

621.3(05)

~~Э-45~~

Ж 3984

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

100000, г. Москва, ГСП,
ул. М. Н. Ульяновой, дом 1
Вологодский облас нал
Сиб. отд. им. Н. Д. Гавришкина

1952



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

1-2

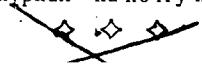
СОДЕРЖАНИЕ

Б. С. Успенский — Гидроэлектрические станции большой мощности	3
В. В. Андреев — Четырехфазная схема электропередачи с трехфазными трансформаторами	15
А. А. Фильштинский — Четырехпроводная электропередача как средство повышения экономичности и надежности высоковольтных сетей	17
Л. Е. Эбин — Экономичные схемы электропередачи и методы их расчета	23
В. В. Овсенко — Некоторые вопросы конструирования четырехпроводных линий электропередачи	30
Б. А. Садиков — Электрокинетическое объяснение законов магнитостатики	34
П. А. Фридкин — О третьем главном размере дугового статора	41
Г. А. Чайнов — К расчету величин действующих затуханий в электрических фильтрах	46
В. Е. Казанский и Л. Д. Стернинсон — Измерение частоты посредством двойной T-образной схемы	49
В. Ю. Ломоносов — Операторное исчисление и электротехническое образование	54
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
Б. И. Камень — Получение в лабораторных условиях момента, не зависящего от скорости	56
Г. М. Бидер — Эксплуатация электроприводов прокатных станов на Магнитогорском металлургическом комбинате им. Сталина	59
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
Э. А. Меерович и А. А. Кузнецов — Электростатический генератор с ленточным транспортом — изобретение Б. И. Угримова	61
А. Е. Каплянский — Работы М. О. Доливо-Добровольского по созданию электронизмерительной техники переменного тока	62
ДИСКУССИИ	
К статье В. Ю. Ломоносова „Операторное исчисление и электротехническое образование“ К. А. Круг, С. В. Страхов, К. М. Поливанов. Правила устройства электротехнических установок А. Б. Крикунчик, А. Н. Шерендис, Т. П. Мусатов и Е. С. Гройс. Тарифные мероприятия в борьбе за повышение $\cos \varphi$ Ю. Л. Мукосеев.	66
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
К вопросу о несимметричном режиме работы гидрогенераторов. О целесообразности замены недогруженных асинхронных двигателей. К статье Г. И. Бабата „Трансформаторы электромагнитной энергии“. О параметрах первой электропередачи М. О. Доливо-Добровольского. Факты должны описываться точно. Замечания к статье „О технических требованиях на манганиновые провода. О стандартизации маркировки схем вторичной коммутации. В институте автоматики и телемеханики АН СССР.“	74
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Процесс коммутации в однофазной мостовой схеме с весьма большой сглаживающей индуктивностью. Новый источник света, использующий явление электролюминесценции. Электронные акселерометры. Механические выпрямители большой мощности. Исследование переходных процессов на модели линии электропередачи 380 кв. Факторы, влияющие на срок службы бумажных конденсаторов. Измерение потерь в целых листах электротехнической стали. Опыт применения стальялюминиевых контактных проводов в Польше.	80
ХРОНИКА	
Присуждение первой премии имени П. Н. Яблочкова. Профессор А. А. Глазунов. Профессор Н. Н. Щедрин. Памяти В. М. Хрущева. В доме инженера и техника им. Дзержинского	90
БИБЛИОГРАФИЯ	
Н. А. Мельников — Книга В. Г. Холмского „Применение регулируемых трансформ в электрических сетях“	
И. И. Петров — Книга А. Я. Лернера и В. И. Фейгина „Автоматическое управление э приводами“	
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	

К СВЕДЕНИЮ ГОДОВЫХ ПОДПИСЧИКОВ НА ЖУРНАЛ „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

С настоящим номером журнала годовым подписчикам на журнал „Электричество“ на рассылается приложение „Календарь-справочник на 1952 г. „Электричество“
По вопросам доставки Календаря-справочника обращайтесь (с предъявлением по квитанции) по месту подписки на журнал—на почту и местные организации Союз;

ЖК-3984



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**,
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Бутневич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Глазунов**,
член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, кандидат техн. наук
И. А. Сыромятников, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**.

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К-4-24-80.

Адрес для телеграмм: Москва Электричество.

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт,
почтовый ящик № 648.

Гидроэлектрические станции большой мощности

Доцент Б. С. УСПЕНСКИЙ

Гидроэнергoproject

Советский Союз стоит на первом месте в мире по запасам гидроресурсов своих рек. Потенциальная энергия только крупных рек СССР составляет свыше 300 млн. квт.

Для капиталистических стран характерно хищническое использование речного стока. На реках США построено свыше 50 гидроузлов для целей орошения и водоснабжения и только при 8 из них имеются гидроэлектростанции. Подавляющее большинство гидроэлектростанций, построенных в США, использует речной сток лишь для производства электроэнергии, интересы других отраслей хозяйства при этом не учитываются.

Сотни лет в царской России хищнически вырубались леса вдоль Волги и ее притоков. Великая русская река становилась мелководной, она постепенно теряла свое значение, как важнейший водный путь. Вместе с этим возрастала засушливость волго-каспийских земель.

Использование рек в энергетических целях в царской России было ничтожно. Мощность гидроэлектростанций в России накануне революции составляла всего 4,9 тыс. квт.

Только победа Великой Октябрьской социалистической революции открыла гигантские возможности для использования в интересах народа богатейших гидроресурсов наших рек.

За годы советской власти проделана большая работа по реконструкции рек СССР, по использованию их стока для производства электроэнергии, улучшения условий судоходства по ним, орошения и обводнения засушливых районов. В 1950 г. на гидроэлектростанциях произведено 18,3% электроэнергии, выработанной в том же году всеми предприятиями Министерства электростанций. За 10 лет (1940—1950) выработка электроэнергии на гидроэлектростанциях возросла в 2,5 раза.

Начертанный товарищем Сталиным грандиозный план создания материально-технической базы коммунизма, план преобразования природы,

Учитывая огромный интерес к техническим проблемам, возникающим в связи со стройками коммунизма, редакция решила опубликовать серию статей, дающих широким кругам читателей журнала общее представление о современной гидроэлектростанции большой мощности, о ее техническом устройстве, о современном крупном гидрогенераторе, о линии электропередачи большой протяженности и т. п. Статья Б. С. Успенского «Гидроэлектростанция большой мощности» является первой статьей этой серии. В настоящем номере печатается первая часть этой статьи, посвященная гидротехнической части современной гидроэлектростанции большой мощности.

означает дальнейший, еще более мощный размах работ по реконструкции рек нашей страны. Начатое по инициативе товарища Сталина и ведущееся в настоящее время строительство таких гигантов, как Куйбышевская, Сталинградская и Каховская гидроэлектростанции, строительство Волго-Донского, Южноукраинского,

Северо-Крымского и Туркменского каналов, создание огромной сети оросительных и обводнительных каналов являются ярким выражением этого размаха.

Гидроресурсы, которыми располагает наша страна, нашли в лице Советского государства наиболее бережного и рачительного хозяина. Особенность работ по реконструкции рек в нашей стране заключается в том, что они проводятся в интересах многих отраслей народного хозяйства. При возведении гидроузла на крупной реке разрешается не одна какая-либо задача, а решается сразу несколько задач. Такое комплексное использование гидроресурсов возможно только в условиях планового социалистического хозяйства и совершенно немыслимо при капитализме.

Сток рек, в особенности равнинных, отличается крайней неравномерностью в течение года. Между тем интересы ряда отраслей народного хозяйства требуют более равномерного его распределения. В связи с этим в практике нашего гидротехнического строительства уделяется большое внимание регулированию стока. Создаваемые с этой целью водохранилища собирают весенний сток и расходуют его летом в интересах речного транспорта и ирригации, а зимой, в интересах энергетики.

Комплексный характер использования речного стока находит свое отражение также в том, что прежде всего рассматривается и решается вопрос о наиболее целесообразном, наиболее экономичном использовании данной реки в целом. Только после этого начинается проектирование и строительство на ней отдельных гидроузлов.

В результате такого подхода на крупной реке создается не один гидроузел, а каскад гидроузлов с гидроэлектростанциями, судоходными шлюзами и пр.

Наиболее ярким примером такого использования стока реки являются проводимые на протяжении нескольких лет работы по реконструкции Волги. Еще в годы довоенных сталинских пятилеток на Волге были построены три гидроузла — Ивановский, Угличский и Щербаковский. Созданием этих гидроузлов разрешались задачи водоснабжения, речного транспорта и энергетики. В настоящее время на Волге сооружаются еще три гидроузла — Горьковский, Куйбышевский и Сталинградский. Созданием этих гидроузлов наряду с задачами энергетики и речного транспорта решаются важнейшие задачи орошения и обводнения засушливых районов.

Задача настоящей статьи — дать общее представление о техническом устройстве современных гидроэлектрических станций большой мощности на равнинных реках. Для таких гЭС характерны сравнительно небольшие напоры, измеряемые двумя-тремя и очень редко шестью десятками метров. Получение больших мощностей при таких напорах является довольно сложной инженерной задачей.

Фронт напорных сооружений гЭС на равнинной реке обычно состоит из следующих частей: 1) бетонной водосливной плотины; 2) земляной плотины; 3) судоходных шлюзов; 4) рыбоходов и рыбоподъемников; 5) здания гидроэлектростанции.

Протяженность фронта напорных сооружений мощных гидроэлектростанций на равнинных реках достигает 4...6, а в отдельных случаях 10...20 км. Это обусловлено значительной шириной долины равнинной реки в ее среднем и нижнем течении. Русло реки в бытовых условиях занимает в общей протяженности фронта напорных сооружений сравнительно небольшую часть. Наибольшая же часть фронта приходится на пойму, которая в весеннее время в средние по водности и многоводные годы затопливается.

Геологические условия. Качественные скальные породы, залегающие на небольшой глубине, в долинах равнинных рек встречаются редко. В большинстве случаев в основании гидротехнических сооружений, возводимых на равнинных реках, лежат мягкие грунты — пески, супеси, суглинки, глины и разрушенные скальные породы. Глубина залегания мягких грунтов весьма велика и достигает сотен метров. Поверхностные слои представляют собой речные наносы (аллювий).

Наличие в долине равнинной реки качественного скального основания, имеющего неглубокое залегание, является тем обстоятельством, которое определяет выбор створа сооружений и их взаимное расположение. Совершенно естественно все тяжелые, бетонные сооружения (здание гидроэлектростанции, водосливную плотину и шлюз) расположить на скале, так как это дает ряд существенных преимуществ в отношении упрощения противифльтрационных устройств, уменьше-

ния объема бетона ввиду высоких коэффициентов трения бетона по скале, повышения пропускной способности водопропускных устройств в паводковый период и, следовательно, уменьшения их длины.

Возведение гидротехнических сооружений с напором более 10 м на мягких деформирующихся основаниях — одна из сложнейших инженерных проблем. В связи с задачей использования мощных равнинных рек СССР для целей социалистического строительства, усилия наших инженеров-геологов и гидротехников были направлены на решение этой проблемы. В настоящее время вопрос о возможности использования мягких грунтов в качестве основания для крупных гидротехнических сооружений разрешен не только теоретически, но и практически. Все принятые решения полностью оправдали себя на практике при строительстве и эксплуатации ряда гидроузлов. Приоритет в разрешении этой крупнейшей проблемы принадлежит советским ученым и инженерам.

Интересно отметить, что 20—25 лет назад существовало мнение, будто бетонные сооружения надо обязательно размещать на скальном основании хотя бы даже плохого качества; возможность размещения их на мягких грунтах полностью отвергалась. В этот господствовавший ранее взгляд наши ученые и инженеры внесли существенные коррективы. Раньше говорили: жесткие сооружения располагать на твердом основании, а гибкие (не жесткие) — на мягких грунтах. Теперь же можно сказать: тяжелым и бетонным сооружениям должно соответствовать прежде всего качественное однородное (по длине) основание.

Вопрос о выборе в качестве основания для бетонных сооружений глинистых или песчаных грунтов решается в зависимости от геологического строения створа сооружений, условий компоновки гидроузла и на основании технико-экономических сопоставлений. Глинистые грунты облегчают создание противифльтрационных устройств, но зато требуют более тяжелых бетонных сооружений вследствие меньшего коэффициента трения, чем у песчаных грунтов. Следовательно, на последних по условиям устойчивости можно создавать более легкие сооружения.

Бетонная водосливная плотина. Назначение водосливной плотины — сбрасывать ту часть паводковых вод, которая не может быть аккумулирована водохранилищем.

Водосливная плотина крупного гидроузла (рис. 1), как правило, выполняется из бетона, массивной, гравитационной. Действию горизонтальных усилий (давлению воды, льда и пр.) такая плотина сопротивляется главным образом силой трения между тяжелым бетонным массивом и основанием.

Со стороны верхнего бьефа к плотине примыкает понур — водонепроницаемое покрытие, служащее для удлинения путей фильтрации под плотиной и для увеличения устойчивости сооружения.

Устойчивость бетонной водосливной плотины может быть увеличена путем использования пригрузочного действия воды. Для этого плотину гибко привязывают к железобетонному понуру или развивают ее в виде плиты в сторону верхнего бьефа. Применять при мягких грунтах легкую конструкцию железобетонной плотины с малым объемом бетона нецелесообразно из-за сложности ее в строительном отношении и по климатическим условиям.

Со стороны нижнего бьефа перед плотиной сооружается водобой, представляющий собой бетонную плиту толщиной 3... 5 м с гасительными устройствами. Такая массивность водобоя обусловлена тем, что в нижнем бьефе гасится энергия воды, составляющая 6... 10 млн. квт. На 1 пог. м ширины водобоя гасится 5... 7 тыс. квт.

За водобоем размещается рисберма, представляющая собой гибкое крепление, защищающее русло от размыва. На рисберме производится дополнительное гашение энергии воды. Она обеспечивает также безопасный выход фильтрационных вод из-под основания напорных сооружений в нижний бьеф.

Протяженность водосливной плотины по фронту зависит от величины паводкового расхода воды и геологических условий в створе сооружений.

В качестве максимального паводкового расхода воды принимается расход расчетной повторяемости, которая для крупных сооружений принимается равной одному разу в тысячу лет (обеспеченность 0,1%)¹. Для крупных равнин-

ных рек этот расход достигает 25... 70 тыс. м³/сек и более.

Геологические условия определяют величину удельного расхода на рисберме в месте схода паводковых вод в бытовое русло реки. Мягкие легко размываемые грунты допускают меньшие удельные расходы на рисберме. В зависимости от качества грунтов они находятся в пределах 20... 50 м³/сек на погонный метр. Скальные и полускальные основания допускают большие расходы, которые в зависимости от качества скалы колеблются от 40 до 80 м³/сек на погонный метр.

На выбор величины удельных расходов влияет также глубина и гидравлический режим нижнего бьефа. В паводок уровень нижнего бьефа поднимается и его глубина увеличивается. Это уменьшает скорости воды в нижнем бьефе, а следовательно, и опасность размывов русла реки у сооружений.

Гидравлический режим нижнего бьефа зависит от многих обстоятельств, связанных с топографическими условиями створа, взаимным расположением сооружений, их конструкцией и т. п., и исследуется на моделях в лаборатории. Данные исследования позволяют найти оптимальное технико-экономическое решение в отношении выбора величины удельных расходов, конструкции и взаимного расположения сооружений гидроузла.

Общая длина фронта бетонной водосливной плотины определяется как частное от деления величины расчетного паводкового расхода воды, пропускаемого через плотину, на величину допу-

¹ Все сооружения проверяются также на максимальный расход повторяемостью один раз в 10 тыс. лет (обеспеченность 0,01%), но при этом допускается форсированное повышение уровня верхнего бьефа и снижение запасов прочности в сооружениях.

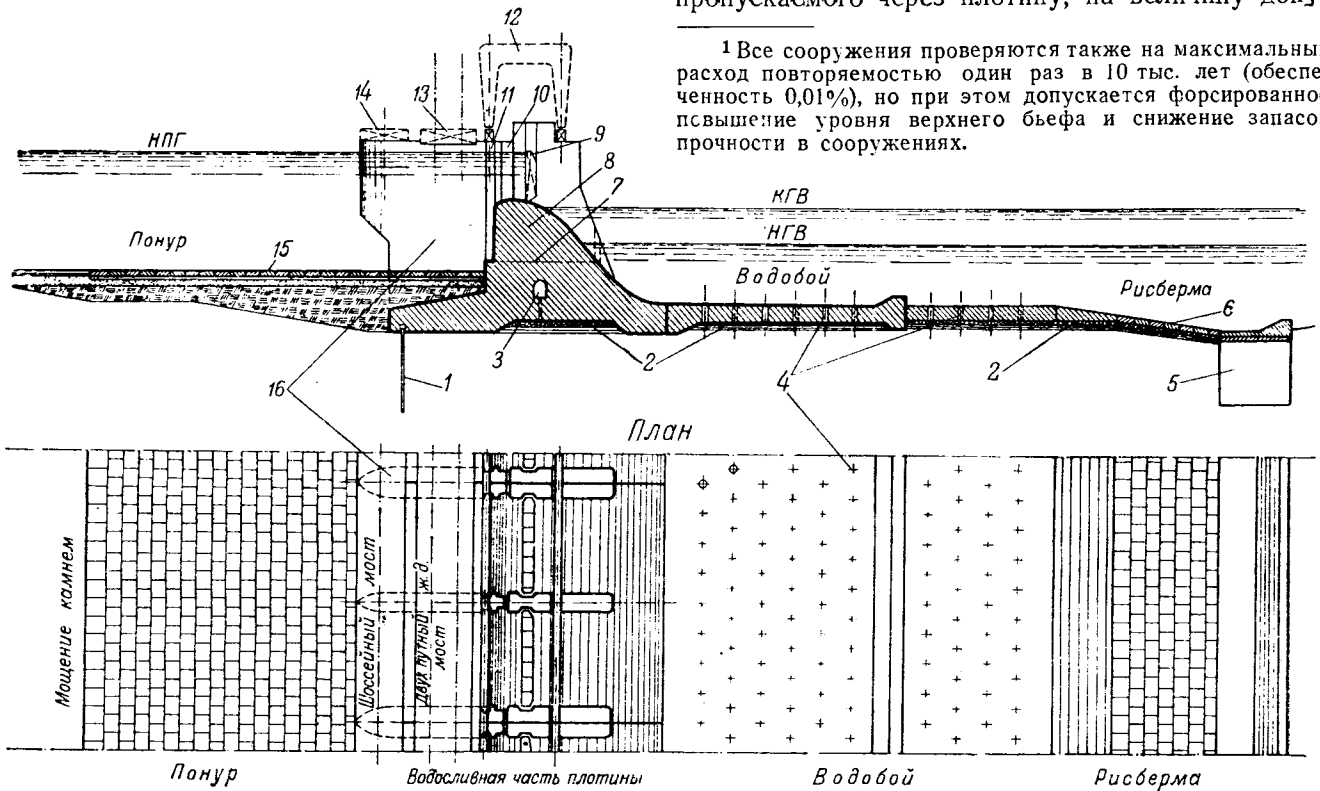


Рис. 1. Разрез по водосливной бетонной плотине.

1 — металлический шпунт; 2 — обратный фильтр; 3 — дренажная потеря; 4 — дренажные скважины; 5 — ячеистая стенка (металлический шпунт); 6 — плиты; 7 — часть тела водослива, возводимая способом «гребенки»; 8 — водослив; 9 — эксплуатационный затвор (шпнт); 10 — паз эксплуатационных шандор; 11 — паз шандор на период строительства; 12 — порталный кран; 13 — двухпутный железнодорожный мост; 14 — шоссеый мост; 15 — плиты; 16 — бык плотины (основание плотины песчаное).

скаемого удельного расхода воды на 1 пог. м ширины рисбермы.

За последние 10...15 лет в отечественной гидротехнической практике замечается тенденция к увеличению удельных расходов на рисберме. Это позволяет существенно сократить длину фронта бетонной плотины, заменив ее на соответствующем участке более дешевой земляной плотиной. В результате больших научно-исследовательских и конструкторских работ, которые продолжают и в настоящее время, оказалось возможным для отдельных видов грунтов увеличить удельные расходы на рисберме в 1,25...2 раза. Увеличение удельных расходов на рисберме одной из строящихся в настоящее время гЭС, произведенное при пересмотре ее старого проекта 1937 г., позволило сэкономить примерно 1 млн. м³ бетона.

Пропускная способность плотины с поверхностным водосливом лимитируется высотой слоя переливающейся воды на гребне водослива. В настоящее время допустимой считается высота, не превышающая 10,5...11 м.

Водосливная плотина оборудуется плоскими колесными щитами или сегментными затворами.

Плоские щиты современных конструкций имеют консольные катки, что позволяет сделать более узкими пазы, в которых перемещаются щиты, и, следовательно, уменьшить ширину плотины. Намечившаяся в настоящее время тенденция применения скользящих щитов с использованием древопластики и нержавеющей стали приведет к еще большему упрощению конструкции щитов и уплотняющих устройств, а также к уменьшению глубины пазов.

Перед основными щитами со стороны верхнего бьефа размещаются пазы шандор (щиты, состоящие из отдельных, порознь устанавливаемых звеньев), которые позволяют производить ремонт основных щитов.

Для предотвращения обмерзания затворов и давления на них льда в верхнем бьефе иногда устраивается полынья. Вдоль затворов на достаточной глубине прокладывается воздухопровод с отверстиями, через которые вытекает воздух. Поднимаясь вверх, он увлекает за собой нижние теплые слои воды. Это явление и постоянное легкое бурление воды на поверхности не позволяют образовываться ледяной корке.

Чтобы иметь возможность манипулировать затворами в холодное осеннее или весеннее время, их обогревают в местах соприкосновения с быками и гребнем водослива. В зависимости от типа затворов обогрев бывает электрический или масляный.

Манипуляции затворами осуществляются с помощью порталных кранов, устанавливаемых на плотине. Грузоподъемность каждого крана достигает 200...300 т. Длина пролета затворов выбирается в пределах 12...25 м. Для подъема таких затворов порталные краны спариваются. Сами краны сцепляются механически, а электродвигатели ходовых частей, грузоподъемных лебедок и крановых тележек синхронизируются

путем применения так называемого электрического вала. Управление спаренными кранами производится из кабины одного из них.

