

Для топологического метода и метода графов принято в соответствии с имеющимися проработками [Л. 11 и 12], что по объему вычислений они эквивалентны методу структурных чисел.

Для остальных указанных выше методов после несложных, но громоздких преобразований, объемы вычислений O_x удалось представить такими зависимостями:

$$O_m = a_5 N^5 + a_4 N^4 + a_3 N^3 + a_2 N^2 + a_1 N + a_0; \quad (3)$$

$$O_b = b_5 N^5 + b_4 N^4 + b_3 N^3 + b_2 N^2 + b_1 N + b_0; \quad (4)$$

$$O_c = c_8 N_T^2 + c_7 N_T + c_6 (2B_{cp})^{N-2} + c_5 B_{cp}^{N-2} + c_4 N^4 + c_3 N^3 + c_2 N^2 + c_1 N + c_0; \quad (5)$$

$$O_k = k_4 C_B^{B-N+1} + k_3 C_{B-B_{cp}}^{B-N} + k_2 N_T + k_1 B; \quad (6)$$

$$O_a = A_2 N_T + A_1 B + A_0. \quad (7)$$

В (3)–(7) обозначено: O_m — объем вычислений, выраженный в условных операциях умножения, при расчете коэффициентов чувствительности методом преобразованных цепей с использованием матриц; O_b — объем вычислений при использовании метода полной вариации при учете только линейных членов [Л. 2]; O_c — объем вычислений при использовании

метода структурных чисел [Л. 6]; O_k — объем вычислений при использовании комбинаторного метода и матриц G_0 [Л. 5]; O_a — объем вычислений при использовании комбинированного метода и метода обобщенных чисел, предполагающих на первом этапе операции с алфавитами слагаемых числителя и знаменателя системой функции цепи; B — число элементов (ветвей) цепи; N — число узлов; N_T — количество деревьев цепи; B_{cp} — среднее число элементов, присоединенных к одному узлу; C_B^{B-N+1} , $C_{B-B_{cp}}^{B-N}$ — число соответствующих сочетаний; a_i , b_i — коэффициенты, зависящие от соотношений между временами выполнения различных вычислительных операций на ЦВМ; c_j , k_m , A_m — коэффициенты, зависящие как от указанных выше соотношений, так и числа элементов цепи.

Объемы памяти, необходимые при расчете коэффициентов чувствительности системных функций цепей указанными методами, выражаются подобными, но более простыми зависимостями.

Численные значения указанных количественных критерии, характеризующих различные методы, были рассчитаны для цепей различной сложности и представлены в виде графиков. На рис. 1 приведены графики, характеризующие необходимые объемы вычислений при расчете коэффициентов чувствительности указанными выше методами. Там же штриховыми линиями O_x^h и O_x^b показаны нижняя и верхняя границы возможных объемов вычислений в условных операциях, которые могут быть выполнены современными ЦВМ при непрерывной их работе в течение 8 ч.

На рис. 2 представлены графики объемов памяти Π_x , необходимых для обеспечения расчетов указанных коэффициентов чувствительности теми же методами. Штриховыми линиями Π_x^h и Π_x^b обозначены приближенно возможности современных ЦВМ по количеству ячеек памяти.

В качестве аргументов в обоих случаях используется число элементов цепи B , а соотношение между числами элементов B и узлов N принималось равным $N/B=0,53 \div 0,67$, которое охватывает наиболее часто встречающиеся на практике электрические и электронные цепи.

Сравнение рассматриваемых методов расчета коэффициентов чувствительности по критериям O_x и Π_x показывает, что метод структурных чисел требует наибольшего объема вычислений и является неэкономичным. Для схем, содержащих небольшое число элементов ($B < 14$), наиболее предпочтителен комбинированный метод (O_a), особенно при расчетах вручную, так как при использовании ЦВМ он требует каждый раз разработки специализированной программы. При $B > 14$ наименьшие объемы вычислений и памяти требуются при расчете коэффициентов чувствительности методом преобразованных цепей с использованием матриц (O_m). Для цепей, содержащих 30 элементов и более, использование всех методов, за исключением метода преобразованных цепей с использованием матриц (O_m) и метода вариаций с сохранением линейных членов (O_b), ограничивается возможностями современных ЦВМ.

В условиях приближенной равнозначности двух указанных методов расчета коэффициентов чувствительности при сравнении их по критериям O_x и Π_x предпочтение следует отдать методу преобразованных цепей с использованием матриц, так как в этом случае довольно просто могут быть получены коэффициенты для учета нелинейных членов.

Кроме того, в ходе анализа установлено, что при $B = N < N-2$ расчет коэффициентов выгоднее проводить по сопротивлениям цепи, при противоположном неравенстве — по проводимостям цепи.

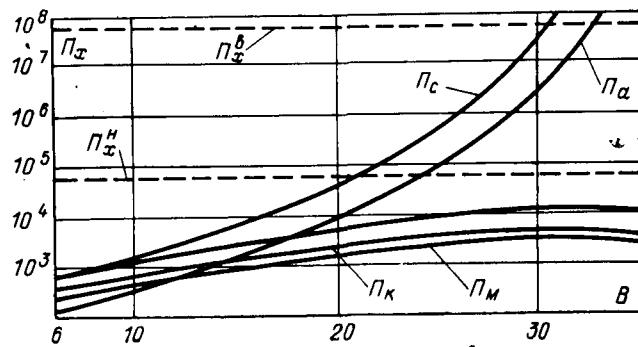


Рис. 2.

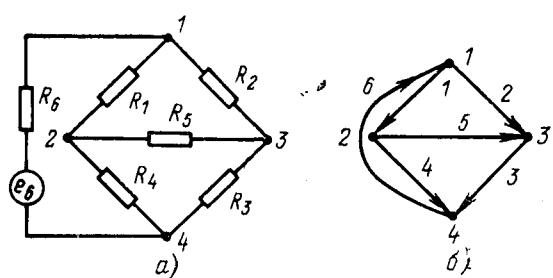


Рис. 3.

Пример. Для простой измерительной цепи, принципиальная схема которой и ориентированный граф приведены на рис. 3, имеем:

$$B = 6; N_T = 16; B_{\text{ср}} = 3, 0; C_{B-B_{\text{ср}}}^{B-N} = 3;$$

$$N = 4; \frac{N}{B} = 0,67; C_B^{B-N+1} = 20.$$

Коэффициенты в (3) — (7) соответственно равны:

$$a_5 = 1 + \frac{\alpha_1}{3} + \alpha_2; \alpha_1 = \frac{t_{\text{ср}}(\text{выч})}{t_{\text{умн}}}; \alpha_2 = \frac{t_{\text{лог}}}{t_{\text{умн}}};$$

$$a_4 = - \left(10,5 + 2 \frac{5}{6} \alpha_1 + 8,5 \alpha_2 \right);$$

$$a_3 = 45,5 + 11 \frac{1}{3} \alpha_1 + 34 \alpha_2;$$

$$a_2 = - \left(85 + 19 \frac{1}{3} \alpha_1 + 59 \alpha_2 \right);$$

$$a_1 = 88 + 13 \frac{5}{6} \alpha_1 + 41,5 \alpha_2;$$

$$a_0 = - 3 (10 + \alpha_1 + 3 \alpha_2);$$

$b_i \approx 2a_i$ и т. д.

Результаты подсчета объемов вычислений O_x в условных операциях умножения при различных методах расчета коэффициентов чувствительности приведены ниже (при этом α_1 и α_2 приняты соответственно равными 0,3 и 0,1):

$$O_x \quad O_m \quad O_b \quad O_c \quad O_k \quad O_a$$

Число условных операций: $0,47 \cdot 10^3 \quad 0,94 \cdot 10^3 \quad 0,393 \cdot 10^3 \quad 0,276 \cdot 10^3 \quad 0,132 \cdot 10^3$

В дальнейшем были рассчитаны численные значения коэффициентов чувствительности передаточной проводимости Y_{65} к вариациям сопротивлений цепи для следующих исходных данных: $R_1 = 1 \text{ к}\Omega$; $R_2 = 0,661 \text{ к}\Omega$; $R_3 = 0,661 \text{ к}\Omega$; $R_4 = 1 \text{ к}\Omega$; $R_5 = 0,83 \text{ к}\Omega$; $R_6 = 0,01 \text{ к}\Omega$. Независимо от использования того или иного метода указанные коэффициенты получены одинаковыми:

$$S_{R1}^{Y_{65}} = 250,736; S_{R2}^{Y_{65}} = - 250,978; S_{R3}^{Y_{65}} = 250,785;$$

$$S_{R4}^{Y_{65}} = - 251,031; S_{R5}^{Y_{65}} = - 0,499; S_{R6}^{Y_{65}} = - 0,012.$$

Время, затраченное для расчета приведенных полученных значений коэффициентов различными методами на ЦВМ типа «Минск-32», составило примерно одинаковую величину 1—2 мин, так как процесс расчета в рассматриваемом случае был связан с обращением к большому числу стандартных подпрограмм и использованием интерпретирующей системы. Для всех методов указанное время обращения примерно одинаково, что не позволило выявить существенную разницу в объемах вычислений.

Для цепей, содержащих число элементов $B=10$ и 22 , объемы вычислений при различных методах расчета коэффициентов чувствительности приведены в таблице. Там же указано время, необходимое при расчете коэффициентов на ЦВМ типа «Минск-32». При этом t_m , t_b и t_a определено при реальном расчете коэффициентов чувствительности системных функций

| Число элементов | O_x/t_x | | | | |
|-----------------|--|---|---|--|---|
| | O_m/t_m | O_b/t_b | O_c/t_c | O_k/t_k | O_a/t_a |
| 10 | $0,558 \cdot 10^4$ 1,6 мин | $0,112 \cdot 10^5$ 3,1 мин | $0,190 \cdot 10^5$ 4,3 мин | $0,714 \cdot 10^4$ 2,6 мин | $0,271 \cdot 10^4$ 0,8 мин |
| 22 | $0,15 \cdot 10^6$ 0,18 $\cdot 10^2$ мин | $0,325 \cdot 10^6$ 0,37 $\cdot 10^2$ мин | $0,3 \cdot 10^{10}$ 0,5 $\cdot 10^5$ ч | $0,15 \cdot 10^8$ 0,25 $\cdot 10^2$ ч | $0,325 \cdot 10^7$ 0,54 $\cdot 10^4$ ч |

цепей с указанным числом элементов при некомплексных параметрах. Значения t_c и t_k для $B=22$ получены расчетным путем и согласуются с данными, полученными в других работах, например, в [Л. 11 и 12].

Существенного уменьшения объема вычислений можно добиться путем эквивалентных преобразований сложной цепи к нескольким последовательно соединенным частям этой цепи, например, с использованием метода эквивалентного генератора [Л. 8], а также теоретико-множественных методов и операций над полем модуля 2 [Л. 9].

Приведенные примеры подтверждают правильность выводов, полученных при сравнении рассмотренных методов расчета коэффициентов чувствительности системных функций цепей по количественным критериям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Быховский М. Л. Основы динамической точности электрических и механических цепей. Изд. АН СССР, 1958. 157 с.
- Маслов А. Я., Татарский В. Ю. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры. М., «Советское радио», 1972. 264 с.
- Авдеев И. И. О свойствах сумм коэффициентов чувствительности системных функций цепей. — «Электричество», 1971, № 3, с. 88—90.
- Пампуро В. И. Анализ радиоцепей и их схемной надежности. М., «Техника», 1967, 324 с.
- Петров С. С. Матричный метод анализа точности электрических цепей по первичным погрешностям. — «Автоматика и вычислительная техника», 1965, вып. 9, с. 165—178.
- Сигорский В. П. Содержание и методы теории электронных цепей. — «Изв. вузов. Радиоэлектроника», 1967, № 7, т. X, с. 619—634.
- Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы. Изд-во иностр. лит., 1963. 619 с.
- Сигорский В. П. Анализ электронных схем. Гостехиздат УССР, 1964. 200 с.
- Трохименко Я. К. Метод обобщенных чисел и анализ линейных цепей. М., «Советское радио», 1972. 310 с.
- Мельников Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей. М., «Энергия», 1972. 231 с.
- Гераскин О. Т. Отыскание деревьев графа электрической цепи при помощи ЭЦВМ. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1965, № 4, с. 53—60.
- Гераскин О. Т. Топологическое содержание узлового и контурного определителей электрической сети и расчет их величин при помощи ЭЦВМ. — «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», 1966, № 2, с. 59—70.