При протяженности плотины, превышающей 1 км, и большой мощности, потребляемой кранами, некоторую сложность представляет подвод к ним электроэнергии. Этот вопрос в настоящее время разрабатывается и, несомненно, будет решен путем применения напряжения 6 или 10 кВ.

Число кранов выбирается в зависимости от длины плотины и общего числа затворов, скорости нарастания паводка, графика маневрирования затворами, задаваемого из условий гидравлического режима нижнего бьефа, выявленного на основании модельных испытаний в лаборатории.

Во время строительства земляной плотины бетонная водосливная плотина используется для пропуска строительных расходов реки. Для этой цели достаточно построить плиту всей или части плотины и ее быки. Водосливная часть плотины возводится потом под защитой шандор и щитов. Водослив наращивается поочередно в каждом пролете плотины. Темп возведения водослива согласовывается с темпом возведения земляной плотины. Такой метод строительства бетонной плотины называется методом «гребенки».

Возведение плотины методом «гребенки» должно исключать при любых обстоятельствах возможность перелива воды через гребень земляной плотины, так как это означало бы полное ее разрушение.

Земляная плотина. Главное преимущество земляной плотины заключается в том, что ее можно возводить на любых грунтах, широко используя при этом местные материалы. Подавляющее большинство современных земляных плотин сооружается способом намыва, позволяющим предельно механизировать производство работ и возводить плотины в русле реки без защитных перемычек. Кроме того, при этом способе отпадает необходимость в уплотнении грунта после укладки его в тело плотины.

За последнее время взгляд наших гидротехников на вопросы фильтрации воды через земляную плотину претерпел значительные изменения. Раньше полагали, что водонепроницаемость земляной плотины должна быть максимальной. В настоящее же время считается, что соответствующим подбором состава грунта, выбором такой величины фильтрации, которая безопасна для тела плотины и ее основания в отношении выноса частиц грунта фильтрационным потоком, можно найти такой профиль плотины, такую ее конструкцию, при которых получается наибольший технико-экономический эффект. При этом величина фильтрации обязательно должна быть минимально возможной.

Современный инженерный подход к выбору конструкции земляной плотины позволяет целесообразно уменьшить объем капиталовложений и значительно ускорить процесс ее возведения, а в отдельных случаях решить проблему использования местных грунтов для намыва плотины.

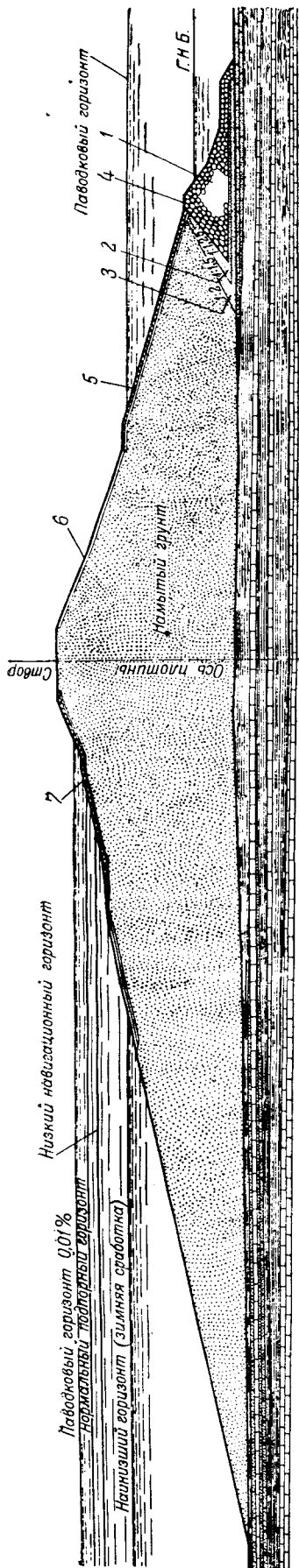


Рис. 2. Разрез по земляной плотине.

1 — наброска из рваного камня; 2 — галька или щебень; 3 — крупный песок с гравием; 4 — банкет; 5 — одностороннее мощение камнем 0,15 м; 6 — одерновка в клетку с залужением (0,20 м); 7 — двойное мощение камнем 0,50 м на слое гравия 0,20 м.

Отечественные намывные плотины выполняются преимущественно однородными (безядерными), имеющими одинаковый механический состав грунта (рис. 2), или с отощенным ядром, состоящим из мелкозернистых песков и пыли. Примесей глинистых грунтов, идущих в водонепроницаемое ядро, не требуется. Такая конструкция плотин позволяет иметь высокие темпы намыва, так как не требуется времени для отстоя глинистых частиц.

Плотины обычно намываются из песчаных или песчано-гравелистых грунтов различной крупности. В настоящее время ведутся опытные намывы из суглинистых грунтов.

Фильтрация воды через плотину неопасна для ее устойчивости, если она не сопровождается явлением суффозии, т. е. вымыванием частиц грунта из тела плотины. Борьба с этим опасным явлением ведется при помощи дренажей, не позволяющих кривой депрессии выйти на откос. Дренажи выполняются по принципу обратного фильтра, они состоят обычно из нескольких слоев зерен (фракций) грунта различной крупности. Эти слои расположены таким образом, что крупность зерен уменьшается в направлении, противоположном току фильтрационной воды.

Все эти достижения в области строительства земляных плотин стали возможны только после того, как были проделаны научно-исследовательские работы и получены практические данные из опыта отечественного гидротехнического строительства. При существующих способах изучения свойств грунтов возможно подобрать такой состав грунта в боковых призмах высоких плотин, который позволяет получить плотины обжатого профиля и благодаря этому значительно уменьшить объем земляных работ.

При намыве плотины в русло реки сначала отсыпается каменный банкет дренажной призмы в низовую часть плотины, затем сооружается обратный фильтр и после прекращения течения в образовавшийся тиховод производится намыв самого тела плотины.

В Советском Союзе имеется опыт намыва песчаных грунтов в плотину даже в зимнее время. Это удлиняет строительный сезон и уменьшает общий срок строительства.

Размеры профиля плотины зависят от физико-механических свойств намываемых грунтов и грунтов основания. Превышение гребня плотины над уровнем верхнего бьефа определяется высотой вкатывания возможной волны на откос. В ответственных плотинах оно должно быть не менее 3...5 м. Ширина гребня плотины выбирается, исходя из необходимости прокладки по нему железной и шоссейной дорог, а также из условия надежной работы плотины при всех возможных аварийных случаях.

Объем земляных плотин современных мощных гидроузлов на равнинных реках достигает 20...40 млн. м³. Опыт проектирования и строительства земляных плотин, накопленный советскими гидротехниками, позволяет возводить намывные плотины обжатого профиля высотой более 70 м в сейсмических условиях.

Судоходные шлюзы. На больших равнинных реках, особенно после возведения на них напорных сооружений и улучшения условий судоходства, имеет место большой грузооборот, измеряемый десятками миллионов тонн в год. Шлюзы используются сезонно, в течение навигационного периода, продолжительность которого составляет 160—200 дней в году. Но и в этот период их использование неравномерно. Поэтому в отдельные моменты условия работы шлюза бывают весьма напряженные. При выборе типа и конструкции шлюзов, а также способа управления ими руководствуются требованиями наибольшей надежности и безопасности судоходства.

По характеру грузооборота судоходные шлюзы можно разделить на две группы: 1) шлюзы с относительно малой разницей между грузопотоками, идущими вверх и вниз по течению реки; 2) шлюзы с преобладанием грузопотоков в одну сторону, обычно вниз по течению. Последнее соотношение грузопотоков характерно для лесосплавных рек. В техническом отношении эти две группы шлюзов выполняются по-разному.

Для обеспечения необходимой пропускной способности судоходные шлюзы в обоих случаях выполняются в виде двух параллельных ниток.

Шлюзы первой группы (рис. 3) при относительно более высоких напорах, как правило, сооружаются двухступенчатыми или трехступенчатыми. В отдельных случаях условия закрытия русла реки требуют сооружения одноступенчатого шлюза, который по сравнению с двухступенчатым представляет менее экономичное решение. Однако на это приходится идти, так как надежное и безопасное закрытие русла реки является основным и определяющим требованием при сооружении гидроузла на большой реке.

В последнее время в некоторых случаях принято устраивать между двумя ступенями шлюзов первой группы так называемый разъездной бьеф или промежуточный акваторий. Этим, по существу, создаются два отдельных последовательно расположенных шлюза, которые могут быть или одноступенчатыми, или один из них одноступенчатым, а другой — двухступенчатым.

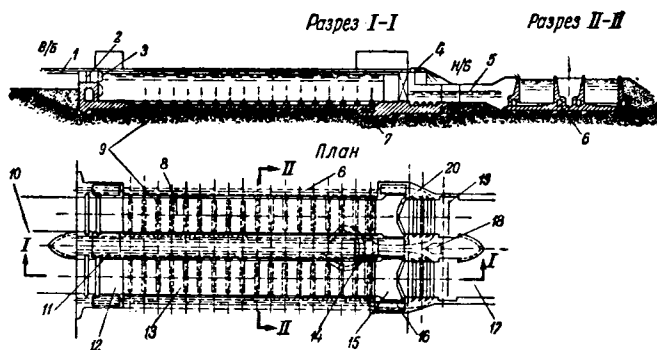


Рис. 3. Малоступенчатый шлюз.

1 — горизонт верхнего бьефа; 2 — ремонтный затвор; 3 — эксплуатационный затвор; 4 — мост; 5 — горизонт нижнего бьефа; 6 — продольные галереи наполнения и опорожнения камер; 7 — галереи перепускного устройства; 8 — камера левой нитки шлюза; 9 — донные галереи (выпуски); 10 — верховой подход; 11 — будка механизмов затворов; 12 — верхняя голова; 13 — камера правой нитки шлюза; 14 — перепускное устройство; 15 — нижняя голова; 16 — будка механизмов затворов и ворот; 17 — низовой подход; 18 — насосная (ремонтная); 19 — ремонтные ворота; 20 — ворота.

Создание промежуточного акватория вызывается топографическими условиями или желанием получить для стоянки судов бьеф, на котором не сказываются колебания горизонта воды, связанные с суточным регулированием и сбросом воды водохранилища в зимнее время. Однако устройство промежуточного акватория имеет и отрицательные стороны, заключающиеся в уменьшении пропускной способности шлюза и увеличении объемов бетонных работ и металлоконструкций.

Шлюз — тяжелое бетонное сооружение докового типа с массивной плитой и массивными боковыми стенками. Длина камеры шлюза достигает нескольких сот м, а ширина нескольких десятков м. Качественное основание для него имеет такое же значение, как и для бетонной плотины.

Большие скорости воды в подводящем канале шлюза недопустимы с точки зрения безопасности отстоя судов, ожидающих шлюзования. Поэтому забор воды при наполнении или сброс ее при опорожнении камер стремятся осуществлять помимо подводящих каналов шлюза.

Пропускная способность шлюза в значительной степени зависит от того, насколько быстро наполняются или опорожняются камеры. В то же время безопасность отстоя судов в камере требует, чтобы в ней были предельно уменьшены горизонтальные продольные течения и имели место в основном вертикальные. Наполнение и опорожнение камер через водоводы, размещенные в дне камеры или в ее стенках у дна, в наибольшей степени удовлетворяют обоим этим требованиям. Выходные отверстия водоводов размещены равномерно по всей площади камеры или длине ее стенок.

Для уменьшения сливной призмы воды при шлюзовании между двумя параллельными камерами одной ступени сооружаются перепускные устройства. Благодаря им при встречном шлюзовании половина сливной призмы камеры, шлюзующей вниз, используется в камере, шлюзующей вверх.

В качестве затворов верхней головы шлюза обычно применяются опускающиеся вниз щиты или затворы клапанного типа. Перемещение затворов вследствие их большой длины осуществляется с помощью двух лебедок, расположенных по обеим сторонам камер. Электродвигатели лебедок имеют между собой синхронную связь в виде электрического вала.

Затворы нижней головы, как правило, выполняются в виде двухстворчатых ворот. Каждая створка имеет свою лебедку.

Устройство наполнения и опорожнения камер, а также перепускное устройство имеют в качестве затворов плоские щиты. Наполнение и опорожнение камер происходит при переменном напоре. Скорость же изменения уровня воды в камере должна быть постоянной. Следовательно, высота открытия затворов должна изменяться таким образом, чтобы при большем напоре было меньшее открытие, а при меньшем напоре — большее.

Это можно осуществить несколькими способами: а) применением электродвигателей с глубокой регулировкой числа оборотов, т. е. электродвигателей постоянного тока по системе двигатель-генератор; б) использованием многоскоростных электродвигателей; в) ступенчатым открытием затворов без регулирования числа оборотов электродвигателей, которые в данном случае могут быть асинхронными.

Последний способ хотя и создает некоторую неравномерность изменения уровня воды в камере, но зато позволяет значительно упростить электрическую часть и, следовательно, повысить надежность эксплуатации.

Лебедки для механизмов этой группы шлюзов получаютс я тяжелыми, их грузоподъемность измеряется сотнями тонн.

Шлюзы второй группы (рис. 4) выполняются многоступенчатыми, без промежуточного акватория. Число их ступеней достигает 6. Общее время прохождения одного судна через многоступенчатый шлюз увеличивается, но зато значительно увеличивается количество одновременно шлюзующихся судов и, следовательно, пропускная способность шлюза, которая определяется временем шлюзования в первой камере. Это время тем меньше, чем меньше высота ступени. Последняя в многоступенчатых шлюзах не превышает 3...4 м, в то время как в двухступенчатых она равна 8...15 м.

Многоступенчатый шлюз в случае преобладания одностороннего грузооборота имеет ряд преимуществ. Прежде всего становится возможным применение береговой буксирной электровозной тяги, что позволяет уменьшить длину камеры в связи с тем, что при шлюзовании плотов отпадает необходимость в теплоходе-буксире, исклнчить возвратные шлюзования буксиров, увеличить скорость движения барж и плотов по камерам шлюза и, наконец, снизить стоимость эксплуатации. Число механизмов остается то же, что и у шлюзов первой группы, или даже немного сокращается, грузоподъемность же их уменьшается против шлюзов первой группы примерно в 6...7 раз.

Небольшая высота ступени позволяет перейти к более легким конструкциям камер и индустриализовать способ их возведения путем применения сборных железобетонных конструкций или металлического шпунта. Объем бетонных и земляных работ при строительстве многоступенчатого шлюза часто меньше, чем при строительстве малоступенчатого, так как позволяет выгодно использовать топографические условия места расположения шлюза. Расход воды на шлюзование минимальный.

Недостатки многоступенчатых шлюзов заключаются в том, что изменение направления шлюзования в какой-либо из ниток шлюза занимает много времени (около 1,5 час); при неисправностях в последней задерживается шлюзование не одного плота или баржи, а трех, и, наконец, большая протяженность шлюза требует удлиненных кабельных коммуникаций.

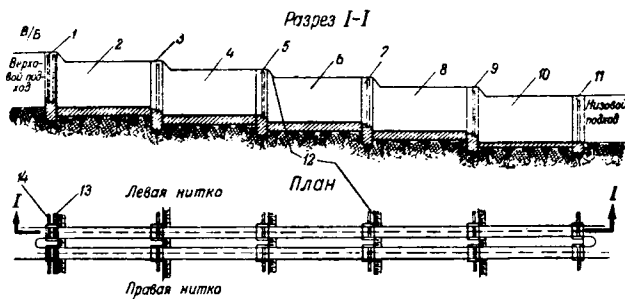


Рис. 4. Многоступенчатый шлюз (масштаб высотный больше масштаба в плане).

1 — 1-я голова; 2 — 1-я камера; 3 — 2-я голова; 4 — 2-я камера; 5 — 3-я голова; 6 — 3-я камера; 7 — 4-я голова; 8 — 4-я камера; 9 — 5-я голова; 10 — 5-я камера; 11 — 6-я голова; 12 — пандус; 13 — шкаф для откатных ворот; 14 — шкаф для аварийных ворот.

В качестве затворов на шлюзах второй группы применяются однополотные откатные ворота, которые убираются в шкаф, расположенный с внешней стороны камер. При малых напорах для наполнения и опорожнения камер используются клинкеты, встроенные в ворота шлюза. Перемещение затворов ворот и приведение в действие клинкетов последовательно производятся одной и той же лебедкой грузоподъемностью 40...50 т.

Баржи и плоты проводятся через камеры тремя электровозами, из которых два передние перемещаются по разным сторонам камер и являются ведущими и один задний — тормозной. Переход электровозов с одной ступени шлюза на другую происходит по относительно коротким пандусам, без применения кремальеры. Перемещение электровозов с одной нитки шлюзов на другую или с одной камеры на другую осуществляется с помощью крановой тележки, передвигающейся внутри пролетного строения, пересекающего шлюз железнодорожного или шоссейного моста.

Управление механизмами шлюзов первой и второй групп автоматизировано и сосредоточено на центральном посту управления, где с помощью индикаторов отображается положение всех затворов и уровней воды. Там же фиксируется положение электровозов на путях и сосредоточено управление навигационной сигнализацией (светофоры). Помимо центрального управления на каждой голове шлюза имеется местное управление.

Расположение судоходного шлюза в створе напорных сооружений гидроузла должно быть таким, чтобы при сбросе паводковых расходов через плотину и при работе гидроэлектростанции исключалась возможность возникновения больших скоростей в подходных каналах шлюза и заноса последних отложениями. С этой целью водосбросные устройства и подходные каналы стремятся удалить друг от друга, а в отдельных случаях строят специальные защитные сооружения (дамбы и т. п.).

Для получения необходимого подмостового судоходного габарита мосты в одноступенчатых шлюзах, как правило, размещаются на нижней голове, в двухступенчатых — на средней или нижней и в многоступенчатых — на одной из средних.

В целях уменьшения капиталовложений в бетонную водосливную плотину заслуживает внимания предложение об использовании шлюза для сброса катастрофических паводков. Возможность такого использования вытекает из того, что при катастрофическом паводке судоходство прекращается.

Рыбоходы и рыбоподъемники. Напорные сооружения препятствуют перемещению рыб вверх и вниз по течению реки, а образование водохранилища может в корне изменить условия их жизни.

В связи с этим рыбному хозяйству может быть нанесен серьезный ущерб. Вопрос о возмещении этого ущерба должен решаться при возведении гидроузла.

Мероприятия по компенсации ущерба можно разделить на две группы: 1) мероприятия, которые осуществляются самим рыбным хозяйством, путем искусственного разведения рыб и т. п.; 2) мероприятия, которые осуществляются при строительстве гидроузла и которые должны обеспечить пути миграции рыб через напорные сооружения. Для этой цели в составе сооружений создаются специальные рыбопропускные устройства — рыбоходы или рыбоподъемники.

Рыбоходы выполняются в виде лотков или ступенчатых лестниц, на которых создается поток воды из верхнего бьефа в нижний. Скорость этого потока такова, что рыба получает возможность взобраться из нижнего бьефа в верхний и, наоборот, скатиться в нижний бьеф.

Рыбоподъемники могут устраиваться в виде периодически действующих автоматических шлюзов наподобие судоходных. В камере такого шлюза имеется передвигающийся вверх и вниз решетчатый пол, понуждающий рыб в зависимости от направления их хода двигаться вверх или вниз. Шлюз выполняется одноступенчатым с использованием плоских щитов. Другим видом рыбоподъемников являются автоматически действующие водяные клетки и сетки. Первые относятся к мокрым рыбоподъемникам, так как рыбы, перемещаясь в них, находятся в воде. Вторые же относятся к сухим рыбоподъемникам.

Чтобы заманить и направить рыб к рыбоходам и рыбоподъемникам создаются искусственные потоки воды, а также ограждающие и направляющие устройства в виде сетей, решеток и электрических заградителей. Большую роль в этом отношении играет также освещение рыбопропускных устройств.

Здание гидроэлектростанции. На равнинных реках строятся гидроэлектростанции руслового типа. Здания таких гидроэлектростанций находятся в створе напорных сооружений гидроузла и воспринимают действующий напор.

В настоящее время нашей отечественной практикой проектирования доказана технико-экономическая целесообразность использования бетонного здания гидроэлектростанции для пропуска паводковых расходов с той же интенсивностью, какая принята для водосливных бетонных плотин. Это означает, что в конструкции здания гидроэлектростанции должны быть преду-

смотрены водосбросные устройства. Такой тип здания гэс получил название совмещенного.

Удельный расход на рисберме здания гэс совмещенного типа должен определяться, исходя из тех же условий, что и для бетонных водосливных плотин. При одинаковых расходах на рисберме пропускная способность водосбросных устройств здания гэс должна быть меньшей, если турбины имеют больший диаметр рабочего колеса, и наоборот. Это объясняется тем, что через турбину с большим диаметром идет больший расход воды.

Стоимость здания гэс совмещенного типа выше стоимости здания не совмещенного типа. Однако применение его приводит к уменьшению капиталовложений по гидроузлу в целом за счет сокращения протяженности бетонных сооружений и замены их на соответствующем участке более дешевой земляной плотиной.

Применение зданий гэс совмещенного типа должно сопровождаться увеличением числа агрегатов, т. е. выбором более мелких агрегатов, чем это диктуется энергетическими соображениями. Многоагрегатность допустима лишь в тех случаях, когда по геологическим условиям основание здания должно иметь неглубокое заложение или когда мощность агрегата ограничивается его предельно-возможными габаритами.

При больших паводках поднимается горизонт нижнего бьефа и значительно снижаются действующий напор и мощность станции. Преимущество здания гэс совмещенного типа заключается в том, что вследствие эжекционного эффекта, создаваемого сбросом паводковых расходов, напор полностью или частично восстанавливается, а следовательно, восстанавливается мощность станции и увеличивается выработка электроэнергии.

Наша отечественная практика гидроэнергетического строительства в деле создания гидроэлектростанций совмещенного типа шла своими оригинальными, независимыми от зарубежной практики путями. В этой области у нас в СССР проделана большая конструкторская и исследовательская работа. Современное состояние этого вопроса таково, что для всех встречающихся на практике гидроэнергетических русловых узлов можно подобрать целесообразный в технико-экономическом отношении вариант конструкции здания гэс совмещенного типа. Рассмотрим кратко некоторые из этих вариантов.

Вариант А. В этом варианте водоводы, предназначенные для пропуска паводковых вод, охватывают вертикальную часть всасывающей трубы (рис. 5). Забор воды в водоводы производится ниже входного отверстия спиральной камеры, а выброс ее — выше выходного отверстия всасывающей трубы. Водоводы имеют затворы со стороны верхнего и нижнего бьефов. Первые служат для заполнения водовода, а вторые — для регулирования расхода при сбросе паводка. Использовать для регулирования расхода затворы верхнего бьефа нецелесообразно, так как истечение воды из-под щитов при их частичном открытии может создать недопустимый гидравлический режим в длинных водоводах.

Компоновка здания гЭС, представленная на рис. 5, имеет ряд преимуществ. Донное расположение водоводов благоприятно для пропуска строительных расходов при низких отметках горизонта воды. Большие скорости воды в водоводах, связанные с низким расположением забора воды в них, позволяют осуществлять смыв мусора и топляков, скапливающихся перед решетками турбины. Выброс воды поверх выходного отверстия всасывающей трубы создает хорошие условия для получения эжекционного эффекта.

К недостаткам этой компоновки следует отнести прежде всего сложность формы водоводов, что затрудняет их строительство. Донное расположение водоводов не позволяет сбрасывать через них плавающие тела и лед. Размещение водоводов, принятое в данном варианте, требует значительного увеличения вертикальной части всасывающей трубы или перехода на несимметричные, сильно развитые вверх спиральные камеры. В первом случае придется излишне заглубить подошву здания гЭС и, следовательно, увеличить капиталовложения. Во втором — расположить сервомоторы направляющего аппарата турбины выше плоскости его поворотного кольца и ввести тяжелый промежуточный вал для связи с последним. При этом удлинится основная вал агрегата, что, несомненно, ухудшит конструкцию агрегата и увеличит его стоимость. В отдельных случаях удается удовлетворительно разместить водоводы путем применения обоих мероприятий.

Вариант Б. Этот вариант (рис. 6) отличается от предыдущего более высоким расположением водоводов, которые в данном случае охватывают турбинную шахту под генератором.

Такое расположение водоводов требует плоского потолка спи-

ральной камеры с обычным размещением сервомоторов направляющего аппарата турбины. Но при этом удлинится вал агрегата и вводится дополнительная промежуточная крестовина, что усложняет конструкцию машины.

Водоводы работают, как напорные. Строительные расходы через них можно пропустить только при высоких отметках верхнего бьефа. При низких же отметках это можно сделать только через спиральную камеру и всасывающую трубу при недостроенном конусе статора турбины.

При этом варианте исключается применение быстропадющих щитов, с помощью которых прекращается поступление воды в турбину в аварийных случаях. Опускание и подъем переносного щита всегда связаны с временным прекращением поступления воды в водоводы.

Разновидностью этого варианта следует считать поверхностные водосбросы, применяемые вместо водоводов при малых паводковых расходах. Это упрощает строительную конструкцию, устраняет необходимость в щите со стороны нижнего бьефа и позволяет сбрасывать плавающие тела и лед.

Иногда для увеличения живого сечения водоводов бетонную турбинную шахту в том месте, где она охватывается водоводом, заменяют полным съемным металлическим быком, внутри которого пропускается вал агрегата. Шахта турбины в дне водовода и отверстие в его потолке под генератором закрываются съемными крышками. В данной разновидности упрощается форма водовода, но зато усложняются металлические конструкции и условия эксплуатации.

Вариант В. Как видно из рис. 7, при этом варианте гидроагрегат полностью размещается в теле водослива. Сверху он прикрыт съемной металлической крышкой.

Условия эксплуатации при данной компоновке мало чем отличаются от таковых при общепринятой

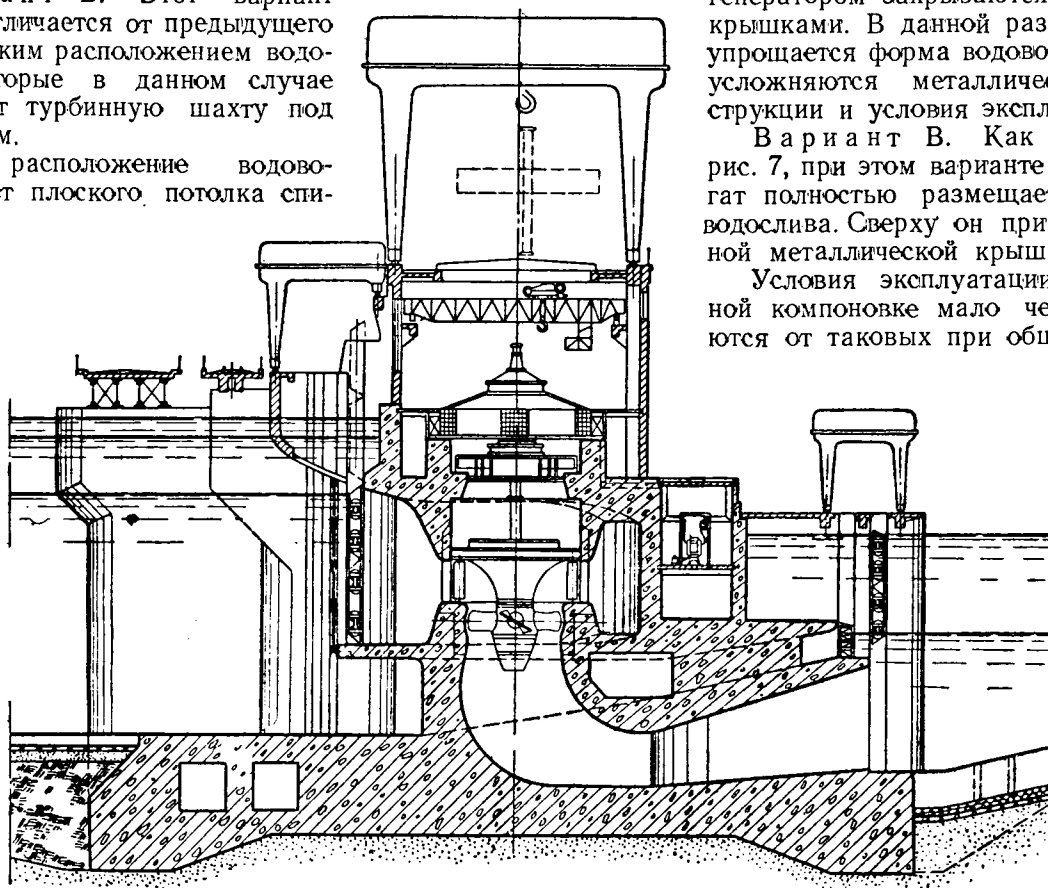


Рис. 5.

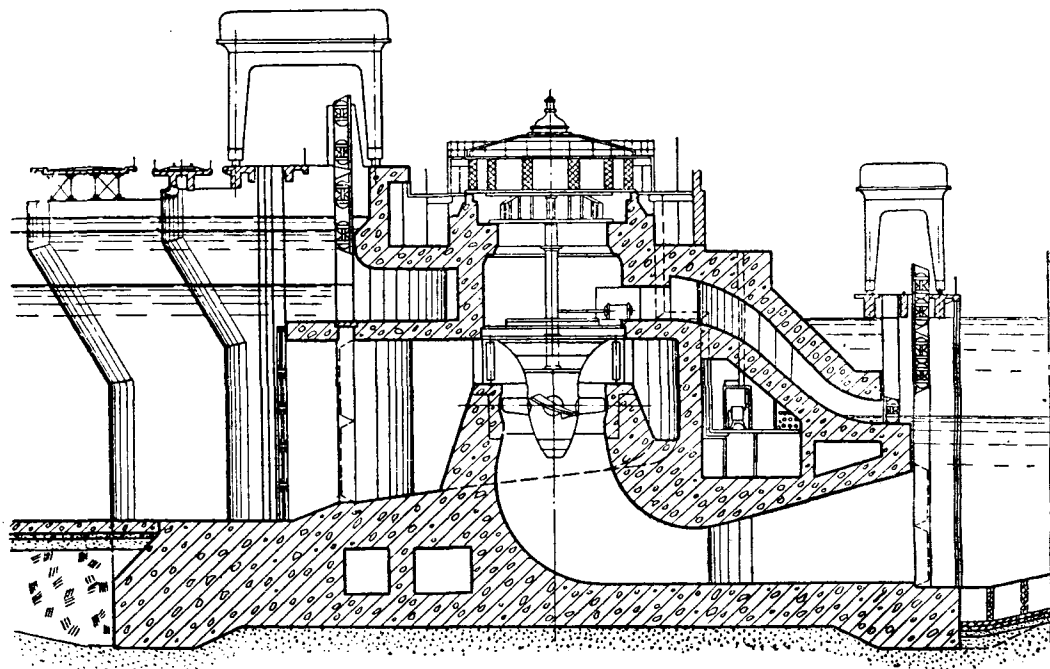


Рис. 6.

конструкции здания гЭС. Только на непродолжительное время паводка станция становится в условия подводного сооружения.

Вариант В возможен при определенных сочетаниях величины напора, размеров агрегатов и высоты переливающегося через водослив слоя воды. Возможность его осуществления зависит также от того, каковы геологические условия и насколько глубоко в связи с этим залегает подошва гЭС.

Вспомогательное оборудование агрегата размещается в приагрегатном зале под массивной плитой водослива. Для повышения безопасности гидроэлектростанция делится на отдельные блоки, в каждом из которых устанавливается по несколько агрегатов, изолированных в нижней своей части друг от друга. Все коммуникации и ходы сообщения прокладываются в теле быка. Сообщение вдоль всей станции может быть осуществлено в помещениях, расположенных над водосливом.

Ввиду того, что металлическая крышка открывается редко, она может быть приварена. Для использования крана при подъеме ротора генератора в крышке устраивается люк. Верхние узлы генератора после их снятия могут быть помещены в пространство под быками. Отсюда через шахты отдельные узлы и детали агрегата могут транспортироваться в мастерские.

В строительном отношении эта конструкция несколько проще предыдущих. Число затворов при варианте В меньше, чем при вариантах А и Б.

При больших напорах кран для обслуживания агрегатов может быть расположен также под водосливом.

При невозможности вписать под водослив машинный зал нормальной высоты устраивают машинный зал пониженной высоты. Но при этом возникает затруднение в отношении транспорти-

ровки деталей мимо собранных агрегатов на монтажную площадку. В одних случаях выход из этого затруднения находят в расширении машинного зала, что, однако, удлиняет порог водослива и, следовательно, вредно отражается на его пропускной способности. В других случаях ширину машинного зала принимают нормальной и отказываются от транспортировки деталей вдоль станции, монтажные же площадки располагают между каждыми двумя агрегатами². В водосливе над монтажной площадкой устраивается отверстие со съемной крышкой для подачи через него деталей агрегата.

Под монтажной площадкой размещается донный водовод большой пропускной способности. За счет его можно уменьшить расход на поверхностном водосливе и поднять его порог. Чередование донных водоводов с турбинами позволяет сделать более равномерными удельные расходы на водобое и рисберме.

Приведенные примеры указывают на большие возможности создания оптимального варианта компоновки здания гЭС совмещенного типа применительно к конкретным условиям створа гидроэлектростанции. Решающим условием при выборе того или иного варианта будет действующий напор.

В общепринятой компоновке здания гидроэлектростанции на его конструкцию в основном влияли размеры проточной части турбины (спиральная камера и всасывающая труба) и в незначительной мере вертикальные габариты гидроагрегата. В здании гидроэлектростанции совмещенного типа гидроагрегат органически связан со всей компоновкой гЭС. Его высотные габариты играют главную роль при решении кон-

² Такое решение возможно, если в фронте бетонных сооружений имеются водосливы, не занятые агрегатами.

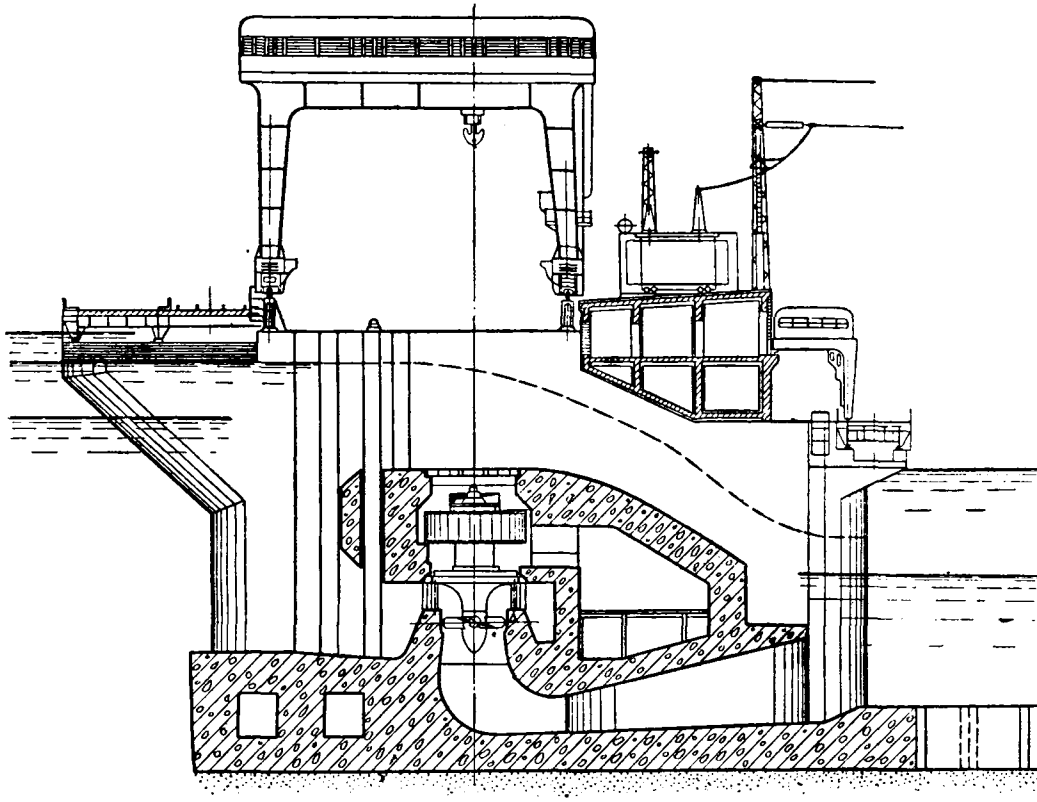


Рис. 7.

структивных задач. Поэтому машиностроителям пришлось пересмотреть конструктивные схемы гидроагрегатов в направлении их рационализации, комплексного сочетания конструкции турбины и гидрогенератора и уменьшения высотных габаритов. В результате проделанной работы удалось значительно уменьшить высоту гидроагрегата. Если в прежних конструкциях отношение высоты агрегата (от обтекателя турбины до верхней точки гидрогенератора) к диаметру рабочего колеса турбины составляло 3,5... 4,2, то в новых оно равно 2,6... 2,7 (рис. 8). При этом длина вала агрегата уменьшилась более чем вдвое, значительно снизилась металлоемкость машины и ее стоимость.

Внутренние габариты гидроагрегата обеспечивают доступ персонала ко всем тем деталям и узлам, которые сравнительно быстро изнашиваются или могут быть повреждены. В современных гидроагрегатах этим деталям и узлам придана такая конструкция, которая позволяет производить их замену, ремонт и осмотр без полной разборки агрегата и нарушения оси вала. Таким образом, при профилактическом осмотре, текущем и капитальном ремонте отпадает необходимость в пользовании тяжелыми грузоподъемными средствами. Промежуток времени от одной полной разборки агрегата до другой увеличивается до 20... 30 лет, что значительно повышает надежность работы машин и сокращает время, необходимое для осмотров и ремонтов.

В настоящее время конструкторская мысль работает также в направлении применения агрегатов с горизонтальной осью, которые имеют ряд

существенных преимуществ перед вертикальными. Горизонтальные агрегаты с прямоосной всасывающей трубой имеют более высокий к. п. д. и большую пропускную способность турбины. Горизонтальное положение агрегата позволяет значительно поднять подошву основания станции и упростить ее строительную часть.

Опыт эксплуатации гидроэлектростанций показывает, что в период проведения ремонтов оборудования общий машинный зал создает некоторые удобства. Зато в другое время он усложняет эксплуатацию, удорожает ее и, кроме того, увеличивает объем капиталовложений. В то же время в результате перехода к сниженному залу или к расположению гидрогенераторов в отдельных ячейках можно создать такие условия, при которых качество ремонтных работ не будет

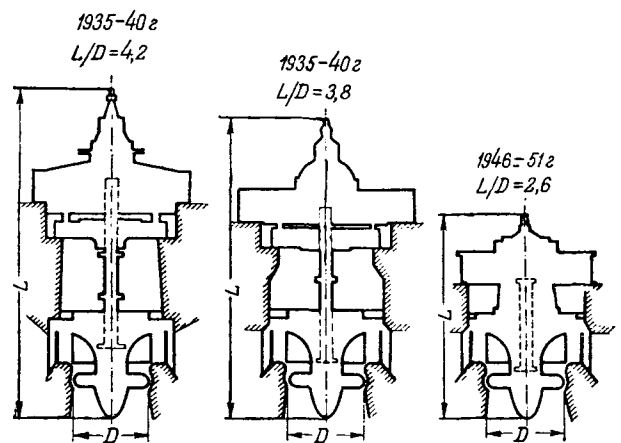


Рис. 8.

сколько-нибудь снижено. Таким образом, в настоящее время компоновку гЭС с расположением гидротехнических сооружений в отдельных камерах или с машинным залом сниженной высоты следует считать наилучшей. В обоих случаях тяжелые краны размещаются снаружи и обслуживают агрегаты через съемные крышки, расположенные над каждым из них.

Общий машинный зал становится целесообразным при малом количестве агрегатов или в случае, когда необходимость в высоких наружных стенах машинного зала определяется условиями компоновки гидротехнических сооружений (большие колебания нижнего бьефа и глубокое расположение агрегата).

При всех компоновках гидроэлектростанций возникает вопрос об отказе от применения быстропадающих щитов, преграждающих доступ в турбину в случае аварийного отказа направляющего аппарата. Постановка этого вопроса вызывается громоздкостью, большим весом щитов и сложностью достижения быстродействия, а также тем, что эти щиты используются крайне редко. Однако отказаться от них, не снабдив турбину недорогим устройством, исключающим при всех обстоятельствах разгонное число оборотов, нельзя. Это приведет к тому, что при проектировании генераторов и их подпятников придется разгонное число оборотов принимать за нормальное и, следовательно, идти на чрезмерное удорожание агрегата. Таким образом, разрешение вопроса об отказе от быстропадающих щитов находится в зависимости от создания недорогого, но надежного устройства, исключающего при всех обстоятельствах разгонное число оборотов.

При отказе от быстропадающих щитов должна быть предусмотрена возможность установки со стороны верхнего бьефа переносного щита (одного на несколько агрегатов), опускаемого в текущую воду.

При проектировании гидроэлектростанций совмещенного типа, в особенности на лесосплавных реках, приходится уделять чрезвычайно большое внимание борьбе с засорением решеток турбин. Объем мусора и топляков, остающихся на решетках, достигает десятков тысяч кубических метров в год. Топляки и мусор подходят к гидроэлектростанции главным образом в паводковый период.

При зданиях гЭС совмещенного типа засорение решеток будет большее, чем у гЭС общепринятой конструкции, так как через бетонное здание гЭС будет проходить большая часть паводковых расходов и скорости воды при подходе к зданию гЭС будут сравнительно больше.

Производство строительного-монтажных работ. Современные строительные-монтажные работы отличаются высокой степенью механизации. В широком масштабе применяются сборные конструкции. Арматура в блоки бетонирования подается в виде армоферм, изготовленных на арматурном дворе. Вместо деревянной опалубки применяются железобетонные оболочки, монтируемые вместе с армофермами. Для повышения качества укладки бетона используются различные виды вибраторов. Транспорт бетона к месту укладки полностью механизирован.

Приготовление бетона ведется на заводе большой производительности, достигающей 6...10 тыс. м³ в сутки. Дозировка материалов на этих заводах полностью автоматизирована. Все механизмы завода имеют технологические блокировки и дистанционное управление, выведенное на посты управления отделений завода. Завод оборудован специальной технологической сигнализацией. Подготовка инертных для завода, их транспорт и транспорт цемента полностью механизированы. В настоящее время начинает применяться непрерывное приготовление бетона, более совершенное, чем порционное в бетономешалках.

Металлический шпунт в современных конструкциях гидротехнических сооружений и при современном производстве строительных работ получает большое применение. Его забивка производится электровибраторами, что значительно ускоряет и улучшает этот процесс.

Для выемки земли применяются в зависимости от местных условий экскаваторы с емкостью ковша до 14 м³ и мощные пловучие землеройные снаряды, ведущие разработку грунта гидравлическим способом. Производительность таких снарядов достигает 10...12 тыс. м³ пульпы или 1,0...1,2 тыс. м³ грунта в час. Мощность, потребляемая таким снарядом, достигает 5...7 тыс. квт.

Землеройными снарядами производится качественный намыв плотин, дамб и земляных перемычек, сооружаемых в строительный период, а также разработка котлованов под здание гЭС, плотину и шлюз. Способом гидромеханизации добывается гравий, песок и осуществляется их сортировка по фракциям.

Общую энерговооруженность современного строительства большой гидроэлектростанции можно характеризовать величиной мощности, потребляемой электрическими установками, которая достигает 25...90 тыс. квт. Эта величина в среднем равна 5% установленной мощности строящейся гидроэлектростанции. Установленная мощность всех электрических установок строительства достигает примерно 7...8%, а с учетом всех неэлектрических двигателей (транспорт и т. п.) — 12...15% мощности строящейся гЭС.

(Окончание статьи см. в следующем номере)

[24. 10. 1951.]



Четырехфазная схема электропередачи с трехфазными трансформаторами

Кандидат техн. наук В. В. АНДРЕЕВ

Ленинград

Система электропередачи два провода — земля (ДПЗ) обладает существенным недостатком — наличием тока в земле. В связи с этим она применяется главным образом для сравнительно небольших напряжений сельскохозяйственных линий.