[3.8.1973]



УДК 538.533.001.24

О дифференциальной зависимости между током и напряжением в катушке с ферромагнитным магнитопроводом

ТИХОМИРОВ Г. М., ЛАНКИН В. Е.

Таганрог

При решении некоторых задач электротехники и радиотехники нередко возникает необходимость представления нелинейного соотношения между напряжением и током в катушке с ферромагнитным магнитопроводом в форме, удобной для дальнейшего решения системы нелинейных дифференциальных

6*

уравнений. Известные методы представления нелинейной индуктивности, например [Л. 1], либо узко специфичны, либо сложны.

В настоящей работе предлагается математическая функция, выражаяющая в дифференциальной форме соотношение

Исследования условий возникновения лавины частоты в энергосистеме

(Статья Айрапетяна Г. А., Этмекчяна А. А., Айрапетян Ю. И.,
«Электричество», 1974, № 6)

Инж. ОРНОВ В. Г.

ЦДУ ЕЭС СССР

В обсуждаемой статье рассмотрена математическая модель, позволяющая получить динамическую характеристику изменения частоты в энергосистеме с учетом действия АЧР и проанализировать допустимость выбранных уставок АЧР-II с точки зрения срабатывания технологических защит блоков. Такой комплексный подход к этой задаче представляется свое-временным и полезным. Методика анализа в принципе сводится к оценке снижения уровня воды в барабане котла при изменении частоты в цикле работы АЧР, так как изменение остальных параметров не является определяющим.

Качественная оценка процессов, происходящих в тепло-механическом оборудовании блочных электростанций с барабанными котлами, совпадает с результатами исследований, проведенных на блоках 150 и 200 Мвт [Л. 1].

Однако некоторые расчетные выражения, исходные параметры и, как следствие, количественная оценка процессов нуждаются в уточнении.

1. Одной из самых важных зависимостей, на которой базируются последующие расчеты, является зависимость производительности питательных электронасосов (ПЭН) от частоты.

Авторы использовали выражение [Л. 2]:

$$Q_i = Q_n \sqrt{\frac{P_n \left(\frac{f_i}{f_n}\right)^2 - P_{ct}}{P_n - P_{ct}}}, \quad (1)$$

где f_n , f_i — номинальное и текущее значение частоты; Q_i — расход воды при f_i .

Использование этого выражения приводит к существенным погрешностям, так как в нем принято упрощенное выражение характеристики ПЭН $P=F(Q)$ в виде горизонтальной прямой, в то время как реальная характеристика ПЭН является кривой второго порядка.

Наиболее точным и простым способом получения статических характеристик расхода и давления питательной воды в функции частоты, $Q, P=F(f)$ является графический способ, заключающийся в следующем. На чертеже в координатах P, Q строятся (рис. 1) характеристики насоса (кривая 1-1) и сети (кривая 1-3), пересекающиеся в рабочей точке 1.

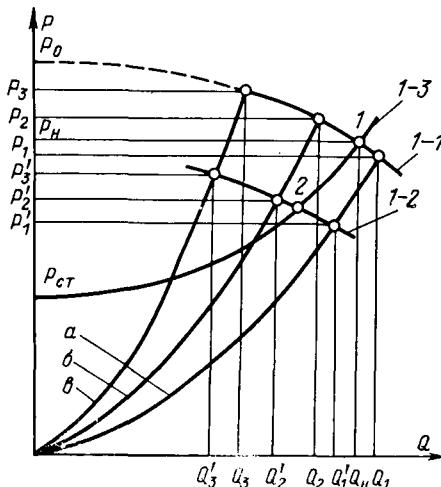


Рис. 1.

Характеристики насоса могут быть получены экспериментально или по заводским данным. Характеристика сети при наличии неизменного статического напора определяется в относительных единицах выражением:

$$P = P_{ct} + (P_n - P_{ct}) Q^2, \quad (2)$$

где P_n — номинальное давление, развиваемое ПЭН при работе на сеть и номинальном расходе воды Q_n ; P_{ct} — статическое давление, отнесенное к P_n ; Q — расход воды (пара), отнесеный к Q_n .

Затем на тот же чертеж наносятся характеристики насоса для различных значений частоты, которые могут быть построены по точкам, определяемым условием подобных режимов [Л. 3]:

$$\left. \begin{aligned} P'_1 &= P_1 \frac{f_i^2}{f_n^2}; & Q'_1 &= Q_1 \frac{f_i}{f_n}; \\ P'_2 &= P_2 \frac{f_i^2}{f_n^2}; & Q'_2 &= Q_2 \frac{f_i}{f_n} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

и т. д.

Это построение иллюстрируется рис. 1, где кривые a , b и c представляют собой так называемые линии пропорциональности, а кривая 1-2 — характеристику насоса при новом значении частоты.

Новые рабочие параметры определяются точкой пересечения неизменной характеристики сети с характеристикой насоса для соответствующего значения частоты (точка 2, рис. 1). Определив координаты ряда таких точек, получим характеристики $Q=F_1(f)$, $P=F_2(f)$. Из рис. 2 видно, что крутизна исследуемых характеристик зависит от крутизны характеристики сети и насоса: чем более крутые характеристики сети и насоса, тем более пологая характеристика $Q=F_1(f)$; более пологая характеристика $P=F_2(f)$ получается при крутой характеристике насоса и пологой характеристике сети. Описанным способом зависимость производительности ПЭН от частоты была рассмотрена в [Л. 4].

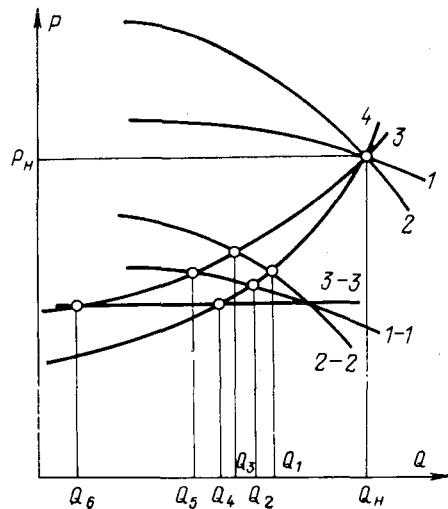


Рис. 2.

| Блок, Мвт | Тип котла | K_Q | $K'Q$ | $K''Q$ | $K_{РПЭН}$ | $K'_{РПЭН}$ | $K''_{РПЭН}$ | $K_{РТУРБ}$ | $f_{kp.} \text{ гц}$ |
|--------------|---------------------|---------|---------|---------|------------|-------------|--------------|-------------|----------------------|
| 150 | Прямоточный с РДС | 2,1—2,4 | 2,7—3,3 | 2,0—2,5 | 1,45—1,55 | 1,9 | 1,5 | 0 | 37,9—31,4 |
| 200 | То же | 2,3—2,7 | 2,7—3,3 | 2,7—3,3 | 1,6—1,7 | 1,9 | 1,5 | 0 | 38,8—40,4 |
| 150 | Барабанный | 2,7—3,7 | 3,9—7,7 | 3,0—5,0 | 1,2—1,4 | 1,9 | 1,5 | 0 | 40,1—43,8 |
| 200 | То же | 3,1—4,8 | 3,9—7,7 | 3,9—7,7 | 1,45—1,55 | 1,9 | 1,5 | 0 | 41,9—44,8 |
| 150 | Прямоточный без РДС | 1,3 | 1,5 | 1,15 | 1,75 | 1,9 | 1,5 | 1,3 | 0 |
| 200 | То же | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 1,85 | 1,9 | 1,5 | 1,4 | 0 |

Приложение. K — коэффициенты, полученные графически; K' , K'' — коэффициенты, рассчитанные по (1) при $P=P_n$ и $P=P_0$ соответственно.

Из рис. 2 наглядно видно, насколько различными получаются значения расхода при представлении характеристики насоса горизонтальной прямой ($\beta=3$) и кривой ($1-1$ или $2-2$), причем эта разница особенно велика при крутой характеристике насоса и пологой характеристике сети. Для оценки допустимого снижения частоты пользуются понятием «критическая частота» — частота, при которой ПЭН прекращает подачу воды в котел.

Из (1) значение критической частоты определяется в виде [Л. 2]:

$$f_{kp} = f_n \sqrt{\frac{P_{cr}}{P_n}}. \quad (4)$$

Если учесть действительный вид характеристики питательного насоса и принять ее монотонно падающей, то критической частоте соответствует не равенство $P_{ni}=P_{cr}$, а $P_{ni}=P_{cr}$, где P_0 — давление насоса при расходе, равном нулю.

Поскольку P_{ni} зависит от частоты как

$$P_{ni} = P_{on} \left(\frac{f_n}{f} \right)^2,$$

то для определения f_{kp} можно воспользоваться тем же выражением (4), подставив P_{on} вместо P_n :

$$f_{kp.2} = f_n \sqrt{\frac{P_{cr}}{P_{on}}}. \quad (5)$$

Так как обычно $P_{on} > P_n$, то $f_{kp.2} < f_{kp.1}$, т. е. при учете реальной характеристики ПЭН срыв питания произойдет при более низкой частоте, чем это следует из (4). Если учесть, что характеристика ПЭН довольно часто имеет максимум $P_{max} > P_{on}$, то значение f_{kp} еще меньше: ей будет соответствовать частота, при которой характеристика насоса, не пересекая характеристики сети, будет касаться ее в некоторой точке $Q > 0$. Сказанное выше относится как к барабанным котлам, так и к прямоточным котлам с регуляторами «до себя».

Рассмотрим теперь характеристики питательных насосов, наиболее часто используемых на блоках 150 и 200 Мвт. Блоки 150 Мвт, как правило, оборудованы одним рабочим ПЭН типа ПЭ-500-180/200 или ПЭ-580-180/200, на блоках 200 Мвт обычно работают параллельно 2 ПЭН типа ПЭ-380-180/200 или ПЭ-430-180/200.

Анализ характеристик насосов этих типов средней изношенности с различным числом рабочих колес, полученных экспериментально, показал, что несмотря на весьма значительное отличие отдельных характеристик, можно построить обобщенные характеристики для блоков 150 Мвт и блоков 200 Мвт.

Характеристики ПЭН каждой из этих двух групп блоков имеют некоторые общие свойства: соотношение и диапазон абсолютных значений давления P_{on} , P_{max} , P_n ; относительное значение расхода воды, соответствующее максимальному

давлению Q_{Pmax} , крутизна рабочей части характеристики. С учетом этого были построены две обобщенные характеристики (кривые 1 и 2 рис. 3). Кривая 2 для блока 200 Мвт представляет собой суммарную характеристику двух параллельно работающих ПЭН.

На рис. 3 построены, кроме того, характеристики насосов при частоте $0,9f_n$ (кривые 1' и 2'), а также характеристики сети (кривые 3—7).

При построении было принято, что номинальное давление в барабане котла 150 кгс/см², а давление перед турбиной для блоков с барабанными и прямоточными котлами — 130 кгс/см². Так как абсолютные значения P_n колеблются в определенном диапазоне, значения статического давления в относительных единицах будут равны для прямоточных котлов (с регуляторами «до себя») $(0,6—0,65)P_n$, а для барабанных котлов $0,7—0,8P_n$.

Кривые 3 и 4 являются граничными характеристиками сети для барабанных котлов, кривые 5 и 6 — для прямоточных. Точки пересечения этих характеристик с кривыми 1' и 2' определяют границы, в пределах которых лежат значения расхода и давления питательных насосов при частоте, равной $0,9f_n$, для блоков 150 и 200 Мвт с барабанными и прямоточными котлами.

Построив семейство характеристик насосов в диапазоне $f_n—0,9f_n$ можно убедиться, что статические характеристики $Q=F_1(f)$, $P=F_2(f)$ близки к линейным, поэтому их удобно охарактеризовать коэффициентами:

$$K_Q = \frac{\Delta Q}{Q_n} \frac{f_n}{\Delta f}; \quad K_P = \frac{\Delta P}{P_n} \frac{f_n}{\Delta f}.$$

Результаты графического определения коэффициентов приведены в таблице, там же для сравнения приведены коэффициенты, рассчитанные по (1) в двух вариантах: для $P=P_n$ и $P=P_{on}$.

Из таблицы видно, что коэффициенты, рассчитанные по выражению (1), в некоторых случаях в 1,5—2 раза отличаются от коэффициентов, полученных графическим путем, правильность которых подтверждена экспериментами, проведенными на блоках 200 Мвт Джамбульской ГРЭС и блоках 150 Мвт Иркутской ТЭЦ-10 и Ташкентской ГРЭС. В той же таблице приведены значения критической частоты, определенные по (5).

Из вышесказанного ясно, что действительные зависимости расхода питательной воды и времени срабатывания уровня воды в барабане котла от частоты, а также значение критической частоты, значительно отличаются от приведенных в статье Айрапетяна Г. А. Очевидно, что нелинейные расходные характеристики следует заменить линейными.

2. Принятое авторами значение постоянной инерции изменения уровня воды в барабане $T_h=15$ сек существенно занижено. Экспериментальные и расчетные данные [Л. 1] показывают, что $T_h=18—26$ сек (что соответствует удельной скорости изменения уровня $\varepsilon=-(0,01—0,014) \text{ м} \cdot \text{ч}^{-1}$).

Снижение указанной величины приводит к пропорциональному уменьшению допустимого времени работы блока при пониженной частоте.

3. При моделировании процесса не учитывалось увеличение небаланса между расходом пара и воды, достигающее 10—15% при снижении частоты более чем на 2% за счет открытия перегрузочных клапанов турбины.

4. Характеристика $h=F(t)$ не отражает динамику процесса изменения уровня воды в барабане, так как не учитывает явления «набухания», которое приводит к запаздыванию снижения уровня на 25—40 сек и существенному искажению кривой $h=F(t)$.

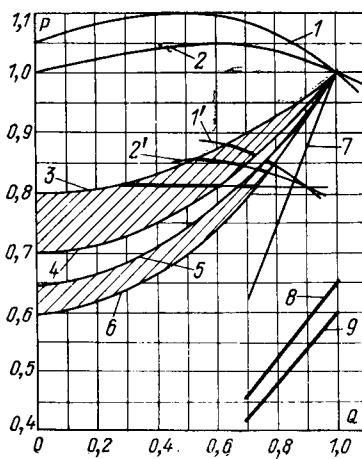


Рис. 3.

В связи с этим представляется более правильным и точным анализ уставок АЧР проводить по критерию [Л. 1]:

$$K_Q \int_0^t \Delta f(t) dt + \int_0^t \Delta D(t) dt < \frac{\Delta h_{\text{доп}}}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где $K_Q = \frac{\Delta Q}{\Delta f}$; ΔD — увеличение расхода пара за счет открытия перегрузочных клапанов турбины; Δf — максимальное изменение частоты в цикле АЧР; $\Delta h_{\text{доп}}$ — допустимое изменение уровня, равное уставке защиты от упуска воды из барабана; ε — удельная скорость изменения уровня.

Интеграл изменения частоты в цикле АЧР $\int_0^t \Delta f(t) dt$ не-

трудно определить, располагая предложенной авторами характеристикой изменения частоты в энергосистеме с учетом работы АЧР.



Канд. техн. наук ЗЕИЛИДЗОН Е. Д.
Главтехуправление Минэнерго СССР

Основные положения обсуждаемой статьи не могут не вызывать принципиальных возражений. К ним относятся, в первую очередь, исходная посылка авторов о том, что вряд ли целесообразно предусмотренное в Методических указаниях по АЧР «нормирование» допустимых времен работы с пониженной частотой и конечное предложение авторов пользоваться специальными расчетами для выбора уставок АЧР-II. Последнее оказывается целью описанного исследования, хотя нигде в статье не сказано четко, считают ли авторы целесообразным замедление или ускорение действия АЧР-II в сравнении с тем, что получалось бы при выполнении разгрузки в соответствии с Методическими указаниями.

Кроме того, авторами без каких-либо обоснований игнорируются многие факторы, на учете которых строится принятая в настоящее время система автоматической частотной разгрузки. Начнем с того, что авторы упоминают только два условия: не более 20 сек при частоте ниже 47 гц и не более 60 сек при частоте 48,5 гц. Еще одно условие о полном исключении возможности даже кратковременного выхода частоты ниже 45 гц они опускают. Между тем именно всеми тремя условиями задается характер снижения и подъема частоты, причем, что исключительно важно, эти условия — предельные. Предусматривается, что реально такой процесс может иметь место в очень редких, самых неблагоприятных ситуациях, когда для ликвидации возникшего дефицита мощности потребовалось срабатывание всех очередей принятой разгрузки, включая и обязательные запасы в ее объеме. Во всех остальных случаях срабатывания АЧР снижение частоты должно прекращаться раньше, а ее восстановление происходить быстрее.

Именно для этого и для предотвращения излишних отключений нагрузки потребителей предусмотрены пуски разгрузки с очередями по частоте (АЧР-I) и пуски с очередями по времени (АЧР-II), а также совмещение действия этих пусков, на которое авторы почему-то не обратили внимания. Без этого самонастраивающаяся автоматическая разгрузка, по нашему мнению, осуществить невозможно, а знать точно заранее, каков будет дефицит активной мощности, вовсе не реально.

Действительно, заданные предельные условия, хотя и опираются на анализ, расчеты и очень большой практический опыт, в конечном счете должны быть отнесены к категории эмпирических. Относительно того, почему выбраны именно такие значения, будет сказано ниже. А пока отметим один важный момент, для которого необходима частотно-временная определенность в протекании аварийных процессов со снижением и восстановлением частоты. Она нужна для конструирования паровых турбин. Известно, что работа турбин при частотах резонансных или близких к ним опасна для их лопаточного аппарата. Явление это носит усталостный характер, т. е. относится к категории накапливающихся. Очевидно, что для включения в технические условия на турбины нужен не предлагаемый авторами метод расчета уставок АЧР-II, а заданные в Методических указаниях граничные параметры, обеспечивающие всей совокупностью предусмотренных условий

В заключение уместно пожелать, чтобы математическая частотная модель системы была более универсальна, реализуя реакцию на изменение частоты гидрогенераторов, работающих в режиме синхронных компенсаторов и автоматически переводимых в генераторный режим, а также блоков с прямоточными котлами, мощность которых может снижаться при понижении частоты системы [Л. 1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орнов В. Г. Анализ работы блоков 150—200 Мвт при аварийных понижениях частоты. — «Электрические станции», 1972, № 12.
2. Москалев А. Г. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. М., Госэнергоиздат, 1959.
3. Черкасский В. М. и др. Насосы, компрессоры, вентиляторы. М., «Энергия», 1968.
4. Сыромятников И. А. Влияние частоты на характеристики центробежных насосов. — «Электрические станции», 1950, № 10.

выполнения АЧР.

Еще более важным нам представляется следующее. Процесс протекания рассматриваемых аварий с учетом их ликвидации действием АЧР является не детерминированным, а во всех проявлениях вероятностным. Указанное касается и относительного значения первоначально возникающего дефицита активной мощности, и его территориального распространения (выделившийся узел энергосистемы, вся энергосистема, несколько энергосистем или объединение в целом). Оно касается и возможностей частичной компенсации этого дефицита, если имеется вращающийся резерв мощности на тепловых электростанциях, а также за счет автоматической мобилизации мощности гидростанций. Вместе с тем резервы мощности могут и отсутствовать, а первоначальный дефицит может даже усугубляться вследствие снижения мощности станций, отключения линий при изменении потокораспределения и т. п.

Наконец, само результативное действие разгрузки носит также вероятностный характер из-за изменений режимов работы отключаемых потребителей в зависимости от времени суток, дней недели и т. п. В этом отношении переменными оказываются мощности и составы как агрегатов электростанций, так и нагрузки потребителей, а также постоянные инерции и коэффициенты регулирующего эффекта. Вот почему в Методических указаниях особое внимание обращено на обеспечение по возможности самонастраивающегося действия АЧР, на наличие запасов, на дробление и увеличение числа очередей разгрузки, что определяет наибольшую ее гибкость. В этом отношении вовсе странными кажутся приведенные в статье примеры, где всего четыре очереди АЧР-II.

Если уже в какой-то части энергосистемы или объединения возникли условия для срабатывания АЧР, то незачем чего-то выжидать исходя из технологических возможностей теплосилового оборудования электростанций и его технологических защит. Возникновение лавины частоты или лавины напряжения или той и другой вместе (включая и динамические переходы из одной в другую) тоже носят вероятностный характер. Пытаться подойти вплотную к их началу, используя аналитические расчеты и моделирование, нам представляется опасным и, самое главное, бесцельным.

Значит, увеличивать предусмотренные в Методических указаниях временные пределы уставок АЧР-II нет оснований. Сужать эти пределы тоже нежелательно, так как слишком малые интервалы между очередями АЧР-II уже совсем не будут согласовываться с реально имеющимися, много большими постоянными временем изменения частоты.

Если авторы убедительно покажут, что этого все же требуют условия работы конкретных котлоагрегатов, что ничего другого предпринять нельзя, то там, где такие агрегаты доминируют, быть может придется пойти на ускорение АЧР-II и, добавим, на ухудшение системы разгрузки. Но, насколько нам известно, опыт эксплуатации объединенных энергосистем Закавказья не дает таких оснований. Каких-либо ссылок на практический опыт в статье тоже нет. Таким образом, в рассмотренной статье многое осталось неясным, неопределенным и лишенным убедительных мотивировок.

Объединенный всесоюзный семинар по электроэнергетическим системам

МОРОЗОВСКИЙ В. Т., МУРЗИН Г. М.

7—8 февраля 1974 г. в Челябинском политехническом институте были проведены центральный научный семинар «Кибернетика электроэнергетических систем» (руководитель проф. Веников В. А.) и тематический семинар «Анализ и синтез многосвязного регулирования автономных электроэнергетических систем» (руководитель проф. Морозовский В. Т.).

В работе семинара приняли участие свыше ста представителей 37 организаций разных городов страны.

Доклады и сообщения были посвящены проблемам идентификации, моделирования, управления, оптимизации проектирования и экспериментальных исследований, а также вопросам эксплуатации автономных электроэнергетических систем (АВЭС).

Во вступительном слове проф. Веников В. А. отметил, что АВЭС, к которым относятся все электроэнергетические системы, не связанные с Единой электроэнергетической системой СССР, и суммарная установленная мощность которых в 6—7 раз превосходит мощность Единой электроэнергетической системы, имеют очень большое народнохозяйственное значение. Эти системы, имея много общего с промышленными, в то же время обладают рядом специфических особенностей, которые должны учитываться при их проектировании и эксплуатации.