Предложенная нами четырехфазная схема электропередачи может рассматриваться как удвоенная система ДПЗ. Будучи симметричной относительно земли, она не имеет указанного недостатка, свойственного системе ДПЗ. Кроме того, по сравнению с обычной, трехфазной, трехпроводной линией она дает снижение затрат металла проводов или потерь энергии более чем вдвое.

Четырехфазная схема требует четного числа одинаковых трансформаторов на каждом конце электропередачи и линии из четырех проводов. Каждые два трансформатора связаны друг с другом и участвуют в работе как единое целое. Трансформаторы должны быть рассчитаны на работу с незаземленной нейтралью, т. е. изолированы на полное линейное напряжение.

Схема включения трансформаторов на одном конце электропередачи показана на рис. 1; на другом конце она совершенно одинакова. Ввиду различия групп соединений трансформаторов на 180° две их фазы оказываются соединенными последовательно, их э. д. с. складываются.

Из векторной диаграммы (рис. 2) можно видеть, что, если вторичное фазное напряжение трансформаторов равно $U_{\text{фТ}}$, то между проводами линии попарно действуют три различных по величине линейных напряжения:

$$\left. \begin{aligned} U_{12} &= U_{34} = \sqrt{3} U_{\text{фТ}} = U_{\text{ЛТ}}, \\ U_{13} &= U_{24} = 3U_{\text{фТ}} = \sqrt{3} U_{\text{ЛТ}}, \\ U_{14} &= U_{23} = 2\sqrt{3} U_{\text{фТ}} = 2U_{\text{ЛТ}}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Предлагается четырехфазная схема электропередачи с трехфазными трансформаторами. Доказывается, что применение этой схемы дает экономию металла проводов и снижение потерь энергии. Приводятся недостатки схемы и даются предложения по их преодолению. Схема рекомендуется автором для линий, имеющих напряжения 35 кв и ниже.

В связи с наличием общей для обоих трансформаторов точки заземления фазное напряжение линии равно линейному напряжению трансформатора.

По линии протекают токи только двух фаз каждого трансформатора. Токи же третьих фаз протекают в обмотках трансформаторов, не требуют для себя линейного провода и, следовательно, не вызывают потерь в линии. Этим и объясняются экономические преимущества схемы.

В линии имеют место несимметричные четырехфазные системы напряжений и токов. Но несмотря на это, в трансформаторах отправного и приемного концов, а следовательно, в питающих и в нагрузочных цепях будут создаваться симметричные трехфазные системы напряжений и токов, если в первом приближении не считаться с сопротивлениями проводов линии.

Рассмотрим более подробно преимущества предлагаемой схемы. Требуется передать мощность S на расстояние l по обычной трехфазной

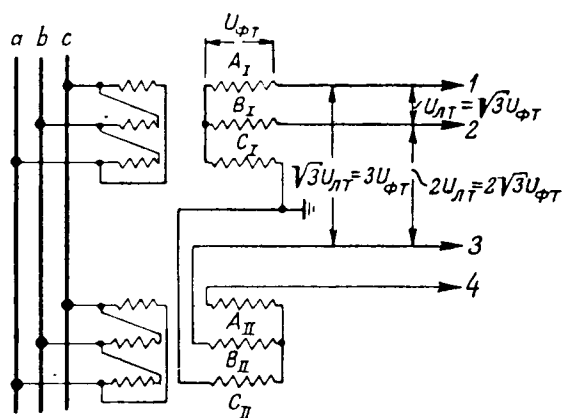


Рис. 1. Принципиальная схема четырехфазной электропередачи с трехфазными трансформаторами.

линии напряжением $U_{ЛГ}$. Сечение проводов предполагается равным q_3 , а активное сопротивление каждого из них — R_3 . Объем металла проводов составит при этом

$$V_3 = 3q_3l, \quad (2)$$

а потери активной мощности в линии

$$\Delta P_3 = \left(\frac{S}{U_{ЛГ}}\right)^2 R_3. \quad (3)$$

При четырехфазной системе с сечением проводов q_4 объем их

$$V_4 = 4q_4l, \quad (4)$$

а потери активной мощности

$$\Delta P_4 = \frac{1}{3} \left(\frac{S}{U_{ЛГ}}\right)^2 R_4. \quad (5)$$

Рис. 2. Диаграмма напряжений четырехфазной схемы.

Заметим, что $R_3 : R_4 = q_4 : q_3 = 3V_4 : 4V_3$. Тогда отношение потерь при четырехфазной схеме к потерям при обычной трехфазной схеме

$$\frac{\Delta P_4}{\Delta P_3} = \frac{4}{9} \frac{V_3}{V_4}. \quad (6)$$

Если при переходе от обычной трехфазной схемы к четырехфазной снижение потерь в линии $\delta \Delta P\% = 100 \left(1 - \frac{\Delta P_4}{\Delta P_3}\right)$, а снижение затрат металла $\delta V\% = 100 \left(1 - \frac{V_4}{V_3}\right)$, то из (6) получим следующее выражение:

$$\delta \Delta P\% + \delta V\% - \frac{\delta \Delta P\% \cdot \delta V\%}{100\%} = 55,6\%. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что если одну из величин (потери или объем металла) принять неизменной, то другая может быть снижена на 55,6%. При сохранении неизменной плотности тока в проводах, т. е. уменьшении их сечения вдвое и, следовательно, снижении затрат металла на 33,3%, потери также снизятся на 33,3%.

По сравнению с трехфазной двухцепной линией четырехфазная линия позволяет сверх того сэкономить 33,3% стоимости изоляторов и аппаратуры, а также несколько облегчить конструкцию опор.

Осуществление четырехфазной электропередачи напряжением 2×35 кВ позволяет в ряде случаев отказаться от электропередачи 110 кВ, требующей более дефицитного оборудования. С другой стороны, четырехфазная электропередача при использовании особой схемы отключения элементов по надежности и бесперебойности не уступает трехфазной двухцепной электропередаче 35 кВ.

Четырехфазная схема имеет и ряд недостатков. Наличие сопротивлений проводов линии только в двух фазах искажает симметрию токов и напряжений на стороне низкого напряжения. Для электропередач напряжением до 35 кВ это

искажение вряд ли будет иметь большое значение. Но и оно может быть частично преодолено путем установки трансформаторов с различными коэффициентами трансформации на разных фазах. Существенную помощь может оказать применение продольной емкостной компенсации индуктивности линии или, наоборот, включение между одноименными фазами трансформаторов реактора, заменяющего индуктивность линии, но имеющего в сравнении с линией значительно меньшие потери.

Следует также указать на повышение напряжения между фазами и относительно земли при переходе к четырехфазной схеме, что утяжеляет условия работы изоляции и может вызвать коронирование. Но как то, так и другое не опасно для линий напряжением 35 кВ и ниже обрабатываемых при переходе на четырехфазную схему в линии 2×35 кВ и ниже. Эти линии имеют достаточные запасы и по электрической прочности, и по коронуопорности.

Предлагаемая четырехфазная система представляет интерес и для линий 110 кВ, если учесть опыт работы таких линий с изолированной нейтралью. Следует ожидать, что трансформаторы 110 кВ с изолированной нейтралью окажутся дешевле трансформаторов 220 кВ при глухом заземлении нейтрали. В целях же устранения коронирования следует так располагать провода на опоре, чтобы наибольшие линейные напряжения приходились между наиболее удаленными из них.

Надежность предложенной схемы без дополнительных мероприятий, очевидно, такая же, как и надежность двухцепной линии, работающей по схеме ДПЗ с двумя трансформаторами на каждом конце. Ряд потребителей может вполне удовлетвориться такой степенью надежности.

Однако, обращая двухцепную трехфазную линию в одноцепную четырехфазную и связывая трансформаторы на концах в неразделимые па-

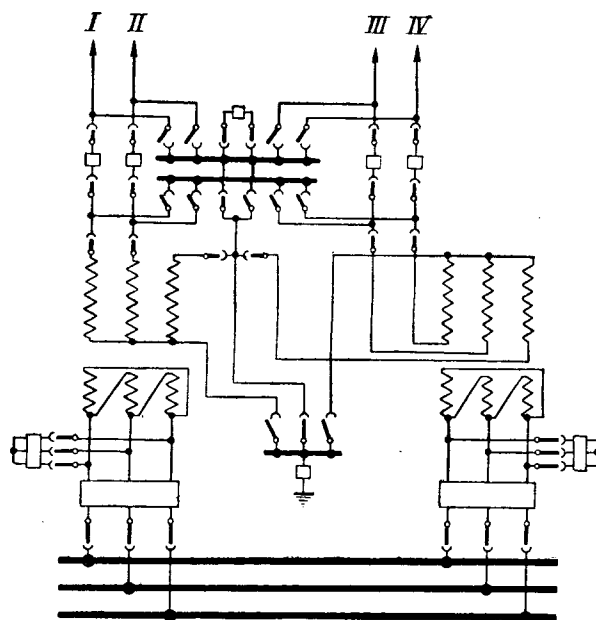


Рис. 3.

ры, мы снижаем число взаиморезервирующих элементов схемы и тем ослабляем ее надежность.

Для повышения надежности нужно дополнить четырехфазную схему такими устройствами, которые позволяли бы превращать ее в обычную трехфазную без перерыва энергоснабжения. Проще все это сделать путем дублирования каждого из линейных выключателей, что позволит любой из проводов линии включать к средней точке схемы. При этом потребуются лишь восемь фаз выключателей высокого напряжения.

Можно достигнуть той же цели и при пяти фазах выключателей, если применить схему, представленную на рис. 3. При этой схеме переход на трехфазный режим производится путем отключения и замыкания накоротко одного из трансформаторов пары только со стороны низкого напряжения. В результате трансформатор

превращается в реактор, временно включенный в цепь одной фазы и затем шунтируемый вручную посредством выключателей. При весьма многих видах повреждений трансформатор может быть кратковременно оставлен в таком режиме. Наибольшую трудность при этом будет представлять одновременное производство операций на обоих концах электропередачи. Если будет признано недопустимым, чтобы трансформатор на другом конце отключался под действием своей защиты, одновременность производства операций можно осуществить посредством передачи импульсов, например высокочастотных.

Приведенные выше соображения показывают целесообразность в ряде случаев замены обычной трехфазной двухцепной электропередачи напряжением 35 кВ и ниже четырехфазной линией.

[23.3.1951]



Четырехпроводная электропередача как средство повышения экономичности и надежности высоковольтных сетей

Инж. А. А. ФИЛЬШТИНСКИЙ

Теплоэлектропроект

Свыше 12% вырабатываемой электрической энергии бесполезно теряется в сетях при передаче ее от электростанций к потребителям. Потеря мощности составляет еще более внушительную величину, превышающую 16% всей установленной мощности генераторов электростанций [Л. 1].

Наиболее радикальным средством уменьшения потерь при передаче электроэнергии является переход на более высокие напряжения и более глубокий ввод высокого напряжения. Однако внедрение более высоких напряжений в действующие сети, несмотря на рост нагрузки сетей, происходит довольно медленно, так как это связано со сменой аппаратуры, изоляции, трансформаторов, а в ряде случаев и опор линий электропередачи.

При проектировании новых сетей более высокие напряжения в ряде случаев не могут быть приняты из-за большой стоимости оборудования и изоляции. Значительным препятствием для выбора напряжения необходимой величины яв-

Рассмотрена передача трехфазного тока по четырем проводам. Приведено сравнение удельных потерь и удельного расхода цветного металла для трехпроводных и четырехпроводных линий электропередачи. Обосновывается возможность экономичного применения стальных проводов в четырехпроводных линиях. Рассмотрена смешанная сеть с трехпроводными и четырехпроводными линиями. Приведена схема автоматического перевода четырехпроводных линий на симметричный трехпроводный режим.

ляется несовершенство действующей шкалы номинальных напряжений, в которой между 10 и 35 кВ и между 35 и 110 кВ отсутствуют промежуточные значения.

В свое время была предложена система электропередачи «два провода — земля» («ДПЗ») [Л. 2, 3], которая, несмотря на ее значительные экономические преимущества (экономия одной трети цветного металла и изоляции, а также части аппаратуры), не получила широкого распространения в промышленных сетях главным образом вследствие того, что сумма токов в ее воздушных проводах не равна нулю. С этим недостатком системы ДПЗ связано усиление отрицательного влияния линий электропередачи на устройства связи, железнодорожной блокировки и т. п.

Увеличивающийся темп сооружения высоковольтных сетей, возникновение новых мощных высоковольтных линий для питания разбросанных объектов ирригации, необходимость коренной реконструкции высоковольтных сетей ряда

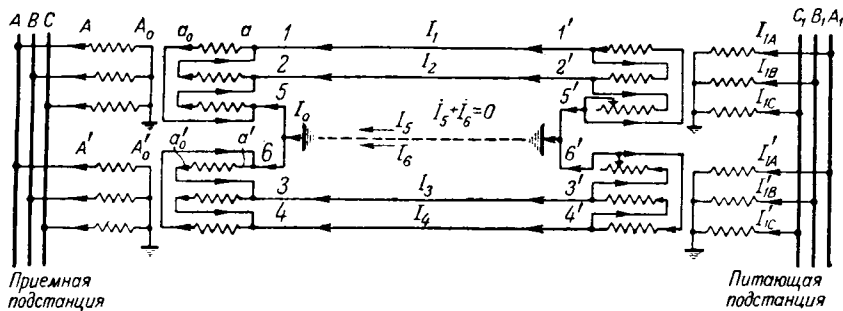


Рис. 1. Принципиальная схема четырехпроводной электропередачи.

энергообъединений, вызванная сооружением мощных гидроэлектростанций, — все это ставит перед проектными организациями задачу отыскания новых экономичных решений в области передачи электроэнергии.

Описываемая ниже система электропередачи дает возможность осуществить переход на более высокие напряжения без замены установленного оборудования. Сохраняя все преимущества системы ДПЗ, она лишена ее недостатков и может быть применена для реконструкции существующих сетей, а в ряде случаев и для сооружения новых сетей. Эта система в некоторой степени компенсирует отсутствие в шкале номинальных напряжений 20 и 60 кВ.

Идея описываемой схемы заключается в одновременном использовании двух систем ДПЗ, при этом два трансформатора соединены таким образом, что ток в земле равен нулю. В самом общем виде эта идея была высказана ранее. Однако преимущества и область возможного применения такой схемы выявлены не были.

Для осуществления требования о том, чтобы ток в земле был равен нулю, можно применить ряд схем соединения двух трансформаторов в зависимости от группы соединений их обмоток. Вопрос о применении одной из таких схем с соединенной в звезду линейной обмоткой каждого трансформатора был поставлен В. В. Андреевым¹.

Наличие в существующих сетях трансформаторов с соединенными в треугольник линейными обмотками, питающими сети 6 и 10 кВ, а в ряде энергосистем и сети 35 кВ, побудило автора рассмотреть схему четырехпроводной электропередачи для этих случаев.

Схема электропередачи. Один трансформатор каждой пары трехфазных трансформаторов имеет группу соединений звезда—треугольник II и другой — звезда — треугольник I. Допускаются и другие группы соединений, если сдвиг между ними равен 60°, 180° и т. д. Со стороны звезды каждая пара трансформаторов соединяется параллельно. Со стороны треугольника фаза *a* одного из трансформаторов соединяется с фазой *c* другого и заземляется (рис. 1). Остальные четыре вывода трансформаторов присоединяются к

сборным шинам или непосредственно к четырехпроводной линии электропередачи.

Как видно из рассмотрения векторных диаграмм, представленных на рис. 2 и 3, применение такого же соединения трансформаторов на всех остальных подстанциях обеспечивает при холостом ходе линий четырехлучевую звезду напряжений и токов на вторичной стороне, сумма векторов которой равна нулю. Простейшее доказательство этого вытекает из рассмотрения четырехпро-

водной системы электропередачи как двух обычных трехфазных систем с использованием земли в качестве третьих проводов обеих систем (рис. 1).

При загруженной линии загрузка трансформаторов не будет равномерной вследствие отсутствия падения напряжения между заземленными фазами трансформаторов питающей и приемной подстанций. Эту неравномерность можно устранить снижением коэффициентов трансформации путем перестановки переключателей на фазах 5' и 6' трансформаторов питающей подстанции (рис. 1). Ее можно также снизить при помощи серийной компенсации, расщепления проводов и т. п. При условии выполнения этих мероприятий четырехпроводная электропередача в отношении симметрии токов и напряжений в линии и генераторах практически не будет отличаться от обычных трехфазных трехпроводных электропередач [Л. 4]².

Вопросы изоляции электропередач. Как видно из векторной диаграммы (рис. 3, в), напряжения всех фаз четырехпроводной электропередачи по отношению к земле будут равны и в $\sqrt{3}$ раз больше напряжений обычных трехфазных электропередач при замыканиях на землю одной фазы. Напряжения между фазами будут различны:

$$U_{12} = U_{34} = U; \quad U_{14} = U_{23} = \sqrt{3}U;$$

$$U_{13} = U_{24} = 2U.$$

С точки зрения изоляции по отношению к земле рассматриваемая схема электропередачи, казалось бы, находится в более тяжелых условиях, чем обычные электропередачи, так как все ее элементы должны быть изолированы на линейное напряжение. Однако повышение напряжения в $\sqrt{3}$ раз практически не поведет к усилению линейной изоляции [Л. 3, 5].

Уровень линейной изоляции, как известно зависит от величины рабочего напряжения, коммутационных перенапряжений и атмосферных перенапряжений. Уровень изоляции для систем напряжением до 110 кВ включительно определяется атмосферными перенапряжениями. Выбранная таким образом линейная изоляция выдержит

¹ См. статью В. В. Андреева в настоящем номере.

² Доказательство этого вывода приведено в статье Л. Е. Эбина, публикуемой в настоящем номере (стр. 23).

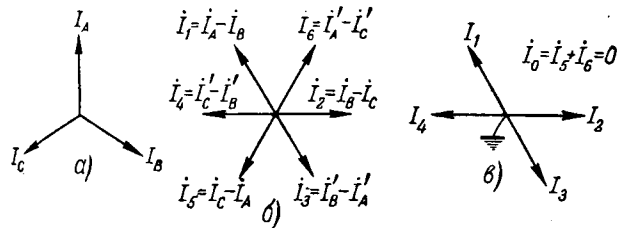


Рис. 2. Векторные диаграммы токов без учета падения напряжения в линиях электропередачи.
 а — токи нагрузки; б — токи на линейной стороне трансформаторов; в — токи в линии.

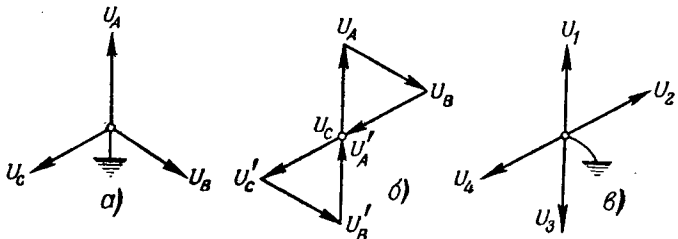


Рис. 3. Векторные диаграммы напряжений без учета падения напряжения в линиях.
 а — напряжения у потребителей; б — напряжения на линейной стороне трансформаторов; в — напряжения на линии.

вает испытательное напряжение промышленной частоты, равное $3,5 \dots 5U_{\phi}$. Следовательно, линии с повышенным в $\sqrt{3}$ раз напряжением будут с точки зрения коммутационных перенапряжений достаточно надежными. Это подтверждается тем обстоятельством, что количество изоляторов в гирляндах линий, работающих в системах с изолированной нейтралью и в системах с заземленной нейтралью, обычно принимается одинаковым.

Что же касается вопроса о длительном воздействии повышенного в $\sqrt{3}$ раз рабочего напряжения, то следует отметить, что линейная изоляция, выбранная из условий атмосферных перенапряжений, не снизит сколько-нибудь существенно при нормальной эксплуатации тот большой запас, который она имеет.

Влияние повышенного в $\sqrt{3}$ раз рабочего напряжения на старение изоляции было довольно подробно исследовано при решении вопроса о применении системы ДПЗ [Л. 3]. Допустимость такого повышения подтверждена также продолжительным опытом эксплуатации сетей ДПЗ, протяженность которых в СССР уже в довоенный период превышала 1 200 км, в том числе около 300 км приходилось на напряжения 20 и 35 кВ [Л. 2]. Все эти сети имеют нормальную изоляцию. Этот опыт позволил Техническому управлению МЭС разрешить длительное применение режима ДПЗ в тех случаях, когда отыскание места повреждения и проведение ремонта линий не могут быть осуществлены в короткий срок [Л. 6, 8].

В таблице приведены нормы для испытания импульсной прочности изоляции трансформаторов, принятые в СССР, США и Германии.

Класс изоляции, кВ	10	35	110	154	220
МТЗ (СССР) . .	103	160—230	460—550	615	900
AIEE (США) . . .	100	210	550	750	1 050
VDE (Германия) .	97	218	500	642	875

Анализ данных таблицы показывает, что нормы импульсной прочности трансформаторов в этих трех странах в настоящее время находятся на одинаковом уровне и что способ заземления нейтрали не сказывается на величине испытательного напряжения [Л. 5]. В Германии, где

наибольшее распространение получили сети с компенсированной нейтралью, нормы импульсной прочности даже несколько ниже, чем в странах, где принято глухое заземление нейтрали.

Увеличение междуфазного напряжения линий до 35 кВ включительно не скажется сколько-нибудь существенно на выборе сечений проводов и на конструкциях опор³, так как при этих напряжениях и практически применяемых сечениях проводов явление короги не будет иметь места.

Технико-экономические показатели. Преимущества четырехпроводных линий электропередачи можно выявить путем сравнения их технико-экономических показателей с показателями обычных трехпроводных линий. Для этого могут быть использованы кривые, изображенные на рис. 4 и 5.

Кривые а и б рис. 4 построены для случая передачи одинаковой мощности по трех- и четырехпроводной линиям электропередачи. Они показывают зависимость коэффициента кратности суммарного сечения проводов $k = \frac{\Sigma s_4}{\Sigma s_3}$ от коэффициента кратности потерь $n = \frac{\Delta P_4}{\Delta P_3}$. Кривая а построена для трехпроводной линии, имеющей $k = \frac{1}{n}$, а кривая б — для четырехпроводной линии, имеющей $k = \frac{4}{9n}$.

Из рассмотрения кривой б следует, что ее участок между точками В и А соответствует таким параметрам четырехпроводной линии, при которых она будет иметь одновременно меньшие потери и меньшее суммарное сечение проводов, чем соответствующая трехпроводная линия, передающая одинаковую мощность.

На рис. 5 приведены прямые, показывающие зависимость коэффициента кратности удельных потерь — $n_1 = \frac{\Delta P_4 / P_4}{\Delta P_3 / P_3}$ от кратности передаваемой мощности — $m = \frac{P_4}{P_3}$ по трех- и четырехпровод-

ным линиям при равном расходе цветного металла, т. е. при $\Sigma s_4 = \Sigma s_3$. Прямая а построена для трехпроводной линии, которая, как нетрудно убедиться, имеет $n_1 = m$. Прямая б построена

³ О конструкциях опор см. статью В. В. Овсенко в настоящем номере (стр. 30).

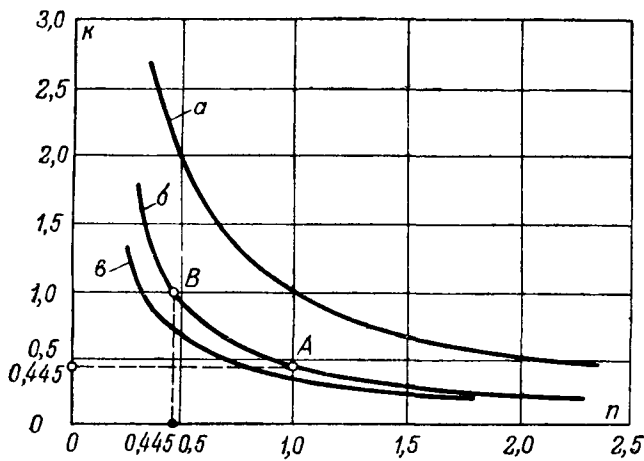


Рис. 4. Зависимость коэффициента кратности суммарного сечения проводов от коэффициента кратности потерь.

для четырехпроводной линии. Уравнение этой прямой — $n_1 = \frac{4}{9} m$.

Из рассмотрения прямой *б* следует, что при увеличении передаваемой по четырехпроводной линии мощности до $2,25 P_3$ (точка *A*) удельные потери в ней $\frac{\Delta P_4}{P_4}$ будут меньше, чем в трехпроводной линии.

Рассмотрение прямых зависимости коэффициента кратности удельных сечений $k_1 = \frac{\sum s_4 / P_4}{\sum s_3 / P_3}$ от кратности передаваемой мощности $m = \frac{P_4}{P_3}$ при неизменных потерях, т. е. при $\Delta P_4 = \Delta P_3$, показывает, что эти прямые совпадают с прямыми $n_1 = f(m)$.

Из рассмотрения зависимостей, представленных на рис. 4 и 5, становится очевидной целесообразность перехода на четырехпроводную схему электропередачи, которая дает возможность: а) при передаче одинаковой мощности и неизменных потерях сэкономить 55,5% цветного металла (точка *A*, рис. 4); б) при одинаковом расходе цветного металла и одинаковых удельных потерях передать мощность, в 2,25 раза большую, чем мощность, передаваемая по трехпроводной линии (точка *A*, рис. 5); в) при одинаковых потерях и одинаковом удельном расходе цветного металла передать мощность, в 2,25 раза большую, чем мощность, передаваемая по трехпроводной линии (точка *A*, рис. 5).

Определенный практический интерес представляет подвеска четвертого провода на существующих линиях. В этом случае (рис. 1) получается как бы две линии и, следовательно, удваивается пропускная способность электропередачи, а расход цветного металла возрастает только на $\frac{1}{3}$.

Не меньший практический интерес при переходе на четырехпроводную электропередачу представляет замена проводов из цветного металла стальными.

Для выявления целесообразности такой замены при передаче по трехпроводной и четырехпроводной линиям одинаковой мощности с оди-

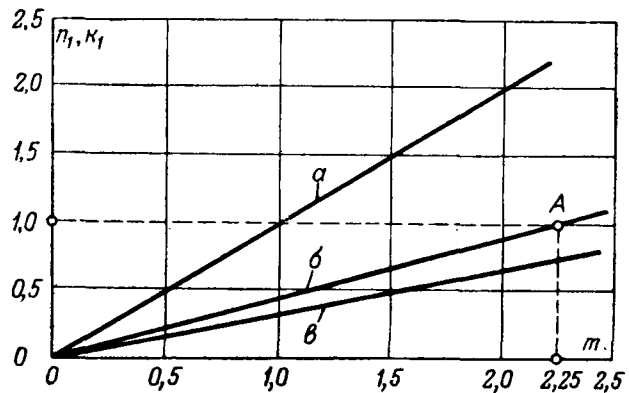


Рис. 5. Зависимость коэффициента кратности удельных потерь и коэффициента кратности удельных сечений от кратности передаваемой мощности.

наковыми потерями воспользуемся следующими соотношениями:

$$P_4 = P_3, \quad (1)$$

$$\Delta P_4 = \Delta P_3, \quad (2)$$

$$I_4 = 0,5 I_3, \quad (3)$$

$$\Delta P_4 = 4I_4^2 r_4 \quad \text{и} \quad \Delta P_3 = 3I_3^2 r_3, \quad (4)$$

где P_4 и P_3 — мощность, передаваемая по четырехпроводным и трехпроводным линиям; ΔP_4 и ΔP_3 — потери мощности в этих линиях; I_4 , I_3 , r_4 , r_3 — токи и активные сопротивления каждого из проводов соответствующих линий.

Пользуясь уравнениями (2) и (4), получаем, что

$$r_4 = 3r_3. \quad (5)$$

Подставляя в выражение (5) вместо сопротивлений их выражения через удельные сопротивления, длины и сечения проводов, получим при одинаковых длинах линий

$$q_4 = \frac{1}{3} \cdot \frac{\rho_4}{\rho_3} \cdot q_3. \quad (6)$$

Пользуясь табличными данными удельных сопротивлений $\rho_c \approx 0,13$; $\rho_a = 0,0283$ и $\rho_{ст} = 0,0172$, получаем, что при замене трехпроводной линии с медными проводами на четырехпроводную линию со стальными проводами

$$q_{4c} \approx 2,5 q_{3м}. \quad (7)$$

Соответственно при замене алюминиевых или стальалюминиевых проводов стальными

$$q_{4c} \approx 1,5 q_{3а}. \quad (8)$$

Таким образом, можно установить, что при одинаковых потерях четырехпроводная линия с проводами Ж-120 может заменить трехпроводную линию с медными проводами М-50 и стальалюминиевыми проводами АС-70 и АС-95. Такая замена осуществима и по условиям нагрева проводов.

Что же касается повышения падения напряжения, связанного с переходом на стальные провода, то его можно значительно уменьшить, применив продольную компенсацию или расщепленные провода.

Сравнение четырехпроводной передачи с трехпроводной передачей повышенного напряжения. Сравнение варианта перехода на повышенное в $\sqrt{3}$ раз напряжение с вариантом перехода на четырехпроводную систему электропередачи представляет определенный интерес. Для этого на рис. 4 и 5 нанесены кривые *в*, показывающие, что переход на повышенное в $\sqrt{3}$ раз напряжение дает несколько больший эффект, чем переход на четырехпроводную систему электропередачи⁴. Однако этот дополнительный эффект невелик, так как кривые и прямые *б* и *в* лежат довольно близко друг к другу и находятся на значительном расстоянии от кривых *а*.

Но по соображениям удобства развития существующих сетей и надежности электроснабжения переход к четырехпроводной системе при реконструкции существующих сетей, а в ряде случаев и при сооружении новых линий имеет ряд преимуществ по сравнению с переходом к трехпроводным линиям повышенного напряжения.

Особенности перехода на четырехпроводную систему электропередачи. Увеличение пропускной способности сети обычно достигается путем сооружения дополнительных дублирующих линий электропередачи или путем перехода на более высокое напряжение, что связано с большими затратами на полную замену трансформаторов, аппаратуры и линий. Перевод даже небольшой части нагрузки на более высокое напряжения связан с первоначальным вложением значительных средств на сооружение новых подстанций, полное использование которых становится возможным только в дальнейшем.

Совершенно по другому можно осуществить увеличение пропускной способности сети, если воспользоваться четырехпроводной схемой электропередачи. В этом случае увеличение пропускной способности отдельных питающих линий может производиться по мере необходимости. На питающей подстанции необходимо иметь не менее двух трансформаторов, соединенных по схеме рис. 1. Нейтраль сети должна быть разземлена, а вся электрически связанная сеть должна быть переведена на режим заземленной фазы. По мере того как на той или иной вторичной подстанции растут нагрузки, на питающей ее линии подвешивается четвертый провод, а трансформаторы соединяются по схеме рис. 1. Как от опорной, так и от вто-

ричных подстанций могут отходить как трехпроводные, так и четырехпроводные линии.

Примерная схема сети со смешанными четырех- и трехпроводными линиями показана на рис. 6. На этой схеме подстанция № 5 питается по одной четырехпроводной линии от опорной подстанции № 1, подстанция № 4 по двум трехпроводным линиям, а подстанции № 2 и 3 по одной трехпроводной линии каждая. К шинам всех подстанций включены понижающие трансформаторы.

Для перевода подстанции № 4 на питание по четырехпроводной системе достаточно ее трансформаторы соединить по схеме рис. 1, проложить еще одну нормально изолированную шину и одну заземляющую шину и сомкнуть обе секции сборных шин.

Как видно из схемы рис. 6, на подстанции № 1 при смешанных линиях допустима установка и нечетного числа трансформаторов. При этом третий трансформатор присоединяется к тем шинам, от которых питаются трехпроводные линии.

Четырехпроводная схема повышенной надежности. Как известно, при проектировании электрических сетей степень надежности питания нагрузок определяется в зависимости от категорий последних. Питание нагрузок I и II категорий осуществляется по двум линиям. В целях увеличения надежности электроснабжения потребителей, питающихся по одиночным линиям, за последние годы в СССР была проделана большая и плодотворная работа по проведению ремонтов линий электропередачи под напряжением путем поочередного отключения каждой из фаз [Л. 8]. Несмотря на то, что выключение одного из проводов трехфазной линии вызывает значительную несимметрию, этот способ ремонта получил признание среди эксплуатационников.

Четырехпроводная электропередача в этом отношении обладает значительным преимуществом по сравнению с трехпроводной. Выход из строя одного из проводов четырехпроводной электропередачи не ведет к нарушению симметрии, так

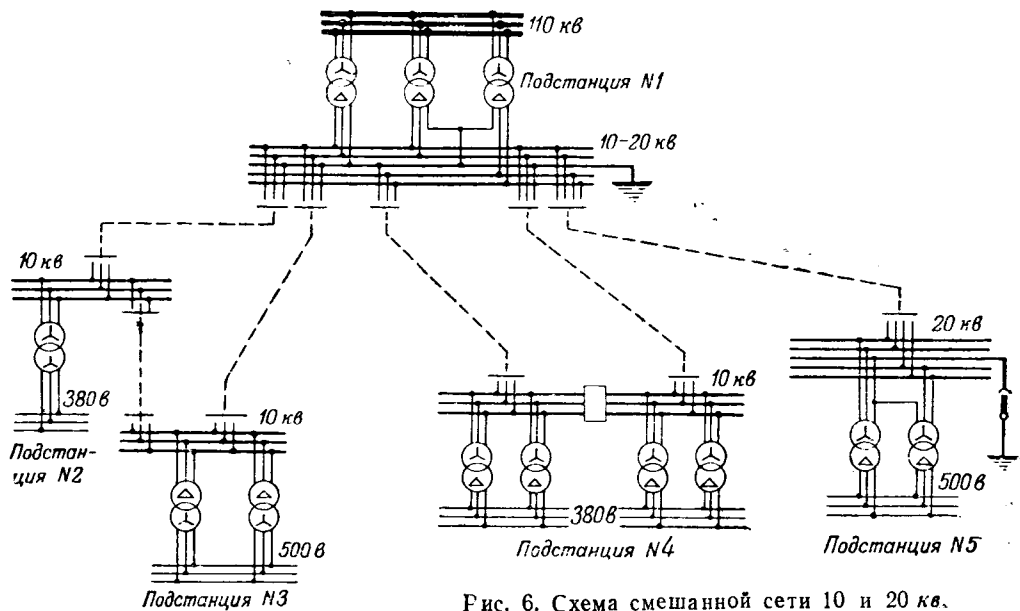


Рис. 6. Схема смешанной сети 10 и 20 кВ.

⁴ Уравнение кривой *в*

(рис. 4) — $K = \frac{1}{3n}$; прямой *в*

(рис. 5) — $K_1 = n_1 = \frac{1}{3} m$.

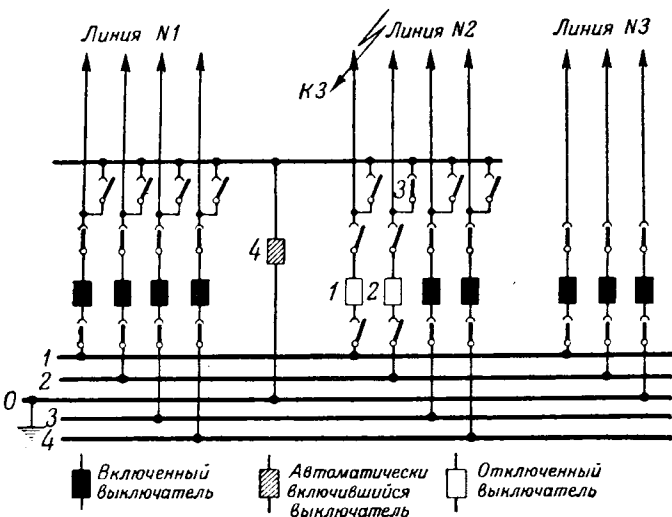


Рис. 7. Схема автоматического устройства, переключающего линию с четырехпроводной на трехпроводную.

как из трех оставшихся проводов после соответствующего автоматического переключения может быть составлена симметричная трехфазная передача.

Схема устройства автоматического переключения приведена на рис. 7. При повреждении одного провода линии № 2, которое не было устранено при автоматическом повторном включении, отключаются выключатели 1 и 2. Вслед за этим автоматически включается разъединитель 3 и выключатель 4. В результате этих переключений линия № 2 переводится в режим трехпроводной электропередачи, в котором она ничем не отличается от линии № 3. Вследствие действия релейной защиты переключение на трехпроводную схему будет произведено на обоих концах линии. После переключения на одном конце линии создается режим короткого замыкания на другом ее конце. Это и является причиной действия релейной защиты. Следует отметить, что в течение кратковременного периода действия переключающего устройства линия электропередачи работает в режиме ДПЗ.

Переход от четырехпроводной схемы на трехпроводную в связи с аварийным ремонтом практически не снижает величину передаваемой мощности, так как при этих режимах можно пренебречь увеличением потерь в линии и довести ее нагрузку до допустимой величины по условиям нагрева и потери напряжения.

Допустимость работы четырехпроводной линии при трехпроводной схеме может лимитироваться загрузкой трансформаторов, так как нагрузка линии полностью передается только на один из трансформаторов.

Большинство повреждений на линиях электропередачи является однофазным. Поэтому четырехпроводные линии, оборудованные однополюсным АПВ, в отношении надежности электроснабжения, стоят значительно выше обычных трех-

проводных линий и приближаются к двухцепным линиям.

Выводы. 1. Четырехпроводная система электропередачи является симметричной. При этой системе имеет место практически равномерная загрузка фаз трехфазных источников питания.

2. При помощи простейших устройств четырехпроводная система в необходимых случаях может автоматически преобразовываться в симметричную трехфазную трехпроводную систему электропередачи.

3. При одинаковом расходе цветного металла и одинаковых удельных потерях четырехпроводные линии по сравнению с обычными трехфазными линиями имеют в 2,25 раза большую пропускную способность.

4. При передаче одинаковой мощности и одинаковых удельных потерь расход цветного металла на четырехпроводную линию на 55,5% меньше, чем на обычную трехфазную.

5. Четырехпроводная линия в ряде случаев может заменить обычную трехфазную двухцепную линию.

6. Переход на четырехпроводную систему электропередачи значительно расширяет область экономичного применения стальных проводов на линиях электропередачи до 35 кВ включительно.

7. При реконструкции существующих трехфазных сетей предпочтение следует отдавать четырехпроводной системе электропередачи, а не обычной трехфазной повышенного напряжения.

В заключение следует отметить, что настоящая статья далеко не исчерпала вопросов, связанных с передачей трехфазного тока по четырем проводам. Вопросы несимметрии, релейной защиты, расчета токов короткого замыкания, конструкции опор и многие другие не получили необходимого освещения в настоящей статье.

Литература

1. П. Г. Грудинский. О потерях энергии и затратах цветного металла в энергосистемах, *Электричество*, № 6, 1946.
2. Л. Е. Эбин и Ш. А. Алукер. Электрический расчет сетей с использованием земли в качестве одного из фазных проводов (два провода — земля). Госэнергоиздат, 1949.
3. П. С. Орешкин. Передача энергии трехфазным током по системе два провода — земля. Изд. Академии наук СССР, 1935.
4. И. А. Сыромятников. Определение допустимой нагрузки синхронных машин при несимметричных режимах. Госэнергоиздат, 1944.
5. А. Н. Шеренцис. О применении в проектной практике «Руководящих указаний по защите от перенапряжений установок переменного тока напряжением 3... 200 кВ». Труды научно-технической сессии по перенапряжениям. Госэнергоиздат, 1950.
6. Сборник директивных материалов Технического отдела МЭС. Электрическая часть. Госэнергоиздат, 1950.
7. В. С. Кондачан. Эксплуатация трансформаторов. Госэнергоиздат, 1950.
8. Материалы по однофазному управлению, автоматическому повторному включению и ремонту высоковольтных линий электропередачи. Госэнергоиздат, 1946.

Экономичные схемы электропередачи и методы их расчета

Кандидат техн. наук Л. Е. ЭБИН

Москва

Для районов с малыми плотностями электрических нагрузок, в частности для сельских районов, представляют инте-

рес такие экономичные схемы энергоснабжения, как, например, схема, в которой в качестве одного из фазных проводов используется земля (ДПЗ) и которая получила довольно широкое распространение в Советском Союзе при осуществлении высоковольтных сельских сетей. Схема, предложенная В. В. Андреевым, является дальнейшим развитием этих схем и представляет собой сдвоенную схему ДПЗ¹.

Автором настоящей статьи была предложена схема (рис. 1), представляющая собой шести-фазную систему электропередачи, образованную из трех трехфазных². На повышающей и понижающей подстанциях три одинаковых трехфазных трансформатора с низкой стороны включены на трехфазные шины; с высокой же стороны три разноименные фазы (по одной фазе каждого трансформатора) заземляются наглухо, а остальные шесть фаз включаются в шестипроводную линию электропередачи.

Векторная диаграмма напряжений при холостом ходе линии представлена на рис. 2. Напряжения любого провода линии относительно земли равно линейному напряжению U_Δ каждой из трехфазных составляющих этой системы. Если располагать провода линии в последовательности, соответствующей следованию фаз на диаграмме рис. 2, то напряжения между двумя соседними проводами будут также равны линейному напряжению U_Δ . В то же время напряжения между проводами, расположенными на опоре через один и через два провода, будут равны соответственно $\sqrt{3}U_\Delta$ и $2U_\Delta$.

Условия работы изоляции линии, построенной по схеме рис. 1, такие же, как и линии ДПЗ с линейным напряжением U_Δ . Следовательно,

Рассматривается предлагаемая автором схема шести-фазной электропередачи. Дан метод анализа схемы, предложенной автором, и сдвоенной схемы ДПЗ при помощи групповых симметричных составляющих.

расстояния между соседними проводами могут применяться те же, что и в указанной линии ДПЗ.

Пропускная способность линии примерно в 2,5 раза больше пропускной способности двух-цепной трехфазной шестипроводной линии.

Если нагрузка линии симметрична, то ток в земле при схеме рис. 1 отсутствует. Хотя в каждой из трех систем, составляющих эту схему, падения напряжения в фазах неодинаковы, в совокупности же достигается равенство потерь напряжения в фазах. Токи и напряжения на обоих концах схемы в трехфазных частях цепи симметричны.

При схеме рис. 1 целесообразно применение однофазного повторного включения с длительным отключением фазы в случае устойчивого замыкания. Работа линии при таком режиме будет протекать в более легких условиях, чем в обычных трехфазных сетях.

При выходе из строя одного из трех трансформаторов возможно продолжать работу на двух трансформаторах или осуществить переход на сдвоенную схему ДПЗ.

Если вместо трехфазных трансформаторов применять однофазные, то, исключив в схеме рис. 1 три трансформатора через один из числа

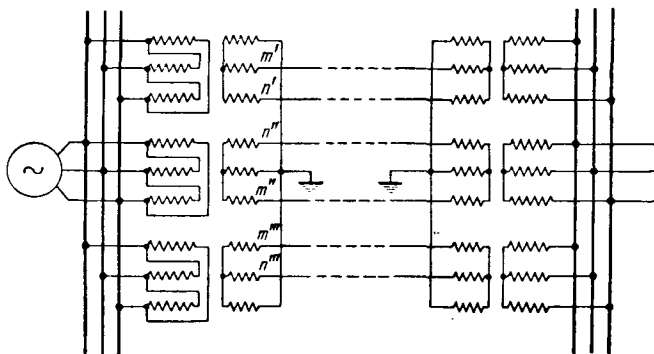


Рис. 1. Принципиальная схема шести-фазной электропередачи.

¹ См. статью В. В. Андреева в настоящем номере (стр. 15).

² Авторское свидетельство № 91036.

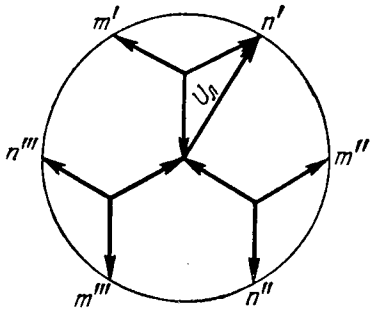


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений шестифазной электропередачи.