Доклад Кривенцева В. И., Морозовского В. Т. «Алгоритм оптимального расчета электрических сетей подвижных объектов на ЭВМ» был посвящен проблеме системного подхода к вопросам проектирования АВЭС подвижных объектов. Являясь, как правило, частью подвижного объекта, АВЭС должна строиться в интересах обеспечения наилучших свойств подвижного объекта в целом. На примере проектирования электрической сети подвижного объекта было показано, как можно подойти к решению этой проблемы.

Доклады Яковлева Б. С. «Проблема взаимодействия динамических систем с источником энергии ограниченной мощности», Волович Г. И., Кузнецова В. А., Яковлева Б. С. «Компенсационное измерение имитанских частотных характеристик автономных энергосистем и их элементов», Злакоманова В. В., Яковлева Б. С. «Взаимосвязь информационных и энергетических процессов в автономных электросистемах с многоступенчатым преобразованием энергии» и Ширяева В. И. «Системы автоматического регулирования с автономными источниками энергии» были посвящены методике исследований, а также анализу и синтезу систем управления, в которых мощность источника электрической энергии соизмерима с мощностью исполнительных механизмов.

Проблемам идентификации и моделирования АВЭС были посвящены доклады Устюгова М. И., Черноруцкого Г. С. «Динамические модели электромашинных элементов автономных энергосистем», Исаева Ю. В., Коновалова А. П., Ледоренко Н. С., Рубашова Н. Б. «Методика и результаты математического моделирования систем автономной энергетики», Стражова С. В., Федянина В. П. «Математическое моделирование автономных систем электроснабжения».

В докладах Веникова В. А., Литкенс И. В. «Методология исследований качества переходных процессов в автономных энергосистемах», Злакоманова В. В., Казаринова Л. С., Поллак Я. А. «Вопросы анализа и синтеза автономных электросистем по критериям качества и надежности электропитания» и Микляева М. С. «Проблема автоматизации анализа и синтеза электромагнитных параметров автономных электроэнергетических систем и пути ее решения» рассматривались вопросы методологии исследований и составления программ расчетов переходных процессов в АВЭС.

Проблеме автоматизации экспериментальных исследований и разработке требований к натурным универсальным моделям, имеющим стендам АВЭС были посвящены доклады Миронова А. Н., Никитина Д. В. «Некоторые вопросы автоматизации экспериментальных исследований на динамических моделях электроэнергетических систем» и Веникова Г. В., Миронова А. Н. «Основные требования универсального моделирующего стендов АВЭС и принципы его построения».

Сообщение Горского Ю. М. было посвящено информации о создании в СЭИ СО АН СССР цифрового регулятора возбуждения с перестраиваемой структурой, а сообщение Кулакова Г. А. — вопросам синтеза оптимального управления первичными двигателями АВЭС. По докладам и сообщениям развернулась оживленная дискуссия. В заключительном слове проф. Морозовский В. Т. выразил благодарность ректорату Челябинского политехнического института за предоставление возможности проведения Всесоюзного семинара в институте и хорошую его организацию. Он отметил, что на семинаре были обсуждены очень актуальные для АВЭС проблемы, от решения которых существенно зависит совершенствование их проектирования и эффективность функционирования.

В принятом на семинаре решении записано:

1. Работы в области исследования и создания АВЭС весьма актуальны и перспективны, имеют большое народнохозяйственное значение. Одобрить и считать необходимым их расширение и ускорение.

2. Работы по созданию теории и устройств АВЭС должны быть направлены на исследования новых физических явлений в элементах и АВЭС, созданию соответствующих математических моделей, решению задач идентификации, разработке критериев и обобщенных критериальных оценок, методов оптимизации, внедрению новых методов исследования и расчетов. Особо важной и актуальной задачей в настоящее время является разработка новых ОСТ и ГОСТ на элементы и АВЭС.

3. Просить редакции журналов «Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт», «Электричество», «Изв. вузов. Энергетика и электромеханика» увеличить число публикаций по исследованиям в области АВЭС — актуальной и важной в научном и практическом отношении проблеме.

4. Учитывая, что по проблемам АВЭС в настоящее время имеется весьма ограниченное число монографий, к тому же в основном устаревших, семинар обращает внимание редколлегий издательств «Энергия», «Машиностроение» и «Высшая школа» на необходимость опубликования обзорных, тематических и специальных монографий по системному подходу к АВЭС, по исследованиям устойчивости, качества и надежности АВЭС, по разработке новых элементов и АВЭС на современном уровне, по методам моделирования, экспериментирования и оптимизации АВЭС.

5. Обратить внимание Высшей Аттестационной Комиссии на актуальность и огромное народнохозяйственное значение исследований по проблемам АВЭС.

6. При проведении последующих Всесоюзных семинаров по АВЭС считать целесообразным организацию дискуссий по четко сформулированным вопросам. Поручить руководству семинаром постановку дискуссионных докладов ведущими учеными страны.

Очередной третий Всесоюзный семинар по автономным электроэнергетическим системам намечено провести 27 мая 1974 г. в Москве (Московский институт инженеров гражданской авиации).



БОРИС СЕМЕНОВИЧ ЯКОБИ

(К 100-летию со дня смерти)

Имя Бориса Семеновича Якоби неразрывно связано с историей науки прошлого века в России. Его труды в различных областях электротехники и физики привели к замечательным открытиям и неизменно использовались для практических потребностей страны, ставшей его второй Родиной. Он писал: «Нижеподписавшийся гордится этой деятельностью потому, что она, оказавшись плодотворной в общем интересе всего человечества, вместе с тем принесла непосредственную и существенную пользу России». О признании заслуг Якоби по-вествует мемориальная доска на старом академическом доме, на углу 7-й линии Васильевского острова и набережной Невы в Ленинграде: «Здесь жил академик Борис Семенович Якоби (1801—1874), выдающийся физик и электротехник, изобретатель гальванопластики, электрического телеграфа, электрических моторных лодок, электрических мин».

Борис Семенович Якоби, как он стал зваться после переезда в Россию (его звали Мориц Герман), родился 21 сентября 1801 г. в г. Потсдаме в Германии. Начальное образование он получил дома, а затем самостоятельно подготовился к вступительным экзаменам в университет. Вначале он поступил в Берлинский университет, проучился в нем недолго и перевелся в Геттингенский, где окончил курс по физико-математическому разряду, проявив особый интерес к вопросам прикладной механики. Он писал: «Меня с детства интересовала физика, родители же непременно хотели, чтобы я был инженером-архитектором. Я хотя и выполнил волю родителей, но не похоронил в своих заветных научных стремлениях. И долгое время мне пришлось ташить двойной воз наук: архитектуру и электротехнику».

Якоби начал свою практическую деятельность в области строительной механики, занимаясь проектированием и строительством мостов, домов и прикладной дорог, имел практику использования паровой машины. Он рано начал сочетать инженерную деятельность с литературной. Ему было лишь 23 года, когда он издал в переводе с английского на немецкий язык известное в то время «Практическое руководство к мельнице- и машиностроению», дополнив книгу большим числом полезных приложений. Вскоре среди его ранних работ, посвященных различным научно-прикладным направлениям человеческой деятельности, появилось произведение «Об использовании сил природы в работе человека». В нем уже содержались мысли, позволяющие считать Якоби одним из тех, кто близко подошел к идеям, лежащим в основе закона сохранения энергии, окончательно сформулированного позже. В этой работе Б. С. Якоби подробно останавливается на характерных чертах производственного процесса с его тенденциями все шире использовать доступные в то время виды энергии путем замены физической силы человека естественными силами природы.

Он обратил внимание на все виды двигателей, имевшихся тогда, и анализировал их с точки зрения развивающейся



промышленности. Он писал: «Мускульная сила животных, несмотря на много удобств, которые они представляют, самая плохая и дорогая, в особенности сила человека, потому что он должен стремиться к более высокому предназначению». Развивая эту мысль, он указывал, что производственный процесс без человека невозможен, но назначение человека должно сводиться к управлению производством, к выполнению сложных операций, а не однообразных силовых движений. Этими соображениями руководствовался Б. С. Якоби, когда начал работу по созданию электрического двигателя.

Как известно, большую часть своих трудов Б. С. Якоби посвятил проблеме электрического двигателя. Эта проблема интересовала ученых и изобретателей различных стран. Многие из них пытались построить электрический двигатель по принципу действия паровой машины с использованием возвратно-поступательного движения и последующего его преобразования во вращательное движение с помощью кривошипов. По такому ошибочному пути пошел вначале и Б. С. Якоби; но лишь после того, как он приступил к разработке конструкции с непосредственным получением вращательного движения, ему удалось создать электродвигатель, который стал прототипом всех современных электрических двигателей и машин.

Как правило, изобретатели той поры подходили к разработке электрического двигателя эмпирически, не пытаясь теоретически обосновать свои творения. Б. С. Якоби был одним из первых, кто пошел по другому пути. В работе «О применении электромагнетизма для приведения в движение машин» он подробно изложил свои теоретические сооб-

ражения, основанные на результатах исследований в области электромагнетизма. Эту работу Б. С. Якоби послал в Парижскую Академию наук в конце 1834 г., еще живя в Германии. Работа была опубликована, с интересом и вниманием воспринята, но возникли кривотолки: изобретение Б. С. Якоби выдавали за «электрический перпетуум мобилю». Несколько позднее писали в одной из заметок, что «архитектору Якоби удалось получить беспрерывное вращение посредством возбуждения электромагнетизма в мягком железе... Изготовленный аппарат больших размеров был показан 16 мая многим здешним выдающимся ученым и техникам, которые наблюдали за его действием... Якоби в настоящее время занят доказательством несомненной возможности применения этой новой силы к движению машин...»

В экономически отсталой и политически раздробленной Германии того времени Б. С. Якоби не мог найти применения своим творческим силам. Все его попытки создать себе положение и материальное обеспечение не увенчались успехом.

Первым, кто по достоинству оценил труды Б. С. Якоби и активно помог ему в научной работе, был русский академик В. Я. Струве (1793—1864 гг.), назначенный в 1834 г. директором строящейся Пулковской обсерватории. Это был воспитанник и впоследствии профессор астрономии Дерптского (Тартусского) университета. Будучи командирован в Кенигсберг, Струве познакомился с Б. С. Якоби, жившим в то время в этом городе. В дальнейшем на судьбу Б. С. Якоби оказали решающее значение ряд выдающихся деятелей русской науки, в первую очередь, П. Л. Шиллинг (1786—1837 гг.), работавший в то время над усовершенствованием электрического способа взрывания подземных и подводных мин и над усовершенствованием своего электромагнитного телеграфа.

28 июля 1835 г. Б. С. Якоби вступил в должность профессора кафедры Дерптского университета. Здесь он прожил лишь 2 года. С первых же дней работы в университете Борис Семенович занял в нем ведущее положение, и уже 22 августа 1836 г. ему поручили произнести речь на торжественном собрании в Большом актовом зале. Свою речь Якоби назвал «О значении внутренних путей сообщений». В ней Б. С. Якоби после годичного пребывания в России с восторгом отметил: «Нигде во всей просвещенной Европе не идут с такой радостью и охотой на встречу истинным потребностям науки, не жалея никаких жертв, когда дело идет о достижении целей, призванных полезными и значительными... Путь этот единственный, на котором можно приобщить безграничные области России к общественному развитию... только этим могла быть разрешена задача достичь в столь короткое время таких гигантских успехов...».