включенных к линии и используя только шесть однофазных трансформаторов, можно получить трехфазную передачу с линейным напряжением $\sqrt{3}U_A$. Обмотки высшего напряжения трансформаторов при этом оказываются соединенными в зигзаг.

Схема рис. 1 может получить дальнейшее развитие. Можно применить трехфазные ответвления от шестифазной магистрали в виде двухпроводных линий ДПЗ с напряжением U_A и трехпроводных линий повышенного напряжения $\sqrt{3}U_A$. Возможно осуществить шестифазные шины, от которых могут отходить линии разных типов и

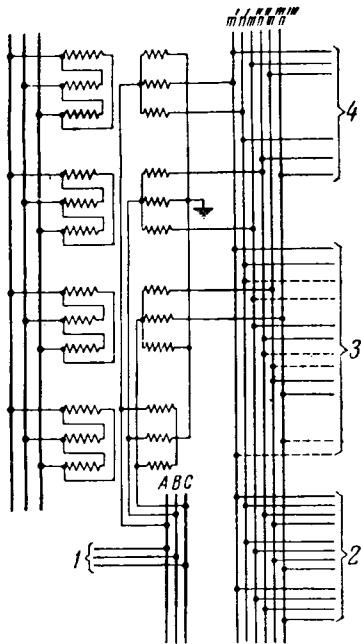


Рис. 3. Схема подстанции с шестифазными шинами.

1 — трехфазная трехпроводная линия пониженного напряжения; 2 — четырехпроводные линии по двояжной схеме ДПЗ; 3 — двухпроводные линии по схеме ДПЗ пониженного напряжения; 4 — линии повышенного напряжения.

напряжений, как это показано на рис. 3. Если нейтраль с высокой стороны трансформаторов вывести на отдельные трехфазные шины, то от

этих шин могут быть осуществлены трехфазные трехпроводные электропередачи напряжением U_A .

Таким образом, применение предложенной схемы позволяет осуществить питание потребителей разнообразными способами и при разных напряжениях в зависимости от характера их нагрузок, их мощностей и расстояний от питающей подстанции.

Сдвоенная схема ДПЗ и схема, предложенная автором, в известной мере компенсируют отсутствие в стандарте номинальных напряжений 20 и 60 кВ и могут найти применение при электрификации орошаемых районов земледелия, а также для связи между сельскими станциями укрупненной мощности.

Для анализа работы и расчета сетей ДПЗ была показана [Л. 1, 2] целесообразность применения двухфазных симметричных составляющих. Токи и напряжения при этом разлагаются на составляющие нулевой и прямой последовательности, оператором последовательностей является — 1.

Для схем, в которых несколько однотипных многофазных цепей связаны между собой на концах электропередачи или по всей их длине взаимной индукцией (сдвоенные схемы ДПЗ, схема автора, параллельные трехфазные линии, связывающие шины двух подстанций), целесообразно применить так называемые групповые симметричные составляющие. При этом в каждой из однотипных цепей токи и напряжения разлагаются на симметричные составляющие по числу фаз в них (m -фазные симметричные составляющие).

В общем случае токи разных последовательностей в этих цепях не равны между собой. Если рассматривать токи или напряжения какой-либо последовательности во всех k цепях, то можно образовать k -фазные симметричные составляющие, которые мы называем групповыми составляющими данной последовательности; число таких групповых составляющих будет k . Таким образом, могут быть образованы групповые симметричные составляющие от всех m -фазных составляющих в k цепях. Всего, следовательно, будет km групповых составляющих. В качестве примера на рис. 4 приведены векторные диаграммы групповых симметричных составляющих для двух двухфазных и двух трехфазных цепей.

Обратимся к сдвоенной схеме ДПЗ. К каждой из схем ДПЗ, образующих сдвоенную систему, применимы, как указано было выше, двухфазные симметричные составляющие. Например, для токов будем иметь: I'_0, I'_1, I''_0, I''_1 . Так как схем ДПЗ две, образуем двухфазные групповые составляющие. От токов нулевой последовательности будем иметь I_{00} и I_{01} и соответственно от токов прямой последовательности I_{10} и I_{11} .

Если предусмотреть на линии транспозицию проводов или пренебречь неравенством расстояний между проводами, то сопротивления линии

для групповых симметричных составляющих можно выразить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Z_{00} &= Z_n + 3Z_s \\ Z_{01} = Z_{10} = Z_{11} &= Z_n - Z_s = Z_a, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где Z_n — полное сопротивление петли провод — земля;

Z_s — полное сопротивление взаимной индукции между двумя такими петлями.

Как видно из (1), сопротивление Z_a равно сопротивлению токам прямой последовательности трехфазной линии. Легко установить для этих составляющих сопротивления трансформаторов, образующих рассматриваемую систему и включенных на каждом конце линии; они могут быть выражены следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Z_{00} = Z_{01} &= 3Z_k, \\ Z_{10} = Z_{11} &= Z_k, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

здесь Z_k — сопротивление, включающее активное сопротивление и сопротивление рассеяния фазы трансформатора.

Из рассмотрения схем отдельных составляющих легко установить, что протекание составляющих токов I_{00} и I_{10} ограничивается линией электропередачи, трансформаторами и шинами, связывающими трансформаторы на низкой стороне. В генераторах и трехфазных приемниках электроэнергии, включенных на эти же шины, составляющие I_{00} и I_{10} не протекают.

Токи I_{01} и I_{11} связаны с симметричными составляющими токов в трехфазной части схемы следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} I_{01} &= -\frac{1}{4}(I_1 + I_2), \\ I_{11} &= \frac{1}{4}(a^2 - a)(I_1 - I_2), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где I_1 и I_2 — трехфазные симметричные составляющие токов в трехфазной части схемы. Соответственно симметричные составляющие напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 в трехфазной части схемы связаны на каждом конце четырехпроводной электропередачи с групповыми составляющими:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\frac{1}{3}\dot{U}_{01} + \frac{1}{3}(a - a^2)\dot{U}_{11}, \\ \dot{U}_2 &= -\frac{1}{3}\dot{U}_{01} + \frac{1}{3}(a^2 - a)\dot{U}_{11}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При нормальном режиме в двух воздушных проводах одной из схем ДПЗ протекают токи I'_m и I'_n . Так как схема симметрична относительно нейтрали системы, в проводах второй схемы ДПЗ будут протекать токи $-I'_m$ и $-I'_n$. Двухфазные симметричные составляющие токов во второй схеме ДПЗ будут сдвинуты по отношению к этим составляющим в первой схеме

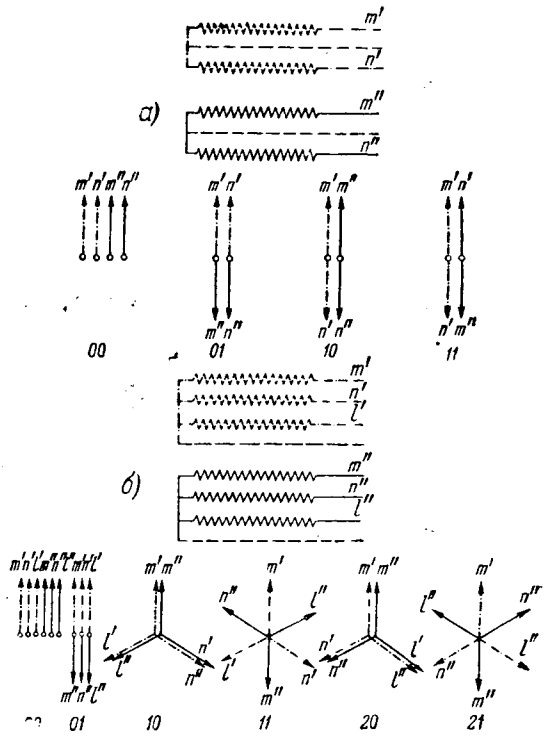


Рис. 4. Групповые симметричные составляющие. а — двухфазные от двухфазных; б — двухфазные от трехфазных.

на угол 180° . Образуя групповые двухфазные симметричные составляющие, получим:

$$\left. \begin{aligned} I_{00} = I_{10} &= 0, \\ I_{01} &= I'_0, \\ I_{11} &= I'_1. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Падения напряжения от этих составляющих токов в линии, включая и трансформаторы на обоих концах ее (предполагается, что все четыре трансформатора одинаковы), будут:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\dot{U}_{00} = \Delta\dot{U}_{10} &= 0, \\ \Delta\dot{U}_{01} &= I_{01}(Z_a + 6Z_k), \\ \Delta\dot{U}_{11} &= I_{11}(Z_a + 2Z_k). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Подставляя в выражения (6) значения токов I_{01} и I_{11} из (3) и определяя согласно (4) падения напряжений $\Delta\dot{U}_1$ и $\Delta\dot{U}_2$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\dot{U}_1 &= \frac{1}{3}I_1(Z_n + 3Z_k) - \frac{1}{6}I_2Z_a, \\ \Delta\dot{U}_2 &= -\frac{1}{6}I_1Z_a + \frac{1}{3}I_2(Z_n + 3Z_k). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Полагаем, что

$$\Delta\dot{U}_2 = -I_2Z_2,$$

где Z_2 — сопротивление токам обратной последовательности цепи слева и справа от линии электропередачи. Отсюда соотношение между

токами прямой и обратной последовательности в трехфазной части схемы

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{1}{2} \frac{Z_A}{Z_A + 3(Z_K + Z_2)}. \quad (8)$$

Таким образом, при нормальном режиме имеет место асимметрия токов, а следовательно, и асимметрия напряжений. С учетом (8) падение напряжения прямой последовательности будет:

$$\Delta \dot{U}_1 = \frac{1}{4} i_1 \frac{(Z_A + 2Z_K)(Z_A + 6Z_K) + 4Z_2(Z_A + 3Z_K)}{Z_A + 3(Z_K + Z_2)}. \quad (9)$$

Если из (9) вычесть падение напряжения прямой последовательности в трансформаторах на обоих концах линии $\Delta \dot{U}'_1 = i_1 Z_K$, то получим падение напряжения только в линии

$$\Delta \dot{U}_1 = \frac{1}{4} i_1 Z_A \frac{Z_A + 4Z'_2}{Z_A + 3Z'_2}, \quad (10)$$

где
$$Z'_2 = Z_2 + Z_K. \quad (11)$$

Обозначим:

$$\left. \begin{aligned} Z_A &= |Z_A| (\cos \varphi' + j \sin \varphi'), \\ Z_A + 4Z'_2 &= |Z''| (\cos \varphi'' + j \sin \varphi''), \\ Z_A + 3Z'_2 &= |Z'''| (\cos \varphi''' + j \sin \varphi'''). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Тогда потеря линейного напряжения в линии при нормальном режиме может быть определена следующим образом:

$$\Delta U_A = \frac{\sqrt{3}}{4} i \frac{|Z_A| |Z''|}{|Z'''|} \cos(\varphi' + \varphi'' - \varphi''' - \varphi), \quad (13)$$

где $\cos \varphi$ — коэффициент мощности нагрузки;
 i — ток (прямой последовательности) в трехфазной части схемы.

В формуле (13) потеря напряжения, ток и сопротивление отнесены к высокому напряжению каждого из трансформаторов.

В качестве примера рассмотрим электропередачу, связывающую две электрические станции. На обоих концах линии установлено по два трехфазных трансформатора мощностью по 3 200 *кв*а, напряжением на высокой стороне 35 *кв*. Четырехпроводная линия длиной 70 *км* выполнена проводами АС-35. Суммарная мощность, передаваемая по линии, равна 4 840 *кв*а при $\cos \varphi = 0,8$. Следовательно, ток в трехфазных частях схемы, приведенный к напряжению 35 *кв*, равен 80 *а*.

Полное сопротивление линии

$$Z_A = (0,91 + j0,42) \cdot 70 = 70e^{j25^\circ}.$$

Сопротивление обратной последовательности всей цепи за исключением линии электропередачи составляет:

$$Z' = 5,0 + j86.$$

Таким образом, имеем:

$$\begin{aligned} Z'' &= 380e^{j78^\circ}, \\ Z''' &= 296e^{j75^\circ}. \end{aligned}$$

Потеря линейного напряжения

$$\begin{aligned} \Delta U_A &= \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot 80 \frac{70 \cdot 380}{296} \cos(25^\circ + 78^\circ - 75^\circ - 37^\circ) = \\ &= 3\,030 \text{ в, или } 8,7\%. \end{aligned}$$

Асимметрия токов при этом

$$\left| \frac{i_2}{i_1} \right| = \frac{1}{2} \frac{70}{296} = 0,118.$$

Обрыв одного из проводов рассматривается как частный случай введения в эту фазу последовательно сопротивления Z . Падения напряжения в этом сопротивлении

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}'_m &= i'_m Z, \\ \Delta \dot{U}'_n &= \Delta \dot{U}''_m = \Delta \dot{U}'''_m = 0. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Симметричные составляющие падения напряжения в сопротивлении Z

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{U}_{00} &= \Delta \dot{U}_{01} = \Delta \dot{U}_{10} = \Delta \dot{U}_{11} = \frac{1}{4} i'_m Z = \\ &= \frac{1}{4} (i_{00} + i_{01} + i_{10} + i_{11}) Z. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Комплексная схема для этого случая представлена на рис. 5. Схемы всех последовательностей по концам сопротивления Z соединены между собой параллельно и включены на сопротивление Z . В схеме последовательностей 01 и 11 введены дополнительные э. д. с. в соответствии с (4). Для определения токов последовательностей должны быть приняты также во внимание общие соотношения между токами (3). При обрыве провода в схеме рис. 5 должно быть принято $Z \rightarrow \infty$.

При замыкании на землю одного из проводов через сопротивление Z в месте замыкания будут иметь место соотношения

$$\left. \begin{aligned} i_{00} &= i_{01} = i_{10} = i_{11} = \frac{1}{4} i'_m, \\ \Delta \dot{U}'_m &= \Delta \dot{U}_{00} + \Delta \dot{U}_{01} + \Delta \dot{U}_{10} + \Delta \dot{U}_{11} = i'_m Z. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Соответствующая этому случаю комплексная схема представлена на рис. 6.

Схему автора (рис. 1) следует рассматривать, как состоящую из трех схем ДПЗ. В этом случае образуются трехфазные групповые симметричные составляющие, например, для токов: $i_{00}, i_{01}, i_{02}, i_{10}, i_{11}, i_{12}$. Составляющие сопротивлений линии (при наличии транспозиции проводов на линии или пренебрегая неравенством расстояний между проводами):

$$\left. \begin{aligned} Z_{00} &= Z_n + 5Z_s, \\ Z_{01} &= Z_{02} = Z_{10} = Z_{11} = Z_{12} = \\ &= Z_n - Z_s = Z_A. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

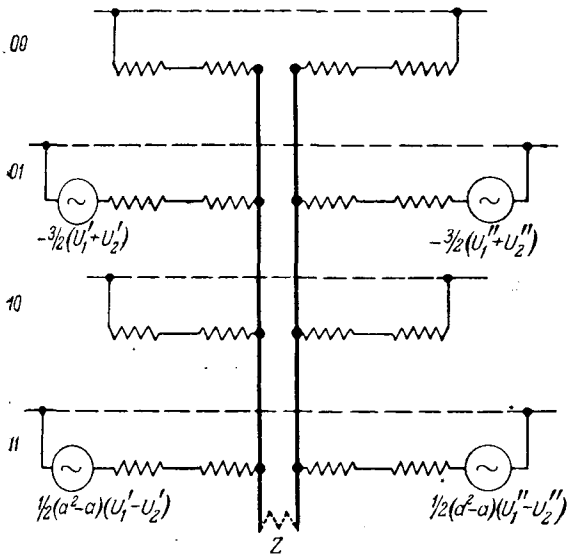


Рис. 5. Комплексная схема для случая выключения одного из проводов.

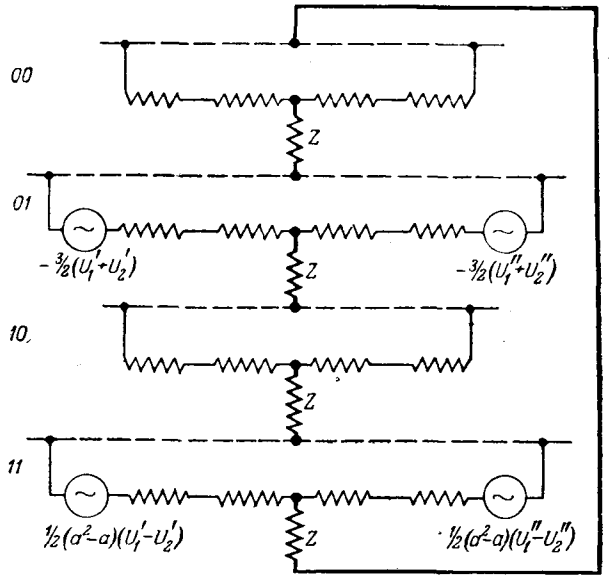


Рис. 6. Комплексная схема для случая однополюсного замыкания на землю.

Сопротивления трансформаторов, образующих шестифазную систему,

$$\left. \begin{aligned} Z_{00} = Z_{01} = Z_{02} = 3Z_{\kappa}, \\ Z_{10} = Z_{11} = Z_{12} = Z_{\kappa}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Как и в предыдущем случае, токи i_{00} и i_{10} протекают только в линии, трансформаторах и шинах, связывающих трансформаторы на концах электропередачи. Следовательно, напряжения \dot{U}_{00} и \dot{U}_{10} имеют место только в пределах шестифазной системы.

Групповые составляющие токов связаны с трехфазными симметричными составляющими в трехфазной части схемы следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_0 &= 0, \\ \dot{i}_1 &= -3\dot{i}_{01} + (a - a^2)\dot{i}_{11}, \\ \dot{i}_2 &= -3\dot{i}_{02} + (a^2 - a)\dot{i}_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Соответствующие соотношения для напряжений будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\frac{2}{3}\dot{U}_{01} = \frac{2}{3}(a - a^2)\dot{U}_{11}, \\ \dot{U}_2 &= -\frac{2}{3}\dot{U}_{02} = \frac{2}{3}(a^2 - a)\dot{U}_{12}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

отсюда

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{11} &= \frac{1}{3}(a - a^2)\dot{U}_{01}, \\ \dot{U}_{12} &= \frac{1}{3}(a^2 - a)\dot{U}_{02}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Приведенные соотношения действительны для всех режимов рассматриваемой схемы.

Допустим, что при нормальном режиме шестифазной линии электропередачи, связывающей

шины двух подстанций, соединенных по схеме рис. 1, в двух воздушных проводах одной из схем ДПЗ, которую примем в качестве начальной «обобщенной» фазы сложной системы, текут токи i'_m и i'_n . Ввиду симметричности схемы в воздушных проводах двух других схем ДПЗ токи будут сдвинуты на угол, определяемый трехфазными операторами последовательностей a^2 и a . Также будут сдвинуты и двухфазные симметричные составляющие в этих двух схемах ДПЗ по отношению к первой.

Образовав групповые симметричные составляющие для этого режима, получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_{00} = \dot{i}_{02} = \dot{i}_{10} = \dot{i}_{12} &= 0, \\ \dot{i}_{01} &= \dot{i}'_0, \\ \dot{i}_{11} &= \dot{i}'_1, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где \dot{i}'_0 и \dot{i}'_1 — двухфазные симметричные составляющие токов первой схемы ДПЗ.

Падения напряжения от этих составляющих при условии, что все шесть трансформаторов имеют одинаковую мощность и одинаковые параметры, могут быть выражены следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\dot{U}_{00} = \Delta\dot{U}_{02} = \Delta\dot{U}_{10} = \Delta\dot{U}_{12} &= 0, \\ \Delta\dot{U}_{01} &= \dot{i}_{01}(Z_a + 6Z_{\kappa}), \\ \Delta\dot{U}_{11} &= \dot{i}_{11}(Z_a + 2Z_{\kappa}). \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Используя свойство схемы, определяемое условием (21) применительно к падению напряжения, получим:

$$\dot{i}_{11} = \frac{1}{3}(a - a^2)\dot{i}_{01} \frac{Z_a + 6Z_{\kappa}}{Z_a + 2Z_{\kappa}}. \quad (24)$$

Принимая во внимание (22) и (24), из соотношений (19) будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} i_0 = i_2 = 0, \\ i_1 = -4i_{01} \frac{Z_A + 3Z_K}{Z_A + 2Z_K} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Используя (23) и (25), из уравнений (20) получим:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U}_1 &= \frac{1}{6} i_1 \frac{Z_A + 6Z_K}{Z_A + 3Z_K} (Z_A + 2Z_K), \\ \Delta \dot{U}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Из рассмотренного видно, что при нормальном режиме эта схема электропередачи не вызывает асимметрии токов и напряжений в своих трехфазных частях. Однако в каждом из трансформаторов, образующих схему, будет иметь место асимметрия токов. Это видно из следующего. Образуя трехфазные симметричные составляющие токов, протекающих в одном из трансформаторов, получим:

$$\left. \begin{aligned} i_1' &= -i_{01} + \frac{1}{3} (a - a^2) i_{11}, \\ i_2' &= -i_{01} + \frac{1}{3} (a^2 - a) i_{11} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

и используя соотношение (24), будем иметь:

$$\left| \frac{i_2'}{i_1'} \right| = \frac{1}{2} \frac{Z_A}{Z_A + 3Z_K}. \quad (28)$$

Падение напряжения в трансформаторах на обоих концах передачи

$$\Delta \dot{U}' = -\frac{2}{3} i_1 Z_K. \quad (29)$$

Вычтя (29) из (26), получим падение напряжения только в линии:

$$\Delta \dot{U}_1 = \frac{1}{6} i_1 Z_A \frac{Z_A + 4Z_K}{Z_A + 3Z_K}. \quad (30)$$

Это выражение аналогично выражению (10). Если под Z_2' понимать Z_K , то, пользуясь обозначениями (12), получим потерю линейного напряжения:

$$\Delta U_A = \frac{\sqrt{3}}{6} I \frac{|Z_A| |Z''|}{|Z''|} \cos(\varphi' + \varphi'' - \varphi''' - \varphi). \quad (31)$$

По аналогии с предыдущим примером рассмотрим шестипроводную электропередачу длиной 70 км, имеющую на каждом конце по три трехфазных трансформатора напряжением на линейной стороне 35 кВ, мощностью по 3 200 кВА. Линия выполнена проводами марки АС-35. В этом случае

$$\begin{aligned} Z_A &= 70e^{j25^\circ}, \\ Z'' &= 157e^{j59^\circ}, \\ Z''' &= 134e^{j55^\circ}. \end{aligned}$$

При передаваемой по линии мощности 7 250 кВА и токе в трехфазных частях схемы 120 а потеря напряжения составляет:

$$\begin{aligned} \Delta U_A &= \frac{\sqrt{3}}{6} 120 \frac{70 \cdot 157}{134} \cos(25^\circ + 59^\circ - 55^\circ - 37^\circ) = \\ &= 2800 \text{ в, или } 8\%. \end{aligned}$$

Для сравнения можно указать, что если эта линия будет использована, как обычная двухцепная, напряжением 35 кВ, при той же величине потери напряжения (в %) по ней можно будет передать лишь 2 870 кВА, т. е. в 2,5 раза меньше.

Подобно предыдущему могут быть написаны условия и составлены комплексные схемы для различных аварийных режимов. В качестве примера на рис. 7 представлена комплексная схема для случая обрыва двух проводов или отключения одного из трехфазных трансформаторов. При этом в схемах последовательностей 01, 02, 11 и 12 введены дополнительные э. д. с. в соответствии с (20), а при определении токов должны быть использованы соотношения (19).

Пользуясь комплексными схемами, можно определить асимметрию токов, ток в земле и пропускную способность линии при аварийных режимах. Подсчеты показывают, что при отключении одного из проводов асимметрия токов будет в 5—8 раз меньше, чем при отключении провода в обычной трехфазной линии при глухозаземленных нейтралях трансформаторов сети.

Примененные в настоящей статье групповые составляющие являются симметричными, как

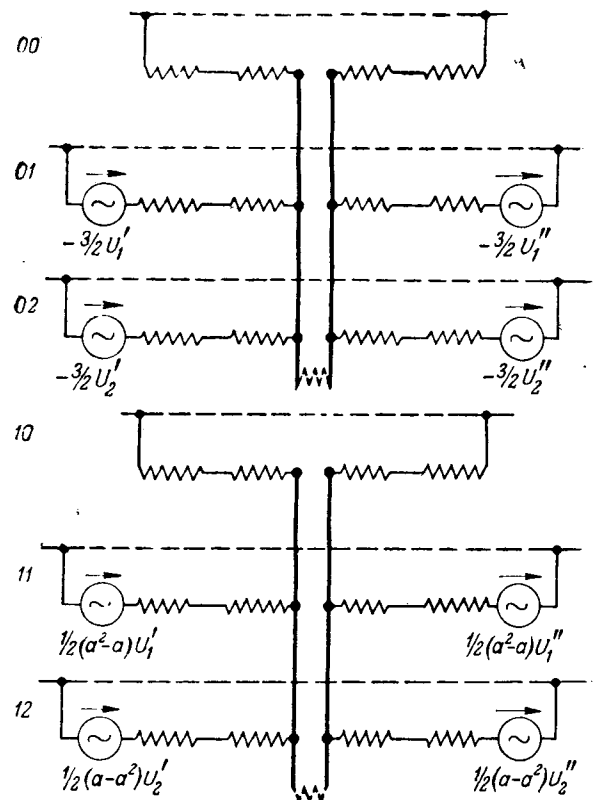


Рис. 7. Комплексная схема для случая отключения одного трансформатора.

в этом легко убедиться из рассмотрения их векторных диаграмм для всех проводов системы. Однако они в общем случае отличаются от n -фазных симметричных составляющих; разложение на симметричные составляющие возможно не единственным способом. Между обеими системами симметричных составляющих легко может быть установлена связь.

Различие между трехфазными групповыми составляющими от двухфазных составляющих и шестифазной системой составляющих заключается лишь в том, что следование фаз неодинаковое. Действительно, принимая соответствие фаз: $m'—a$, $n'''—b$, $m''—c$, $n'—d$, $m''—e$, $n''—f$, будем иметь соответствие симметричных составляющих: 00—0, 11—1, 02—2, 10—3, 01—4, 12—5.

В других случаях, как, например, при двухфазных групповых составляющих от двухфазных составляющих, такого соответствия между групповыми составляющими и обычными симметричными составляющими n -фазной системы нет.

В схеме рис. 3 к отходящим от шестифазных шин линиям ДПЗ могут быть приложены двухфазные симметричные составляющие, к трехфазным трехпроводным линиям — трехфазные составляющие, а к линиям по схеме сдвоенного ДПЗ — групповые двухфазные составляющие от двухфазных. В более общем случае такие линии могут ответвляться от шестифазной магистральной. Применительно к точкам ответвления этих линий от шестифазной системы могут быть легко выведены формулы перехода от одних симметричных составляющих к другим.

В связи с асимметрией токов согласно (28) при шестифазной симметричной нагрузке заземленные фазы трансформаторов загружены несколько больше, чем незаземленные. Загрузка этих фаз трансформаторов будет еще больше, если линии ДПЗ будут включены к двум соседним фазам двух разных трансформаторов (например, на фазы n' и m'' и т. д.). Поэтому линии ДПЗ целесообразнее включать к фазам одних и тех же трансформаторов. Повышенная загрузка током заземленных фаз трансформаторов по сравнению с незаземленными вызывается также включением линий по схеме сдвоенного

ДПЗ. Наконец, причиной перегрузки заземленных фаз трансформаторов является включение трехфазных шин к нейтралам трансформаторов (рис. 3).

Рассмотрим симметричную шестифазную электропередачу при одновременном использовании трехфазных шин для трехфазной электропередачи с током i_c . Если общая нагрузка в трехфазной части схемы от шестифазной и трехфазной электропередач будет I_1 , то, определяя загрузку током отдельных фаз одного из трансформаторов и разлагая токи на трехфазные симметричные составляющие (заземленная фаза трансформатора — начальная фаза), получим для трансформатора

$$\frac{i_2'}{i_1'} = \frac{1}{2} \frac{Z_A}{Z_A + 3Z_K} + \frac{1}{2} \frac{i_c Z_A + 6Z_K}{i Z_A + 3Z_K}. \quad (32)$$

Очевидно, использование трехфазных шин, включенных к нейтралам трансформаторов, допустимо при относительно небольших нагрузках трехфазных линий по сравнению с шестифазными.

При большом неравенстве нагрузок заземленных и незаземленных фаз этот недостаток схемы может быть исправлен путем включения дополнительного трехфазного трансформатора, группа соединений которого отличается на 6 час (сдвиг векторов на 180°) от группы соединений основных трансформаторов. Обмотки высшего напряжения этого трансформатора приключаются к трехфазным шинам, а нейтраль заземляется (рис. 3). При наличии такого трансформатора, мощность которого должна быть выбрана в соответствии с условиями загрузки заземленных фаз, возможно более широкое использование трехфазных шин, включение линий ДПЗ к фазам разных трансформаторов на шестифазной стороне, а также более широкое использование ответвлений по схеме сдвоенного ДПЗ.

Литература

1. Л. Е. Эбин. Сети с использованием земли в качестве провода. Электрические станции, № 8, 1939.
2. Л. Е. Эбин и Ш. М. Алукер. Руководство по электрическому расчету трехфазных сетей с использованием земли в качестве одного из проводов. Изд. ВИМЭ и Главсельэлектро, 1940.

[2. 7. 1951]



Некоторые вопросы конструирования четырехпроводных линий электропередачи

Инж. В. В. ОВСЕЕНКО

Теплоэлектропроект

После преобразования обычной трехфазной линии 35 кВ в четырехпроводную¹ напряжения между фазами последней будут равны (рис. 1):

$$U_{1-2} = U_{3-4} = U_A = 35 \text{ кВ};$$

$$U_{1-3} = U_{2-4} = 2U_A = 70 \text{ кВ};$$

$$U_{2-3} = U_{1-4} = \sqrt{3}U_A = 60,5 \text{ кВ}.$$

Напряжение всех фаз по отношению к земле повысится в $\sqrt{3}$ раз и составит 35 кВ. Самое высокое напряжение будет между первой и третьей, второй и четвертой фазами. Величинами этих напряжений определяются расстояния между проводами и порядок их расположения на опоре.

Из возможных случаев реконструкции наиболее вероятным будет реконструкция линии 35 кВ на деревянных опорах без тросов с горизонтальным расположением проводов. Промежуточные опоры на таких линиях обычно бывают П-образного типа, а анкерные и угловые АП-образного типа. Расстояние между проводами около 3 м, а длина пролета порядка 200 м.

Прежде всего следует установить, допустимо ли при преобразовании трехфазной линии 35 кВ в четырехпроводную сохранение имеющихся рас-

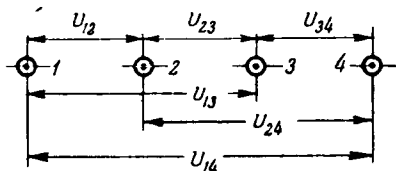


Рис. 1.

стояний между проводами и между проводами и опорой.

Ввиду отсутствия отечественных нормативов для напряжений 60 и 70 кВ, этот вопрос приходится решать на основании данных, полученных путем интерполяции расстояний, нормированных для напряжений 35 и 110 кВ, а также на основании данных существующих отечественных линий

¹ См. в настоящем номере статьи В. В. Андреева и А. А. Фильштинского.

Рассмотрены вопросы: о допустимых расстояниях между проводами четырехпроводной линии, об использовании опор трехфазной линии 35 кВ для четырехпроводной линии и о возможной их реконструкции, о типах новых опор для четырехпроводной линии. Дана ориентировочная стоимость четырехпроводной линии для двух типов опор.

60 кВ и линий 110 кВ, построенных в 1933—1934 гг. и имеющих расстояния, значительно меньшие, чем установленные действующими нормами для 110 кВ.

В табл. I приведены расстояния для линий напряжением 35 и 110 кВ с длиной пролетов 170...200 м согласно Правилам устройства электротехнических установок 1947 г. и расстояния, принятые для рассматриваемой четырехпроводной линии.

Из табл. I видно, что принятые расстояния между проводами и опорой четырехпроводной линии достаточны, горизонтальные же расстояния между проводами следовало бы увеличить на 15%. Однако практика строительства и эксплуатации линий 60 кВ показывает, что для I и II районов климатических условий возможно сохранить расстояния между проводами порядка 300 см при наличии АПВ и дугогасящих катушек для компенсации емкостного тока на землю.

Например, в одной из энергосистем, находящейся во II районе климатических условий, при восстановлении линий 60 кВ на железобетонных двухцепных опорах с пролетами 170...200 м расстояния между проводами, равные 2,8 м, были оставлены без изменения. Одна из этих линий длиной 63 км имеет тросовую защиту только на подходах к подстанциям. Для компенсации емкостного тока на землю в сети установлены дугогасящие катушки 60 кВ. Другая линия длиной 50 км с такими же защитными средствами имеет расстояние между проводами 3 м.

В другой энергосистеме, расположенной в центральной части СССР, с 1933 г. эксплуатируются линии 110 кВ на опорах П-образного и АП-образного типов без тросов с расстоянием между проводами 325 см при среднем пролете 170 м. С конца 1950 г. одна из этих линий имеет расщепленные провода с расстоянием между проводами одной фазы 40 см. Расстояние между фазами на этой линии уменьшилось, следовательно до 2,85 м. Линии оборудованы АПВ.

Таблица 1

	Расстояния согласно Правилам устройства электротехнических установок 1947 г.		Расстояния, принятые для рассматриваемой четырехпроводной линии
	35 кв	110 кв	
Расстояния между проводами разных фаз по горизонтали, см	300	375	300
Расстояния от провода до опоры, требуемые по условиям координации изоляции при внутренних перенапряжениях	22	65	90...100
Расстояния от провода до опоры, требуемые по условиям координации изоляции при атмосферных перенапряжениях	50	100	100...110

Примечание. Принята гирлянда из 3-х изоляторов П-4,5 и провод марки АС-55 или АС-120.

Приведенные примеры указывают, что при условии применения АПВ и дугогасящих катушек для компенсации емкостного тока на землю реконструкция трехфазной линии 35 кв в четырехпроводную может быть осуществлена следующим образом.

В I и II районах климатических условий при пролетах до 200 м положение трех проводов на опоре (первой, второй и третьей фаз) остается без изменения; для размещения четвертого провода пристраивается дополнительная траверса на стойках, прикрепляемых к вершинам опор (рис. 2, а). Расстояние между вторым и четвертым про-

водами по условиям их работы в пролете должно быть не менее 2,7...3,0 м. Такое размещение проводов на опоре позволяет сохранить имеющуюся траверсу, не перемонтировать уже подвешенные провода и, как показали расчеты, в ряде случаев не производить усиления опор. Последнее будет иметь место, например, при реконструкции опор, рассчитанных по нормам 1933 г. на подвеску провода в глухих зажимах. Эти опоры имеют большие запасы прочности, чем опоры, рассчитанные по нормам 1947 г. Подвеска четвертого провода по середине опоры дает незначительное увеличение нагрузки.

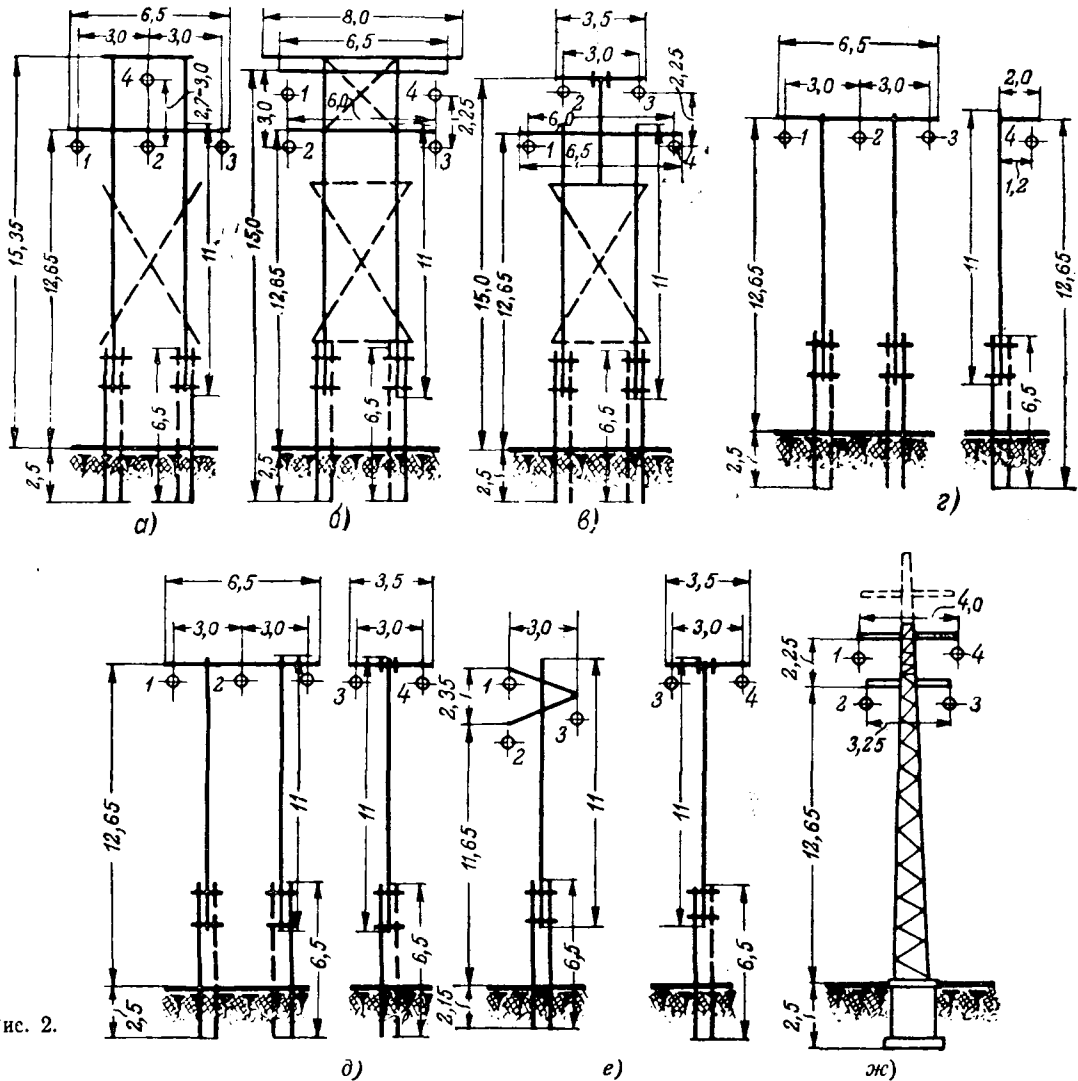


Рис. 2.

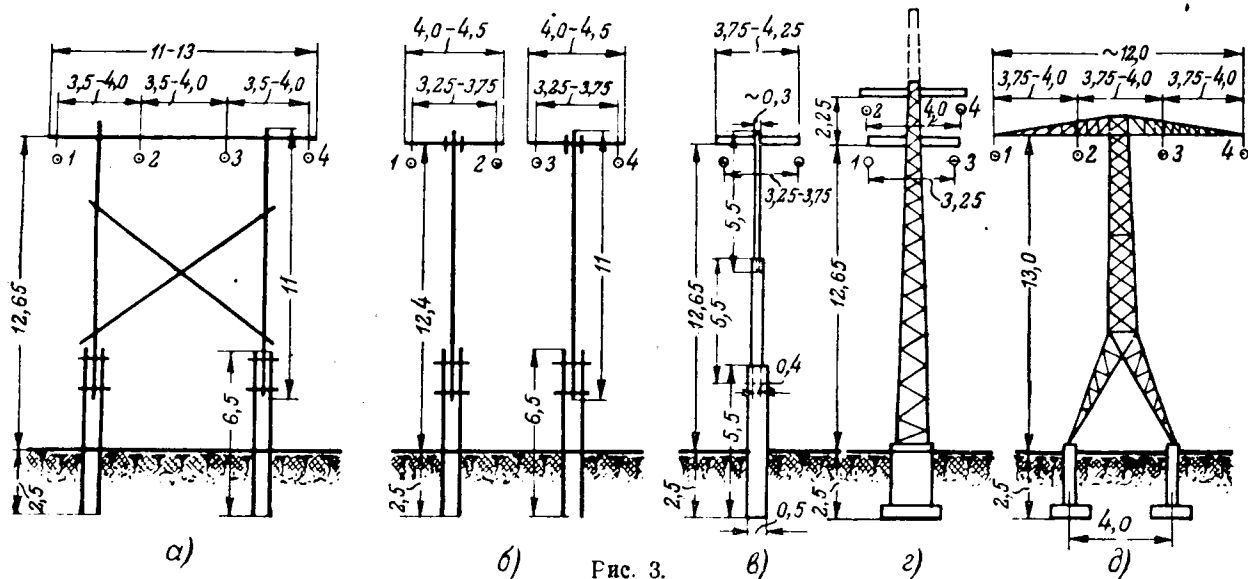


Рис. 3.

В тех случаях, когда реконструкции будет подвергаться линия электропередачи 35 кВ с типовыми опорами 1950 г., последние следует усилить раскосами или накладками (на рис. 2 показаны пунктиром). Но прежде чем это делать, полезно рассмотреть возможность замены глухих зажимов выпускающими, что, как известно, дает снижение напряжений в опоре для средних и крупных марок проводов, в особенности.

Для анкерных и угловых опор условия расчета будут другими, так как в качестве обрываемого провода придется принять кроме одного из крайних проводов четвертый провод, имеющий более высокую точку подвески. При такой расчетной схеме требуется усилить основания опор дополнительными ригелями, устанавливаемыми на глубине 0,5 м от поверхности земли.

Расстояния между проводами, показанные на рис. 2, а, недостаточны для районов с повышенной скоростью ветра. В этих районах для линий с сечением проводов до 70 мм² могут быть применены опоры, схемы которых представлены на рис. 2, б, в.

Вследствие увеличения расчетных нагрузок промежуточные опоры необходимо усилить раскосами и накладками, а основания их — дополнительными ригелями. Также необходимо усилить анкерные и угловые опоры.

В III—IV климатических районах из-за необходимости еще более увеличить вылет верхней траверсы во избежание схлестывания проводов при сильных ветрах и гололедах усилия в опоре (рис. 2, б) при обрыве крайнего верхнего провода настолько увеличиваются, что опора без коренной реконструкции не может быть применена. Для линий с крупными марками проводов придется для усиления устанавливать растяжки вдоль оси трассы.

Таким образом, переустройство по схеме рис. 2, б получается тяжелым, требующим значительных затрат рабочей силы и древесины. Поэтому в III—IV климатических районах целесообразно применять опоры, схема которых показана на рис. 2, г, д. Особенность двух последних схем за-

ключается в том, что дополнительно сооружается одноствоечная опора, на которой подвешивается четвертый провод или два провода (третий и четвертый).

По этим же схемам целесообразно осуществить реконструкцию опор на подходах к подстанциям, на которых обычно подвешиваются два защитных троса. При этом защитный трос дополнительно подвешивается на одноствоечной опоре.

Применение схемы с одноствоечной опорой позволяет уменьшить время отключения линии при ее реконструкции в четырехпроводную и сохранить надежность защиты подстанции от атмосферных перенапряжений. Последнюю можно выполнить путем применения разрядников взамен тросов, а также использования четвертого провода взамен одного из тросов. Однако эти варианты, являясь более экономичными, менее надежны и требуют значительного времени на отключение линии при ее реконструкции.

Опора, реконструированная по схеме рис. 2, а, не позволяет проводить ремонт линии под напряжением. Однако возможность временного перехода на режим трехфазной линии существенно облегчает ремонт четырехпроводной линии. Пораженная фаза может быть обесточена и для увеличения расстояний от токоведущих частей опущена на время ремонта на монтажные кронштейны, прикрепляемые к стойкам опоры. Условия ремонта могут быть улучшены применением опор, реконструированных по схеме рис. 2, б. Эти опоры позволяют ремонтировать любой провод под напряжением при временной работе линии по трехфазной схеме. Например, для ремонта провода 1 отключается провод 2. Ремонт четырехпроводных линий с опорами по схемам рис. 2, г, д, е, могут также с успехом проводиться при временной ее работе по трехфазной схеме.