О работах Якоби над созданием электрического двигателя было сообщено царю и министру финансов, так как требовалась значительная по тому вре-

мени сумма в 50 000 руб. для ведения опытов. В конце концов, после того, как Якоби написал объяснительную записку президенту Академии наук Уварову, в результате значительных хлопот, были сделаны ассигнования требуемой суммы. Однако для контроля расходов была образована комиссия под председательством адмирала Н. Ф. Круzenштерна, известного мореплавателя, памятник которому поставлен на набережной Невы. В комиссию входили также и известные ученые, в том числе Э. Х. Ленц (1804—1865). Назначение адмирала Н. Ф. Круzenштерна было связано с тем, что ставилась задача замены паровой машины на кораблях флота электродвигателем. В возможности такой замены не сомневались ни Б. С. Якоби, ни члены этой комиссии.

Комиссия начала свою работу в июле 1837 г., в августе того же года Б. С. Якоби переехал в Петербург, который уже не оставлял до самой смерти. Здесь он начал работать в Академии наук, сначала в качестве прикомандированного, затем адъюнкта и члена Академии. Одновременно он работал в разных академических и правительственные комиссиях, как правило, всегда на руководящих постах.

Конструкция электродвигателя Б. С. Якоби, описанная в 1834 г., претерпела ряд реконструкций; первоначальная мощность двигателя составляла всего лишь 15 вт. Но вскоре он разработал конструкцию двигателя, мощность которого доходила до 120 вт, а в 1838 г. Борис Семенович создал новый тип двигателя, мощность которого доходила уже до 550 вт. Первая модель двигателя при мощности около 180 вт была успешно испытана 13 сентября 1838 г. на восьмивесельном боте, вмещавшем 12 пассажиров, двигавшемся вверх и вниз по Неве. Эти первые опыты казались весьма перспективными и вызвали восхищение многих, в том числе и знаменитого Фарадея, который писал в письме к Б. С. Якоби: «Я душевнейшим образом желаю, чтобы Ваши большие труды получили высокую награду, которую они заслуживают». Б. С. Якоби тоже находился под впечатлением достигнутых успехов. Будучи участником съезда Британской ассоциации в Глазго в 1840 г., он писал: «Общее внимание света обращено в этом деле на Россию, которая уже столь часто являла себя щедрой покровительницей и спомоществовальницей ученых предприятий... От нее вправе ожидать также соответствующих успехов по части движения машин»...

Надежды на то, что электробот Б. С. Якоби можно будет вскоре превратить в электроходы, связывающие Англию с Америкой, и использовать на других подобных маршрутах, себя не оправдали. И тогда было очевидно, что недостаточно разработать мощный электродвигатель, нужны еще соответствующие мощные источники электрической энергии для питания таких двигателей. Пока что электробот Б. С. Якоби питался от аккумуляторной батареи малой мощности. Вот почему сочли обоснованным решение комиссии, признавшей, что новых результатов в этих опытах вряд ли удастся в ближайшее время достичь и «впредь до открытия нового пути, могущие вести к усовершенствованию при-

ложении электромагнитной энергии к движению судов», опыты прекратить.

Работая над проблемами электродвижения судов, Б. С. Якоби не отрывался от других электротехнических проблем. Используя гальванический элемент Даниэля, он в 1836 г. обратил внимание на то, что медный электрод элемента покрывается слоем меди. Б. С. Якоби обнаружил, что при снятии этого слоя с электрода на его поверхности, прилегавшей к медному электроду, в точности воспроизводятся мельчайшие царапины, углубления и шероховатости, имевшиеся на поверхности медного электрода. Это была гальванопластика! О своих первоначальных опытах и наблюдениях Б. С. Якоби написал доклад президенту Академии наук Уварову еще в 1837 г., но официальной датой изобретения гальванопластики считается 8 октября 1838 г., когда в Академии наук было зачитано письмо Б. С. Якоби с демонстрацией образцов, полученных при помощи гальванопластики. Б. С. Якоби в этом письме писал: «Я не сомневаюсь, что если бы заняться этим делом, было бы возможно производить по этому способу рельефные медные доски подобно тому, как печатают гравюры на дереве; тут была бы и та выгода, что самые штамповальные доски возможно производить в неограниченном количестве, для чего потребовалась бы только одна гравированная модель»...

Фарадей, с которым Б. С. Якоби переписывался с 1839 г., писал: «Пластинки, которые Вы мне прислали, не только весьма приятны и лестны для меня, они прекрасны сами по себе в теоретическом и практическом отношении. Все, кто бы их здесь ни видел, восхищалась ими»...

В 1840 г. Б. С. Якоби издал работу «Гальванопластика или способ по данным образцам производить медные изделия из медных растворов с помощью гальванизма». Русское правительство выдало Якоби премию в 25 000 руб. за изобретение гальванопластики, а Академия наук присудила в 1839 г. за это изобретение Демидовскую премию в 5000 руб. Это были по тому времени огромные деньги, которые в значительной мере Б. С. Якоби потратил на продолжение опытов с электродвигателем и для покупки приборов для физического кабинета Академии наук, которым он заведовал. Изобретатель не считал гальванопластику изобретением, равным изобретению электродвигателя. Тем не менее со всей категоричностью он писал: «Гальванопластика исключительно принадлежит России, здесь она получила свое начало и свое образование. Опубликование этого открытия дало возможность для всеобщей пользы сделать способ вполне известным и тем самым подарило его и остальному Европе»...

Гальванопластика прочно вошла в жизнь человечества и продолжает свое победоносное шествие в промышленности до сих пор. Сделанное Б. С. Якоби открытие, как и многие другие подобные открытия, изобретались « заново» несколько раз различными людьми, но приоритет навсегда оставался за Б. С. Якоби!

Работы по электрическому взрыванию мин и совершенствованию электромагнитного телеграфа начались

Б. С. Якоби в 1837 г. еще при жизни Павла Львовича Шиллинга. Принципиальная возможность взрываания подземных и подводных мин на расстоянии была доказана в ряде опытов при участии Шиллинга и ряда других лиц, но во многих случаях существующая техника взрываания была неудовлетворительной. Виною этому были применяемые источники тока, плохие «запалы» и соединительные провода, которые в совокупности ограничивали дальность действия устройства. Работы велись в этом направлении под руководством генерала К. А. Шильдера при участии Э. Х. Ленца и др.

П. Л. Шиллинг применял в качестве источника тока усовершенствованный вольтov столб, который оказался недостаточно удовлетворительным для этих целей. Б. С. Якоби применил разработанные им гальванические элементы и батареи, составленные из них. Вначале им использовались элементы с платиновыми и цинковыми электродами, а несколько позднее он применил медно-цинковые элементы собственной конструкции с надлежащим подобранным электролитом. Через некоторое время элементы Б. С. Якоби были вытеснены более совершенными элементами, разработанными сотрудником Б. Я. Якоби.

Несмотря на все усовершенствования, Б. С. Якоби решил отказаться от батареи и разработал «гальванический индукционный прибор» — прототип катушки Румкорфа, которая была создана 7 лет спустя (в 1848 г.). Этот прибор в сочетании с угольным запалом, разработанным Якоби, обеспечивал действие взрывного устройства на расстоянии до 11 км. В дальнейшем после ряда совершенствований миновзрыватель Б. С. Якоби прочно вошел в практику армий различных стран мира.

Одновременно с разработкой батареи, запалов и миновзрывательной машины Б. С. Якоби усиленно работал над усовершенствованием соединительных проводов, улучшая их изоляцию, применивая в качестве одного из соединительных проводов проводимость воды и земли. Попутно им были разработаны мины, которые взрывались в воде при прикосновении к ним проходящего корабля. Для этого им был в 1844 г. разработан «соединительный прибор» замыкающий электрическую цепь взрывателя. Эти же приборы автоматически срабатывали при закладке мин под землей и при проезде над ними колесной повозки. В 1847 г. по поводу этих работ Б. С. Якоби писал: «В иностранных государствах много делалось попыток к приложению гальванизма к военному делу. Однако производимые по их распоряжению опыты, получившие более или менее неправильное исполнение, не привели ни к какому удовлетворительному результату. Наша система подводных мин и найденные нами средства, ручавшиеся нам за действительность их, совершенно неизвестны заграничным правительствам»...

После смерти П. Л. Шиллинга работы по электромагнитному телеграфированию продолжил Б. С. Якоби. Он начал с усовершенствования телеграфных аппаратов, которые со временем их разработки П. Л. Шиллингом обладали малой скоростью действия и зрительным восприятием сигналов. Еще в 1839 г. он создал записывающий телеграфный

аппарат, который был первым в мире аппаратом с записью сигналов. В этом аппарате электромагнит, принимая электрические сигналы, воздействовал своим якорем на стержень, к которому прикреплялся карандаш. В результате карандаш вычерчивал на стеклянной матовой доске, передвигающейся с помощью особой тележки, зигзагообразные линии. Этим самым была разрешена проблема перехода от зрительного восприятия сигнала к пишущему телеграфному аппарату. Запись на стеклянную или фарфоровую пластиинку была сопряжена со многими неудобствами, связанными с ограниченными ее размерами, с необходимостью после каждой строчки возвращать пластиинку в исходное положение, поэтому Б. С. Якоби несколько позднее разработал телеграфный аппарат с записью на бумажную ленту, причем запись могла уже вестись непрерывно и длительное время. Для записи на ленту он использовал химические свойства раствора йодистого калия с крахмалом, разлагающимся под воздействием тока. Третьим типом усовершенствованного аппарата с записью был еще более совершенный. В нем запись производилась тоненькой трубкой, один конец которой погружался в чернильницу, а другой касался бумажной ленты. Под воздействием электромагнита трубочка передвигалась, и при движении ленты вычерчивались точки и тире. Это был прототип современного телеграфного аппарата с ондулятором.

Эти аппараты Б. С. Якоби использовал на телеграфных линиях Петергоф — Царское село, Петербург — Царское село и др. Одновременно с усовершенствованием аппаратов он усиленно занимался улучшением соединительных проводов и готовился к налаживанию телеграфной линии Петербург — Москва. Для этого ему хотелось создать аппарат, который печатал бы буквами передаваемое сообщение и не требовалось бы расшифровывать телеграммы. В 1845 г. Б. С. Якоби создал телеграфный аппарат, на принципе которого затем на протяжении многих лет создавались различные конструкции буквопечатающих аппаратов во всем мире. Это были принципы синхронно-синфазной и стартстопной их работы. Известный специалист по телеграфии Д. С. Пашенцов в своем докладе в Академии наук СССР в 1949 г. говорил: «...Аппараты Якоби явились громадным достижением техники. Они положили основу для построения синхронных телеграфных аппаратов, в которых впервые были введены элементы автоматики и телемеханики для больших рабочих процессов. Аппарат Сименса полностью представляет конструкцию горизонтального стрелочного аппарата Якоби...»

Б. С. Якоби изготовил несколько модификаций буквопечатающего телеграфного аппарата: горизонтального, вертикального и с клавиатурой. К сожалению, в целях сохранения тайны ему не всегда разрешалось публиковать материалы по этим телеграфным аппаратам. Например, когда стало известно желание Б. С. Якоби опубликовать эти материалы, то последовало сообщение вице-президента Академии наук, в котором указывалось: «Его Величеству угодно было, чтобы об электротелеграфных и

электротелеграфических занятиях не было печатаемо»...

Сохранился образец подземного провода, проложенного Б. С. Якоби для устройства телеграфа вдоль железной дороги Петербург — Москва. Б. С. Якоби не был удовлетворен качеством подземного провода и тогда уже решил перейти к прокладке воздушных линий с их укреплением на изоляторах, расположенных на деревянных столбах. Это была первоначальная идея Шиллинга. Попытка построить телеграфную линию Петербург — Москва не удалась и немецкой фирме Сименса, которой был сдан этот подряд. Вот почему вскоре после этого Б. С. Якоби с горечью писал: «После моего формального отказа заниматься далее подземными проводами устройство такой линии вдоль Николаевской железной дороги в Москву было вверено иностранцу. Известно, что эта линия не просуществовала и двух лет и что она заменена воздушной линией. Не подлежит сомнению, что если бы я причинил казне такого рода бесполезные издержки, достигавшие от 200 до 300 тыс. руб., то мое положение было бы сильно скомпроментировано»...

Устремленный от постройки электрического телеграфа между двумя столицами, Б. С. Якоби не забросил своих работ в области телеграфии. В 1850 г. он закончил разработку первого в мире буквопечатающего аппарата. В нем не только двигались стрелки, показывая на циферблате буквы и цифры, но вращалось и специальное колесо, названное типовым, т. е. снабженное выпуклыми буквами и цифрами, пригодными для производства печати. Но и в этом аппарате его не удовлетворило то, что для передачи знака необходимо каждый раз возвращать аппарат в исходное положение на стартовую позицию и каждый раз подготавливать столовое положение. Он избавился от аппаратуре клавиатуру, что избавляло телеграфиста отмечать очередную букву или цифру вставлением специального штифта; при нажатии нужного клавиша штифты сами выпадали и отмечали нужную букву. Этот аппарат был строго засекречен, а в 1855 г. Д. Юз (1831—1900 гг.) предложил аппарат, повторяющий все принципы аппарата Б. С. Якоби.

В последний период жизни Б. С. Якоби большое значение имели его работы, относящиеся к электрическим и магнитным измерениям, часть которых была проведена Б. С. Якоби совместно с Э. Х. Ленцем. Первое их совместное выступление в Академии наук под названием «О законах электромагнитов» состоялось в октябре 1838 г. Они писали: «Наши опыты по самой их природе требовали двух операций; из них первая состояла в точном определении силы тока, вторая — в точном измерении возбуждаемого им магнетизма...» Точное определение силы тока производилось посредством изобретенного Э. Х. Ленцем баллистического способа измерения индукционных токов. Результат их совместных исследований — предложение способа измерения намагничивающих действий тока, основанного на определении подъемной силы электромагнитов. На основании исследований они сформулировали закон, согласно которому магнитный момент пропорциона-

лен силе намагничивающего тока. Член-корр. АН СССР Т. П. Кравец писал о совместных работах Б. С. Якоби и Э. Х. Ленца: «В то время, когда они были начаты, по этому вопросу не существовало решительно никаких данных, а достижения отдельных ученых и конструкторов, добивавшихся больших или меньших успехов в этом деле, были обязаны слухаю или удаче... Можно смело сказать, что после работ академиков Ленца и Якоби наука и техника — и о той и о другой одинаково радели эти ученые — получили все те данные, которые в то время могли быть доступны. Конечно, это значительно менее того, чем располагают наши современники, и это понятно, так как через тридцать лет после их работ родилось и развилось понятие о магнитной цепи — ныне первооснове всех электрических расчетов. Но в некоторой мере Ленц и Якоби подготовили для этого учения почву: уже у них мы видим пропорциональность действия электромагнита, «числу ампер-витков», как говорим теперь мы, или «величине силы тока и числу витков катушки», как выражались наши авторы...»

В истории электротехники Б. С. Якоби был тем исследователем, который не только понимал значение общепринятых единиц измерений, но и сам взялся за разработку этой исключительно важной задачи и предложил свои единицы измерения тока и сопротивления проводников. Он предложил измерять ток по количеству серебра, выделенного из раствора азотнокислого серебра. Это определение легло в основу способа измерения, принятого в 1893 г. на Международном конгрессе, когда за единицу силы тока была принята международная единица — ампер.

Б. С. Якоби предложил и эталон единицы сопротивления: он использовал для этого специально сконструированный прибор, известный под названием «реостат Якоби» (рутный вольтаметр). Прибором Б. С. Якоби и предложенным им эталоном сопротивления пользовались виднейшие ученые той поры. В одном из своих докладов Б. С. Якоби писал: «Искусство измерения является могуществнейшим оружием, созданным человеческим разумом для проникновения в законы природы и подчинения их сил нашему господству»...

Б. С. Якоби не только установил определенные единицы измерения, но и явился одним из зачинателей метрологии как научного направления. Нельзя не учесть его заслуги и во введении метрической системы измерений. Насколько велико значение Б. С. Якоби как метролога можно судить по тому, что вскоре после смерти его преемником в этих делах стал Д. И. Менделеев.

11 марта 1874 г. Б. С. Якоби умер в Петербурге и похоронен на Смоленском кладбище.

Президент АН СССР С. И. Вавилов в 1949 г. на открытии мемориальной доски на доме, в котором жил Б. С. Якоби, отметил, что со смертью Б. С. Якоби ушел из жизни не только гениальный электротехник, но и крупный ученый; большую потерю понесла вся наука и прежде всего Академия наук. Ряд ученых охарактеризовали Б. С. Якоби как надежного друга, хорошего семьянина,

любезного товарища и видного академика, который был предан науке и любил Академию. Недаром же он писал: «Культурно-историческое значение и развитие народов оценивается по достоин-

ству того вклада, который каждый из них вносит в общую сокровищницу человеческой мысли и деятельности»...

Исследования и достижения Б. С. Якоби высоко оценены человече-

ством, поскольку явились вкладом в общую сокровищницу человеческой мысли и деятельности.

В. Рогинский



ИГОРЬ АЛЕКСЕЕВИЧ ГЛЕБОВ

(К 60-летию со дня рождения)

В январе 1974 г. исполнилось 60 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора Игоря Алексеевича Глебова, директора Всесоюзного научно-исследовательского института электромашиностроения (ВНИИЭлектромаш).

Свою трудовую деятельность И. А. Глебов начал в 1931 г., работая электромонтером на одном из ленинградских заводов. С 1932 по 1938 г. учился в Ленинградском политехническом институте, по окончании которого некоторое время работал инженером по автоматизации в Кольской энергосистеме, а затем обучался в аспирантуре.

В период с 1941 по 1946 г. И. А. Глебов служил в Советской Армии. За успешное выполнение заданий командования и проявленную при этом личную храбрость был награжден орденами Отечественной войны I степени, Красного Знамени, Красной Звезды, Александра Невского и медалями.

После демобилизации из Советской Армии с 1946 по 1961 г. он занимался преподавательской деятельностью сначала в Ленинградском институте авиационного приборостроения, а затем (с 1951 г.) в Ленинградском институте пищевой промышленности, где прошел путь от ассистента до заведующего кафедрой энергетики.

Зашитив в 1949 г. кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование синхронного генератора с ионным преобразователем в цепи возбуждения», И. А. Глебов продолжает научную работу в этом направлении в последующие годы. Одновременно с педагогической деятельностью с 1953 г. он ведет научные исследования в Институте электромеханики АН СССР, куда в 1961 г. переходит на постоянную работу. В 1960 г. выходит в свет его монография «Системы возбуждения синхронных генераторов с управляемыми преобразователями», а в 1965 г. он защищает на эту же тему докторскую диссертацию.

Многолетняя научно-исследовательская деятельность И. А. Глебова и его руководство разработками новых быстродействующих ионных систем возбуждения для мощных турбо-гидрогенераторов и синхронных компенсаторов завершились широким внедрением таких систем в СССР, а И. А. Глебов, во



главе группы разработчиков, был удостоен Государственной премии СССР 1968 г.

Большую плодотворную научную работу И. А. Глебов успешно сочетает с активной научно-организационной деятельностью. В Институте электромеханики АН СССР, преобразованном затем в научный центр крупного электромашиностроения страны и получившем название Всесоюзного научно-исследовательского института электромашиностроения, он руководит работой сначала лаборатории, затем — одного из основных отделов, в конце 1964 г. назначается заместителем директора по научной части, а в июле 1973 г. — директором этого института.

И. А. Глебов является автором 11 монографий и книг и более 160 научных статей и изобретений, в которых обобщены результаты научных работ его самого и его учеников. В 1966 г. за большую работу по подготовке специалистов высшей квалификации ему при-

сваивается ученое звание профессора по специальности электрические машины.

Большое место в деятельности И. А. Глебова занимает работа по укреплению международных научных связей СССР. Он неоднократно представлял нашу страну в международных научных организациях. Признанием авторитета И. А. Глебова в области энергетического электромашиностроения явилось избрание его в 1968 г. президентом научно-исследовательского комитета «Вращающиеся электрические машины» Международной организации по крупным электрическим системам (СИГРЭ). Его интенсивная деятельность в этой организации, а также участие в работе Международной электротехнической комиссии (МЭК) имеют большое значение для отечественного электромашиностроения и электротехники.

И. А. Глебов, член КПСС с 1943 г., активно участвует в партийной и общественной жизни: избирается членом Дзержинского РК КПСС г. Ленинграда, партийного бюро института, Президиума ЛО Правления НТОЭ и ЭП. В настоящее время он ведет большую научно-общественную работу, являясь членом секции энергетики Комитета по Ленинским и Государственным премиям СССР, членом бюро двух научных советов Академии наук СССР, заместителем председателя комиссии ГК НТ СМ СССР по использованию сверхпроводимости в электротехнике и председателем одной из ее секций, членом бюро научно-технического совета Министерства электротехнической промышленности, заместителем председателя отраслевого научно-технического совета, членом ученых советов двух институтов и др.

За большой личный вклад в организацию научных исследований и в развитие советского электромашиностроения, способствовавший успешному выполнению восьмого пятилетнего плана, в 1971 г. И. А. Глебов был награжден орденом Октябрьской Революции.

Друзья, товарищи по работе и ученики Игоря Алексеевича желают ему здоровья, личного счастья и больших успехов в научной, организационной и общественной деятельности.

Группа товарищей



АЛЕКСЕЙ МИХАЙЛОВИЧ ФЕДОСЕЕВ

(К 70-летию со дня рождения)

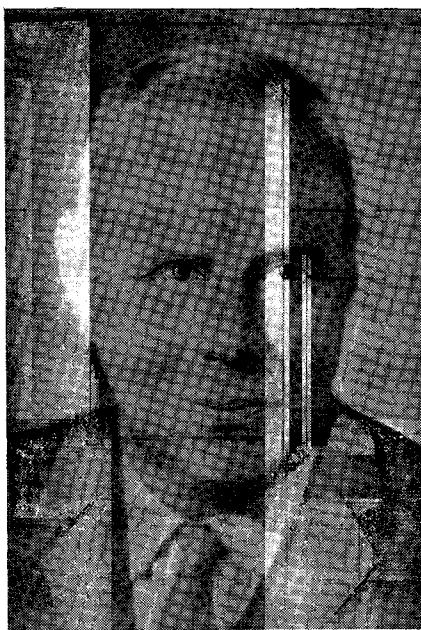
19 июня 1974 г. исполнилось 70 лет со дня рождения и 45 лет инженерной, научно-педагогической и общественной деятельности лауреата Ленинской и Государственной премий, доктора технических наук, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, профессора Федосеева Алексея Михайловича — крупного ученого в области релейной защиты и автоматики энергетических систем, заведующего кафедрой автоматизации и релейной защиты Московского ордена Ленина энергетического института.

Инженерную деятельность в области энергетики А. М. Федосеев начал в 1929 г. в проектном отделе Энергостроя, куда он был направлен после окончания МВТУ.

Более 35 лет А. М. Федосеев руководил различными отделами в Теплоэлектропроекте, затем в Энергосетьпроекте, занимающимися проблемами релейной защиты, системной автоматики, устойчивости и моделирования.

Многолетняя деятельность коллектива, руководимых А. М. Федосеевым, способствовала выпуску сложных высококачественных защитных устройств отечественного производства, не уступающих мировым стандартам, что позволило отказаться от импорта ряда защит. Выполненные под его руководством работы в области моделирования энергосистем обеспечили оснащение энергосистем и проектных организаций необходимыми расчетными средствами, повысившими уровень проектирования и эксплуатации. За участие в этих работах А. М. Федосеев в 1947 г. был удостоен звания лауреата Государственной премии.

В связи с бурным ростом советской энергетики, созданием крупнейших электростанций и уникальных дальних электропередач 400, 500 и 750 кв потребовалась разработка соответствующих си-



стем релейной защиты и автоматики. В результате плодотворной деятельности А. М. Федосеева, возглавляемого им коллектива и других организаций созданы надежные устройства, обеспечивающие бесперебойную работу энергетических систем СССР и других стран.

За работу по созданию комплекса релейной защиты и автоматики дальних электропередач напряжением 500 кв А. М. Федосеев в 1964 г. был удостоен звания лауреата Ленинской премии.

С 1931 г. одновременно с производственной деятельностью А. М. Федосеев

ведет большую педагогическую работу в Московском энергетическом институте. При его непосредственном участии в МЭИ была основана в 1942 г. кафедра автоматизации и релейной защиты, на которой подготовлена многочисленная армия специалистов, создан ряд фундаментальных трудов, обобщающих теорию и практику релейной защиты. Книга А. М. Федосеева «Основы релейной защиты» является ценным вкладом в отечественную и мировую электротехническую литературу.

Труды А. М. Федосеева обеспечили советской школе релейной защиты широкую известность и признание, чему способствовала также и его многолетняя деятельность на посту председателя отечественной национальной рабочей группы по релейной защите МЭК и СИГРЭ.

А. М. Федосеев ведет большую общественную работу. Он возглавляет научно-техническую комиссию по релейной защите в Государственном Комитете Совета Министров СССР по науке и технике, является председателем московского правления НТОЭ и ЭП, членом Всесоюзного Совета научно-технических обществ, членом технического совета Минэнерго СССР и советов других министерств.

В течение многих лет А. М. Федосеев является членом редколлегии журнала «Электричество».

За заслуги перед государством он награжден орденом Трудового Красного Знамени, двумя орденами «Знак Почета» и медалями.

Сердечно поздравляем Алексея Михайловича, желаем ему крепкого здоровья и новых успехов в деле развития советской энергетики.

Группа товарищей



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. В. Афанасьев, А. И. Бертинов, В. Г. Бирюков, В. А. Веников, И. С. Ефремов, Д. Г. Жимерин,
А. М. Залесский, П. М. Ипатов, М. П. Костенко, Л. Г. Мамиконянц (главный редактор), Л. Р. Нейман,
И. И. Петров, С. И. Рабинович, А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, А. С. Шаталов.

Адрес редакции: 103012 Москва, Б. Черкасский пер., 2/10. Телефон 294-24-80.

Почтовый адрес: 101000 Москва, Главный почтамт, абонентский ящик № 648.

Адрес для телеграмм: МОСКВА 12, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Технический редактор Л. М. Кузнецова

Подписано к печати 6/VII 1974 г.

Печ. л. 12

Зак. 738

Т-11221

Уч.-изд. л. 15,92

Цена 80 коп.

Сдано в набор 15/IV 1974 г.

Формат 60×90^{1/8}

Тираж 9775 экз.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|---|
| <p>Авраменко А. В., Богданов В. А., Семенов В. А., Соловьев С. А., Черня Г. А.—Автоматизированные системы управления в энергетике</p> <p>Кривенцев В. И., Морозовский В. Т.—О себестоимости электрической энергии, вырабатываемой автономными электроэнергетическими системами транспортных средств</p> <p>Мансветов В. Л.—О точности выявления угла расхождения эквивалентных э. д. с. частей энергосистемы и его производных по времени</p> <p>Веников В. А., Соколов В. И.—О разработке системы электроснабжения промышленных предприятий с двумя иэминальными частотами</p> <p>Айрапетян Г. А., Этмекчян А. А., Айрапетян Ю. И.—Исследования условий возникновения лавины частоты в энергосистеме</p> <p>Астахов Ю. Н., Василенко И. Н.—Чувствительность потерь мощности в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения к регулированию напряжения</p> <p>Мирзабекян Г. З.—Влияние турбулентности потока на электроосаждение частиц аэрозоля</p> <p>Перлин А. С.—Исследование разрядных характеристик газовых промежутков с диэлектрическими покрытиями на электродах при повышенном давлении</p> <p>Петров И. И., Мейстель А. М., Наумычева К. И.—Определение тенденций развития автоматизированного электропривода с помощью статистического анализа отечественной и зарубежной литературы</p> <p>Орлов И. Н.—Общий анализ двухдвигательного электропривода</p> <p>Некрасов В. И.—Пульсация токов при многофазном импульсном преобразовании напряжения</p> <p>Попичко В. В., Чернык М. А., Фильц Р. В.—Дифференциальные индуктивности некомпенсированных машин постоянного тока</p> | <p>Махарадзе О. П.,</p> <p>1</p> <p>6</p> <p>10</p> <p>17</p> <p>20</p> <p>23</p> <p>25</p> <p>31</p> <p>36</p> <p>42</p> <p>47</p> <p>51</p> |
| <p>◆ ◆ ◆</p> | |
| СООБЩЕНИЯ | |
| <p>Мельзак И. Я., Мельников Н. А., Роддатис В. К., Шеренцис А. Н.—Влияние режима работы и метеорологических условий на активные сопротивления и проводимости линий электропередачи 220—1150 кв</p> <p>Шнелль Р. В., Митрофанов Е. П., Заикин В. С.—О применении принципов векторной оптимизации к задаче расстановки опор линий электропередачи по профилю</p> <p>Степан Илиев—Влияние способа учета нагрузки на динамическую устойчивость сложных энергетических систем</p> <p>Палванов В. Г.—Шестифазные мостовые преобразователи</p> <p>Авдеев И. И.—Сравнительная оценка объема вычислений при аналитических методах расчета коэффициентов чувствительности системных функций цепей</p> <p>Тихомиров Г. М., Ланкин В. Е.—О дифференциальной зависимости между током и напряжением в катушке с ферромагнитным магнитопроводом</p> | |
| <p>71</p> <p>74</p> <p>76</p> <p>79</p> <p>81</p> <p>83</p> | |
| ДИСКУССИИ | |
| ХРОНИКА | |
| <p>85</p> <p>88</p> | |

CONTENTS

| | |
|---|---|
| <p>Automatized Control Systems in the Power Industry— A. V. Avramenko, V. A. Bogdanov, O. P. Makharadze, V. A. Semenov, S. A. Sovalov, G. A. Chernya</p> <p>On the Self—Cost of Electric Energy Produced by Independent Power Systems for Transport—V. I. Kriventsev, V. T. Morozovski</p> <p>On the Accuracy of Determining the Phase Angle and its Time Derivative Between Equivalent EMF's for Sections of a Power System—V. L. Mansvetov</p> <p>On Developing an Industrial Power Supply System Having Two Rated Frequencies—V. A. Venikov, V. I. Sokolov</p> <p>A Study of Conditions for Frequency Collapse in a Power System—G. A. Airepetian, A. A. Etmenchyan, U. I. Airepetian</p> <p>The Sensitivity of Power Losses on EHV Transmission Lines to Voltage Regulation—U. N. Astakhov, I. N. Vasilenko</p> <p>How the Turbulence of a Stream Influences Electric Precipitation of Aerosol Particles—G. Z. Mirzabekian</p> <p>A Study of the Discharge Characteristics of Gas Filled Clearances with Dielectric Electrode Coatings at High Pressures—A. S. Perlin</p> <p>Determining the Trends of Development of Automatic Electric Drives Based on Statistical Analysis of Soviet and Foreign Literature—I. I. Petrov, A. M. Meistel, K. I. Naumicheva</p> <p>General Analysis of a Two—Motor Drive—I. N. Orlov</p> <p>Current Pulsation With Multi—phase Voltage Pulse Conversion—V. I. Nekrasov</p> <p>The Differential Inductance of Uncompensated D. C. Machines—V. V. Popichko, M. A. Chernik, R. V. Filtz</p> | <p>1</p> <p>6</p> <p>10</p> <p>17</p> <p>20</p> <p>23</p> <p>25</p> <p>31</p> <p>36</p> <p>42</p> <p>47</p> <p>51</p> |
| <p>◆ ◆ ◆</p> | |
| REPORTS | |
| <p>How Operating Conditions and the Weather Influence the Resistance and Conductance of 220—1150 kV Transmission Lines—I. J. Melzak, N. A. Melnikov, V. K. Roddatis, A. N. Sherentsis</p> <p>Application of Vector Optimization Principles to the Transmission Line Tower Allocation Problem—R. V. Shnell, E. N. Mitrofanov, V. S. Zaikin</p> <p>How the Way of Accounting for Loads Influences the Transient Stability of Complex Power Systems—Stephan Iliev</p> <p>Six—Phase Bridge Converters—V. G. Palvanov</p> <p>A Comparative Estimate of the Amount of Computation Involved With Analytical Methods for Calculating Sensitivity Coefficients of Network System Functions—I. I. Avdeev</p> <p>The Differential Relationship Between Current and Voltage in a Coil With a Ferromagnetic Magnetic Circuit—G. M. Tikhomirov, V. E. Lankin</p> | |
| <p>71</p> <p>74</p> <p>76</p> <p>79</p> <p>81</p> <p>83</p> | |
| DISCUSSION | |
| CHRONICLE | |
| <p>85</p> <p>88</p> | |



РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 621.311-52

Автоматизированные системы управления в энергетике. Авраменко А. В., Богданов В. А., [Махарадзе О. П.], Семенов В. А., Соловьев С. А., Черня Г. А. — «Электричество», 1974, № 6.

Рассмотрены структура, функции, задачи и этапы создания ОАСУ «Энергия». В текущем пятилетии предусмотрено создание первой очереди ОАСУ «Энергия» в составе:

двух основных специализированных подсистем, соответствующих двум главным направлениям производственной деятельности (управление производством, распределением и реализацией электрической и тепловой энергии; управление капитальным строительством, предприятиями стройиндустрии и промышленными предприятиями);

девяти функциональных подсистем, являющихся типовыми для промышленных министерств;

автоматизированной системы диспетчерского управления Единой энергосистемы СССР и объединенными энергосистемами (ОЭС);

автоматизированных систем управления предприятиями (энергосистемами);

автоматизированных систем управления строительно-монтажными трестами;

автоматизированных систем управления крупными электростанциями;

автоматизированных систем управления крупными энергоблоками на тепловых электростанциях.

Описаны требования к составу и структуре технических средств и математического обеспечения ОАСУ «Энергия». Библ. 2.

УДК 621.315.1.017:621.316.722

Чувствительность потерь мощности в линиях электропередач к сверхвысокому напряжению к регулированию напряжения. Астахов Ю. Н., Висленко И. Н. — «Электричество», 1974, № 6.

Рассмотрено влияние регулирования рабочего напряжения на потери мощности в линиях сверхвысокого напряжения в области их минимума. Показано, что экономическая эффективность регулирования напряжения на линиях с целью снижения потерь энергии должна оцениваться с учетом погрешности исходной информации. Библ. 10.

УДК 629.1:[621.31:338.5]

О себестоимости электрической энергии, вырабатываемой автономными электроэнергетическими системами транспортных средств. Кривенцев В. И., Морозовский В. Т. — «Электричество», 1974, № 6.

Излагается методика определения себестоимости электрической энергии, вырабатываемой автономными электроэнергетическими системами транспортных средств. С целью учета изменений условий функционирования транспорта и его эксплуатационных показателей используется среднее интегральное значение себестоимости за некоторый промежуток времени эксплуатации транспорта. Библ. 2.

УДК 621.3.018

О точности выявления угла расхождения эквивалентных э. д. с. частей энергосистемы и его производных по времени. Мансеветов В. Л. — «Электричество», 1974, № 6.

Приведены уравнения, однозначно связывающие параметры схемы замещения электропередачи с параметрами режима б. Оценены погрешности моделирования в симметричном и несимметричном режимах для схем электропередачи с промежуточными нагрузками, предложены способы снижения этих погрешностей. Даны методы расчета уставок моделирующего устройства путем приведения энергосистемы к двум эквивалентным четырехполюсникам. Библ. 10.

УДК 621.311.4.029.45

О разработке системы электроснабжения промышленных предприятий с двумя номинальными частотами. Веников В. А., Соколов В. И. — «Электричество», 1974, № 6.

Часть электроприемников — высокоскоростные электродвигатели, установки индукционного нагрева, газоразрядные светильники, а также трансформаторы имеют оптимальную частоту выше 50 гц, и при переводе на повышенную частоту 110—150—(400) гц их удельная стоимость снижается в среднем на 2—3 руб/квт. Дополнительная экономия капитальных затрат получается при повышении скорости приводных механизмов свыше 3000 об/мин. Другие приемники — электролампы накаливания, электрические печи сопротивления и другие — безразличны к повышению частоты. Значительное число электроприемников (тихоходные электродвигатели переменного тока) при повышении частоты ухудшают технико-экономические показатели.

Электроснабжение промышленных предприятий на переменном токе 50 гц и 100—400 гц дало бы снижение затрат на первую часть электроприемников, не изменяя стоимость остальных, и повышение производительности труда благодаря увеличению скоростей механизмов. При наличии в системе электроснабжения двух частот любой приемник повышенной номинальной частоты может быть подключен и к сети 50 гц и иметь две скорости вращения. Библ. 7.

УДК 621.311:621.3.016.31

Некоторые исследования условий возникновения лавины частоты в энергосистеме. Айрапетян Г. А., Этмекчян А. А., Айрапетян Ю. И. — «Электричество», 1974, № 6.

Исследованы условия возникновения лавины частоты в энергосистеме с преобладанием энергоблоков с барабанными котлами на базе управлений процессов, моделюемых на АВМ. Математическая модель включает уравнение динамики энергосистемы, а также уравнения парогенератора, турбины питательного и циркуляционного насосов, представленных эквивалентными параметрами. Оценена возможность различных упрощений математической модели. Результаты исследований даны в виде кривых изменений параметров.

Построены nomogramмы для выбора уставок АЧР-П. Библ. 7.

УДК 621.359.3.001.24

Влияние турбулентности потока на электроосаждение частиц аэрозоля. Мирзабекян Г. З. — «Электричество», 1974, № 6.

Приведены результаты численного решения на ЦВМ уравнения, описывающего процесс электроосаждения частиц аэрозоля из турбулентного потока в однородном поле и поле трубчатого электрофильтра. Определены границы применимости предположений о равномерном перемешивании частиц турбулентным потоком и о постоянстве профиля концентраций по длине электрофильтра. Библ. 10.

УДК 621.317.333.8:621.315.618.3

Исследование разрядных характеристик газовых промежутков при повышенном давлении с диэлектрическими покрытиями на электродах. Перлин А. С. — «Электричество», 1974, № 6.

Приводятся результаты исследований электрической прочности сжатого азота для промежутков с изоляционными покрытиями на электродах в значении pd до 30 000 мкг/ст. см. Показано, что применение изоляционных покрытий позволяет повысить напряжение первого пробоя в сжатом азоте приблизительно на 50—70%, а также довести значение напряженности, при которой еще выполняется закон подобия для азота до 320 кв/см. Показано, что нанесение покрытий на электроды может заменить искровую тренировку с целью достижения предельных значений пробивных напряжений в газонаполненном промежутке. Библ. 11.

УДК 621.314.5.001.5

Пульсации токов при многофазном импульсном преобразовании напряжения. Некрасов В. И. — «Электричество», 1974, № 6.

Рассмотрена пульсация токов в нагрузке, обладающей конечной индуктивностью в сравнении с индуктивностью сглаживающих реакторов.

Определены режимы независимой работы фаз преобразователя и режимы наибольших пульсаций при широтном и частотном способах изменения коэффициента заполнения.

Показано, что амплитуда пульсаций не зависит от номера стационарной точки только при широтном управлении и может быть существенно снижена индуктивностью цепи нагрузки.

Предложены соотношения для расчета пульсаций токов и индуктивности сглаживающих реакторов многофазного импульсного преобразователя напряжения. Библ. 6.

УДК 621.317.334

Дифференциальные индуктивности некомпенсированных машин постоянного тока. Попичко В. В., Чернык М. А., Фильц Р. В. — «Электричество», 1974, № 5.

Обоснована предложенная схема замещения магнитной цепи некомпенсированной машины постоянного тока с насыщенной главной магнитной цепью. На ее основе выведены общие выражения для дифференциальных индуктивностей машины, являющихся основными ее параметрами и входящими в качестве коэффициентов в дифференциальные уравнения электрического равновесия ее электрических контуров.

Разработан алгоритм численного расчета индуктивностей на ЦВМ. Приведены расчетные зависимости индуктивностей от токов для машины П-61 и их сравнение с экспериментальными данными. Библ. 7.

УДК 538.311.001.24

Критериальная оценка электромагнитных явлений в тонкой ферромагнитной пластине, находящейся в однородном магнитном переменном поле. Иванов-Смоленский А. В., Абрамкин Ю. В. — «Электричество», 1974, № 6.

Дается оценка в критериальной форме потерь на перемагничивание и их составляющих в ферромагнитной пластине при учете комплексной магнитной проницаемости. Приводится электрическая схема замещения проводящего элемента пластины и ее параметры, выраженные также в критериальной форме. Библ. 3.

УДК 621.313.322-81.016.35 + 621.313.322-81.013.8

Быстродействие систем возбуждения и устойчивость параллельной работы турбогенераторов. Корякин М. А. — «Электричество», 1974, № 4.

Рассмотрена возможность определения эффективности увеличения быстродействия возбудителей в отношении повышения пределов динамической устойчивости по изменению тока возбуждения к моменту максимального вылета ротора с учетом инерционности цепи возбуждения. Библ. 2.

УДК 621.313.32.001.24

Расчет параметров эквивалентных роторных контуров синхронных машин по их экспериментальным частотным характеристикам. Рогозин Г. Г., Ларин А. М. — «Электричество», 1974, № 6.

Рассматривается способ определения параметров контуров, эквивалентирующих массивные элементы роторов синхронных машин по значениям их комплексных проводимостей. Показана возможность использования данных обычных промышленных испытаний для уточнения схем замещения. Библ. 4.

УДК 621.372:621.315.592

Расчет наработки до предельного состояния и уровня резервирования высоковольтных вентильных схем. Шульман М. Х. — «Электричество», 1974, № 6.

Получены выражения, связывающие вероятность работоспособного состояния схемы с интенсивностью отказов одного полупроводникового вентиля или вентильной ячейки. Выясняется связь между эксплуатационными характеристиками схемы и ее структурными параметрами. Теоретические соотношения иллюстрируются данными расчетов. Дан алгоритм вероятностного моделирования на ЦВМ процесса отказа резерва в схеме. Библ. 2.

УДК 621.317.333.6

Автоматизированный стенд для исследования загрязненной высоковольтной изоляции в полевых условиях. Горшенин Н. А., Жирников Г. А., Закиров Н. М. и др. — «Электричество», 1974, № 6.

Приведено описание испытательного стенда для исследования высоковольтной изоляции в условиях воздействия естественных загрязнений и различных атмосферных явлений. Стенд оборудован комплексом аппаратуры для синхронной регистрации электрических токов по поверхности изоляторов и метеорологических условий. Аппаратура стендаТ работает автоматически, без постоянного обслуживающего персонала.

УДК 621.315.661

О применении принципов векторной оптимизации к задаче расположения опор линий электропередачи по профилю. Шнелль Р. В., Митрофанов Е. Н., Зайкин В. С. — «Электричество», 1974, № 6.

Рассматривается задача оптимальной расположения опор линий электропередачи, исходя из представления расположения опор в виде части сложной системы автоматизации процесса проектирования ВЛ. Показано, что при оптимизации наряду с основным экономическим критерием следует применять дополнительные (частные) критерии, при этом для решения задачи могут быть использованы принципы векторной оптимизации.

Предложен метод усечения дерева вариантов, позволяющий сократить путь отыскания оптимального решения. Библ. 6.

УДК 621.311.016.352.016.3

Влияние способа учета нагрузки на динамическую устойчивость сложных энергетических систем. Стефан Ильин. — «Электричество», 1974, № 6.

Приводятся и анализируются результаты исследования, проведенного с целью выяснения влияния вида моделирования комплексной нагрузки посредством постоянного полного сопротивления и эквивалентного асинхронного двигателя на динамическую устойчивость сложных энергетических систем. Исследования проводятся с использованием метода дробного планирования эксперимента. Библ. 5.

УДК 621.372.001.24

Сравнительная оценка объема вычислений при аналитических методах расчета коэффициентов чувствительности системных функций цепей. Аведеев И. И. — «Электричество», 1974, № 6.

Аналитические методы коэффициентов чувствительности системных функций цепей сравниваются по количественным критериям: объему вычислений и памяти. Показываются преимущества метода преобразований цепей с использованием матриц при большом количестве элементов цепи и комбинированных методов при числе элементов менее 14. Библ. 12.

УДК 621.314.6

Шестифазные мостовые преобразователи. Палванов В. Г. — «Электричество», 1974, № 6.

Дана классификация и описаны основные свойства различных схем шестифазных мостовых преобразователей. Указывается возможная область их применения. Библ. 8.

УДК 538.533.001.24

О дифференциальной зависимости между током и напряжением в катушке с ферромагнитным магнитопроводом. Тихомиров Г. М., Лакин В. Е. — «Электричество», 1974, № 6.

Предлагается математическая функция, выражающая в дифференциальной форме соотношение между напряжением и током в катушке с ферромагнитным магнитопроводом и полученная с помощью интеграла вероятности с переменным верхним пределом. Вид функции физически нагляден и удобен при решении дифференциального уравнения с нелинейной индуктивностью.

Приводятся основные характеристики некоторых типов ферромагнитных сердечников, необходимые для практического использования предложенной функции. Библ. 4.

≠ Elektrim



ПОВТ «ЭЛЕКТРИМ» ПРЕДЛАГАЕТ:

Энергетическое оборудование и объекты:
теплоэлектростанции, турбины, котельные, градирни,
паровые и водяные котлы, турбоагрегаты
Высоко- и низковольтные комплектные
распределительные устройства
Высоко- и низковольтную аппаратуру
Силовые трансформаторы
Электрические машины постоянного и переменного тока
Оборудование электрической тяги и выпрямительную
аппаратуру
Оборудование проводной связи
Электроустановочное оборудование
Осветительную арматуру
Кабели и провода
Машины и устройства для кабельной промышленности
Приглашаем посетить нашу экспозицию на Польской
промышленной выставке «30 лет ПНР» в Москве, кото-
рая будет открыта с 18.7 по 18.8.1974 г. на территории
ВДНХ

Польское общество внешней
торговли по электротехнике

WARSZAWA, Czackiego 15/17
ПОЛЬША

Почтовый адрес:
00-950 WARSZAWA

Почтовый ящик: 638

Телегр. адрес:
ELEKTRIM - WARSZAWA
Телефон: 26-62-71
Телетайп: 814 351