На рис. 2, е приведена схема переустройства одноствоечных опор с треугольным расположением проводов, получивших довольно широкое распространение в период Великой Отечественной войны. В зависимости от степени надежности энергоснабжения потребителей эта схема может

Таблица 2

Тип опоры	Расход дерева на одну промежуточную опору, м ³	Расход металла на одну промежуточную опору, т	Стоимость 1 км линии, тыс. руб.
Четырехпроводная деревянная с горизонтальным расположением проводов	4,0—4,2	—	70—75
Четырехпроводная деревянная с горизонтальным расположением проводов в виде двух одноствоечных опор	3—3,3	—	65—70
Одноствоечная деревянная с горизонтальным расположением проводов для трехфазной линии 35 кв	2,2—2,4	—	55
Четырехпроводная, металлическая с вертикальным расположением проводов	—	2—2,5	95—100
Одноствоечная металлическая с вертикальным расположением проводов для трехфазной линии 35 кв	—	1,5—2,0	78—81

Примечание. Стоимость 1 км линии определена по средневзвешенным показателям при средних марках проводов (АС-95, АС-120) для II района климатических условий.

быть применена с подвеской на одноствоечной опоре или одного четвертого провода или двух проводов (третьего и четвертого).

Реконструкция металлической опоры, рассчитанной на подвеску двух цепей трехфазной линии, может быть осуществлена по схеме рис. 2,ж. Следует заметить, что такая схема позволяет ограничиться применением одного троса вместо обычно применяемых в последнее время на таких опорах двух тросов. При этом верхняя траверса демонтируется, а стойка опоры наращивается.

При проектировании новых четырехпроводных опор вопрос о расстояниях между проводами и между проводами и опорой для напряжений 60 и 70 кв может решаться или путем принятия расстояний, установленных для напряжения 110 кв, или путем принятия расстояний, полученных на основе интерполяции между расстояниями, установленными для напряжений 35 и 110 кв. Очевидно, более экономичным является второе решение. Тогда для линий с пролетами до 200 м, расположенных в I и II районах климатических условий, горизонтальное расстояние между проводами должно быть не меньше 325 см, а для тех же линий в III и IV районах — не меньше 375 см. Расстояние же от провода до опоры по условиям координации изоляции при внутренних перенапряжениях должно быть не меньше 50 см, а при атмосферных перенапряжениях 80 см.

Из многочисленных типов опор в I и II районах могут быть применены опоры, изображенные на рис. 3,б,г. Конструкции этих опор просты и не требуют пояснений. Следует лишь отметить, что при конструировании четырехпроводной опоры для I и II районов климатических условий может быть создана экономичная опора с одним тросом и защитным углом порядка 25° (рис. 3,г). Экономичными являются и одноствоечные опоры с двумя проводами, поскольку количество тросов в целом на линию сохраняется, тогда как при сооружении трехфазной двухцепной линии на одноствоечных двухпроводных опорах потребуется дополнительный расход троса по сравнению с линией на опорах с вертикальным расположением проводов (три троса вместо двух).

Преимущество одноствоечных опор по сравнению с опорами, показанными на рис. 3,а, заключается в значительной экономии длинномерного леса при их сооружении. При горизонтальном расположении проводов, как это показано на рис. 3,а, при средних и крупных марках проводов опоры в отношении затраты длинномерного леса получаются чрезвычайно тяжелыми. Поэтому применение их, особенно в III и IV районах климатических условий, нельзя признать целесообразным. Для этих районов, большей частью не имеющих своего леса, наряду с одноствоечными деревянными опорами следует применять одноствоечные опоры из центробежного железобетона, показанные на рис. 3,в.

Основные ориентировочные показатели некоторых типов опор и стоимость 1 км четырехпроводной линии при их применении приведены в табл. 2.

Выводы. 1. Реконструкция опор трехфазной линии 35 кв для применения их на четырехпроводной линии в I и II районе климатических условий может быть осуществлена при помощи установки на них второй, верхней траверсы и усиления опор раскосами, а их оснований — ригелями. В случае недопустимости перерывов энергоснабжения потребителей следует рассмотреть вариант с одноствоечными опорами для подвешивания на них четвертого провода. Такое же решение следует применить для III и IV районов.

2. Разработка новых экономичных типов опор для четырехпроводной линии не представляет особых затруднений, за исключением деревянных опор для III и IV районов климатических условий. Чтобы избежать расходования большого количества длинномерного леса и в связи с необходимостью экономии металла, для этих районов целесообразно разработать опоры из центробежного железобетона.

3. Необходимо ускорить разработку нормативов для напряжений 60 и 70 кв.

4. Увеличение капитальных затрат на строительство четырехпроводной линии по сравнению с трехфазной линией 35 кв может быть ориентировочно определено в 25.. 30%.

[8. 9. 1951]



Электрокинетическое объяснение законов магнитостатики

Кандидат физ.-матем. наук, доц. Б. А. САДИКОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Исторически сложилось так, что задачи магнитостатики были разрешены на основе закона

Кулона о взаимодействии магнитных масс. Магнитные массы считались источниками магнитного поля, а их носителями — постоянные магниты. Выводы, полученные при таком описании магнитных явлений, были далее распространены и на описание явлений взаимодействия магнитов и электрических токов. При этом было установлено, что источником магнитного поля является также и электрический ток.

Современная теория доказывает, что магнитное поле вызывается электрическим током, либо спином электрона, поле которого может быть сведено к полю электрических токов. Отсюда вытекает, что задачи магнитостатики должны разрешаться на основе электрокинетической трактовки магнитных явлений. Указание на такое решение имеется в литературе¹. В. К. Аркадьев дал решение некоторых вопросов, проведенное с помощью допущений и предположений. В настоящей статье дается дальнейшее развитие электрокинетической трактовки явлений и последовательное решение основных задач магнитостатики.

Как известно, изучение явлений взаимодействия токов приводит к установлению факта существования магнитного поля токов, мерой которого является магнитная индукция поля B , характеризующая силовое действие поля. Величина B определяется током i , размерами и конфигурацией проводника и магнитными свойствами среды, определяемой магнитной проницаемостью μ , которая для вакуума в системе MKSA и рациональной форме записи равна:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м.}$$

Величина магнитной индукции тока рассчитывается с помощью закона, определяющего

Развивается электрокинетическая трактовка магнитных явлений. Предлагается соответствующее решение основных задач магнитостатики.

индукцию магнитного поля элемента тока:

$$dB = \mu_0 \frac{idl}{4\pi R^2} \sin \alpha,$$

где α — угол между направлением элемента тока idl и направлением радиуса вектора R .

Расчет магнитной индукции кругового тока радиусом r в его центре дает:

$$B = \mu_0 \frac{i}{2r}. \quad (1)$$

Индукция кругового тока в точке A , расположенной на перпендикуляре, восстановленном к плоскости круга в его центре, на расстоянии R от плоскости круга (рис. 1), равна:

$$B = \mu_0 \frac{2iS}{4\pi (R^2 + r^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где S — площадь, охваченная контуром тока. В случае, когда $R \gg r$, приближенно можно принять:

$$B = \mu_0 \frac{2iS}{4\pi R^3}. \quad (3)$$

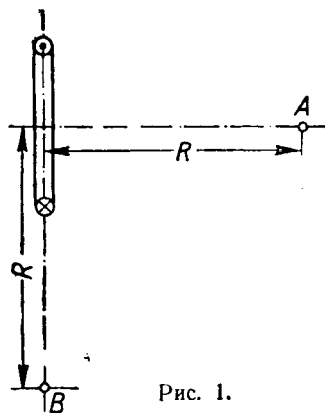


Рис. 1.

Введя понятие магнитного момента кругового тока $\vec{M} = i\vec{S}$, получим:

$$B = \mu_0 \frac{2M}{4\pi R^3}. \quad (4)$$

¹ В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах, ч. 1, § 24–33. Объединенное научно-техническое издательство, НКТП, 1935.

Индукция того же тока в точке B , находящейся на расстоянии R от центра кругового тока на линии, перпендикулярной оси кругового тока, равна:

$$B = \mu_0 \frac{M}{4\pi R^3}. \quad (5)$$

Полученные формулы (4) и (5) полностью соответствуют формулам для расчета индукций магнитных полей, созданных коротким магнитом, который рассматривался как магнитный диполь².

Для соленоида, имеющего n круговых токов (витков) на единицу длины, индукция на оси соленоида равна:

$$B = \frac{\mu_0 in}{2} (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2), \quad (6)$$

где φ_1 и φ_2 — углы между радиусом витка и линией, соединяющей рассматриваемую точку с круговым током, находящимся на конце соленоида (рис. 2).

В центре соленоида при $l \gg r$, где l — длина соленоида и r — радиус витка, имеем: $\sin \varphi_1 = \sin \varphi_2 = 1$.

В таком случае

$$B = \mu_0 in. \quad (7)$$

В точке A , находящейся на конце соленоида, где $\sin \varphi_1 = 0$, а $\sin \varphi_2 = 1$, получаем:

$$B = \frac{\mu_0 in}{2}. \quad (8)$$

Индукция в точке C , находящейся вне соленоида на его оси на расстоянии R от конца соленоида, будет равна:

$$B = \frac{\mu_0 in}{2} (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1). \quad (9)$$

Если $l \gg R$, то тогда $\sin \varphi_2 = 1$ и вместо формулы (9) получим:

$$B = \frac{\mu_0 in}{2} (1 - \sin \varphi_1). \quad (10)$$

Заменим $\sin \varphi_1$ через $\frac{R}{\sqrt{R^2 + r^2}}$ и учтем, что при $R \gg r$ имеем:

$$\frac{R}{\sqrt{R^2 + r^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{R^2}}} = 1 - \frac{r^2}{2R^2}.$$

Подставим полученное значение для $\sin \varphi_1$ в формулу (10), тогда

$$B = \mu_0 \frac{in r^2}{4R^3}, \quad (11)$$

а умножая числитель и знаменатель на π , приходим к выражению

$$B = \mu_0 \frac{inS}{4\pi R^3}, \quad (12)$$

где S — сечение соленоида.

Величина inS есть магнитный момент единицы длины соленоида, а $\mu_0 inS$ есть поток магнитной индукции Φ , который при заданных

² Для магнитного диполя $M = m \cdot l$, где m — магнитная масса и l — длина диполя.

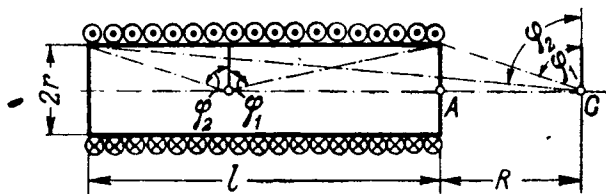


Рис. 2.

выше условиях можно считать неизменным по всей длине соленоида. Нарушением однородности потока индукции на концах соленоида можно пренебречь, так как для длинного и тонкого соленоида оно наблюдается на участке, размеры которого малы по сравнению с R . В таком случае

$$B = \frac{\Phi}{4\pi R^2}. \quad (13)$$

Можно доказать, что при тех же условиях индукция убывает пропорционально R^2 не только вдоль оси соленоида, но и по другим направлениям, т. е. магнитное поле у конца длинного и тонкого соленоида можно рассматривать как радиальное.

Как известно, такой же результат получается для индукции, созданной тонким длинным магнитом вблизи его концов, если m заменить через $\Phi : 4\pi$.

В свою очередь, для короткого соленоида ($l \ll R$) имеем:

$$\sin \varphi_2 = \frac{R+l}{\sqrt{(R+l)^2 + r^2}},$$

или, проведя приближенный расчет, получим:

$$\frac{R+l}{\sqrt{(R+l)^2 + r^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{(R+l)^2}}} = 1 - \frac{r^2}{2(R+l)^2}.$$

Подставляя в формулу (9) полученные значения $\sin \varphi_2$ и $\sin \varphi_1$, имеем:

$$B = \frac{\mu_0 in}{2} \left(1 - \frac{r^2}{2(R+l)^2} - 1 + \frac{r^2}{2R^2} \right) = \frac{\mu_0 in}{2} \frac{r^2}{2R^2} \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{l}{R}\right)^2} \right) = \frac{2\mu_0 inr^2 l}{4R^3}.$$

Умножив числитель и знаменатель этого выражения на π , получим:

$$B = \frac{2\mu_0 inSl}{4\pi R^3}$$

или

$$B = \mu_0 \frac{2iSN}{4\pi R^3}, \quad (14)$$

где N — общее число витков соленоида.

Этот результат может быть представлен в виде:

$$B = \mu_0 \frac{2M}{4\pi R^3},$$

где $M = iSN$ — магнитный момент соленоида. Тогда полученное совпадает с формулой (4).

Подставляя в формулу (14) поток индукции Φ , окончательно имеем:

$$B = \frac{2\Phi l}{4\pi R^3}, \quad (15)$$

Формула (15) совпадает с формулой для индукции короткого магнита при замене m через $\Phi: 4\pi$.

Все эти результаты пригодны лишь для тонких соленоидов. В других случаях расчет усложняется, так как при этом следует учитывать изменение потока индукции Φ вдоль соленоида, которое обусловлено уменьшением индукции к концу соленоида, что вытекает из формулы (9). Как показывает расчет, индукция внутри катушки, боковая поверхность которой является поверхностью эллипсоида вращения, остается неизменной по всей длине катушки, а уменьшение потока индукции к концам катушки обусловлено лишь уменьшением ее сечения.

Наконец, можно изготовить катушку, индукция B внутри которой увеличивается к ее концам. Наибольший интерес представляет собой цилиндрическая катушка, имеющая такое конусообразное окончание, при котором наблюдается максимальное усиление индукции к концам катушки.

Для определения угла между образующей конуса такой катушки и его осью, а также выяснение причин увеличения индукции проведем такие рассуждения.

Возьмем круговой ток радиуса r_1 . Из формулы (1) следует, что если радиус этого круга уменьшить до величины r_2 , то при неизменной силе тока индукция в центре кругового тока увеличится. Увеличение индукции будет наблюдаться также и в точках, лежащих на перпендикуляре, восстановленном к плоскости кругового тока, но удаленных от центра этого тока не далее расстояния R_0 ; на больших расстояниях индукция будет меньше, чем для кругового тока радиуса r_1 (рис. 3). Расчет расстояния R_0 до точки, в которой индукции обоих круговых токов равны, приводит к следующему результату:

$$R_0 = \frac{r_2 a^{1/2}}{\sqrt{1 + a^{1/2}}},$$

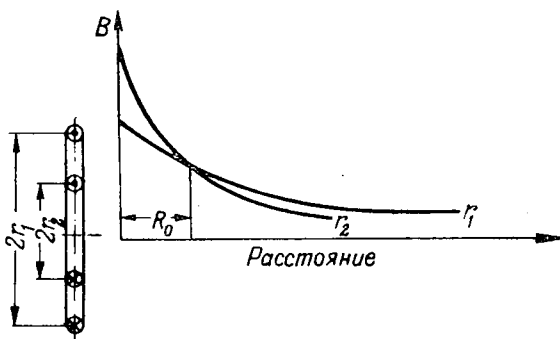


Рис. 3.

где

$$a = \frac{r_1}{r_2}.$$

На рис. 3 даны кривые распределения индукции вдоль перпендикуляра к плоскости кругового тока, полученные для круговых токов радиусов r_1 и r_2 .

Возьмем далее круговой ток и некоторую точку A на перпендикуляре, расположенную на некотором расстоянии R от плоскости кругового тока (рис. 4); ясно, что при непрерывном уменьшении радиуса кругового тока индукция в этой точке вначале будет расти, а затем убывать. Для определения величины радиуса кругового тока, при котором в рассматриваемой точке будет наибольшая по величине индукция, следует решить задачу на максимум для индукции B , где B определяется по формуле (2). Решение дает:

$$r = \sqrt{2}R.$$

Если теперь помещать новые круговые токи на поверхности конуса, основанием которого служит 1-й ток, а вершиной точка A , то эти новые токи со своей стороны создадут в точке A наибольшую по величине индукцию. Следовательно, для получения наибольшей индукции в точке A при заданном токе i катушка такой конфигурации является оптимальной.

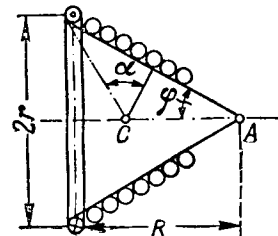


Рис. 4.

Нетрудно заметить, что угол $\varphi = \arctg \sqrt{2}$, т. е. $\varphi = 54^\circ 44'$. Из опыта известно, что для увеличения индукции между концами электромагнита последние снабжают железными конусообразными наконечниками, имеющими такой же угол.

Расчет индукции в точке c , лежащей на оси катушки такой конфигурации (рис. 4), при токе i и n витках на единицу длины образующей конуса приводит к результату

$$B = \frac{\mu_0 n i}{2} \left[\sin(2\varphi + \alpha) + \sin^2 \varphi \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha}{2} \right) \right], \quad (16)$$

где α — угол между перпендикуляром, опущенным на образующую, и линией, проведенной из точки c к контуру тока, который находится в основании конуса.

Переходим к расчету взаимодействия токов. Метод расчета, используемый здесь, основан на том, что круговой ток или соленоид, находящийся в неоднородном поле другого тока,

испытывает со стороны поля воздействие,* которое может вызвать его поступательное движение. Перемещение кругового тока на расстояние dR приводит к изменению его потенциальной энергии на величину, равную:

$$dW = -FdR, \quad (17)$$

откуда

$$F = -\frac{dW}{dR}. \quad (18)$$

Известно, что потенциальная энергия кругового тока, который расположен под углом φ к полю, равна:

$$W = -MB \cos \varphi, \quad (19)$$

где M — магнитный момент тока.

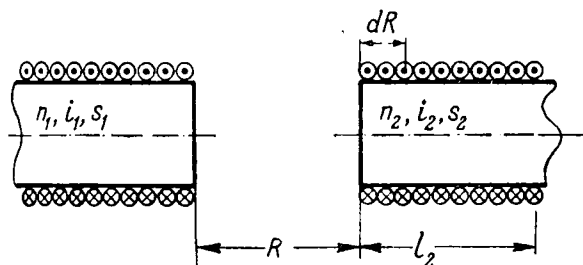


Рис. 5.

Следовательно, при $\varphi = 0$ имеем:

$$F = -M \frac{dB}{dR}. \quad (20)$$

Применяя формулу (20) для расчета взаимодействия двух круговых токов с магнитными моментами M_1 и M_2 с учетом формулы (4), получим:

$$F = -M_1 \frac{d \left(\frac{2M_2 \mu_0}{4\pi R^3} \right)}{dR} = \mu_0 \frac{6M_1 M_2}{4\pi R^4}. \quad (21)$$

Расчет взаимодействия коротких соленоидов, имеющих магнитные моменты $M_1 = i_1 S_1 N_1$ и $M_2 = i_2 S_2 N_2$, приводит к такому же результату.

Как известно, аналогичный результат получен для взаимодействия коротких магнитов. Если учесть, что $\mu_0 i_1 S_1 N_1 = \Phi_1 l_1$ и $\mu_0 i_2 S_2 N_2 = \Phi_2 l_2$, где Φ_1 и Φ_2 — потоки индукции соленоидов, а l_1 и l_2 — их длины, то тогда для коротких и тонких соленоидов вместо формулы (21) получим:

$$F = \frac{6\Phi_1 \Phi_2 l_2}{\mu_0 4\pi R^4}. \quad (22)$$

Для длинного и тонкого соленоида, имеющего i_1 , n_1 , S_1 и кругового тока с магнитным моментом $M_2 = i_2 S_2$, расчет приводит к такому результату:

$$F = \mu_0 \frac{2i_1 n_1 S_1 i_2 S_2}{4\pi R^3}. \quad (23)$$

Наконец, для двух длинных и тонких соленоидов, имеющих i_1 , n_1 , S_1 и i_2 , n_2 , S_2 , расчет производится так. Воздействие dF со стороны

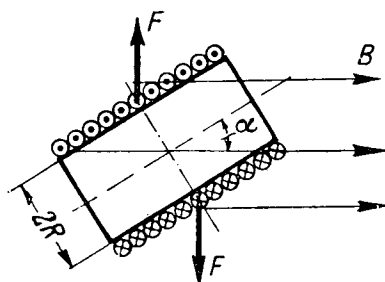


Рис. 6.

магнитного поля первого соленоида на круговые токи, расположенные на участке dR второго соленоида (рис. 5), равно:

$$dF = \mu_0 \frac{2i_1 n_1 S_1 i_2 n_2 S_2}{4\pi R^3} dR.$$

После интегрирования в пределах R , $R + l_2$, где l_2 — длина второго соленоида, получим:

$$F = \int_R^{R+l_2} \mu_0 \frac{2i_1 n_1 S_1 i_2 n_2 S_2}{4\pi R^3} dR = \mu_0 \frac{i_1 n_1 S_1 i_2 n_2 S_2}{4\pi} \left[\frac{1}{R^2} - \frac{1}{(R+l_2)^2} \right].$$

И если $l_2 \gg R$, то приближенно имеем:

$$F = \mu_0 \frac{i_1 n_1 S_1 i_2 n_2 S_2}{4\pi R^2}. \quad (24)$$

Или, вводя магнитные потоки соленоидов Φ_1 и Φ_2 ,

$$F = \frac{\Phi_1 \Phi_2}{\mu_0 4\pi R^2}. \quad (25)$$

Формула (25) является аналогичной формуле Кулона для взаимодействия полюсов длинных и тонких магнитов, если при этом заметить в формуле Кулона магнитные массы отношением потока магнитной индукции к 4π . При рациональной форме записи 4π входит в значение μ_0 .

На соленоид, находящийся в однородном магнитном поле, действует пара сил; направление и точки приложения сил указаны на рис. 6. Момент пары равен:

$$M = B i n S l \sin \alpha = BM \sin \alpha. \quad (26)$$

Аналогичная формула получена для момента пары, действующего на диполь такой же конфигурации. Но, как нетрудно заметить, величина воздействия на полюсы диполя и направление его иные, чем для соленоида (рис. 7).

Вводя в формулу (26) величины Φ и l соленоида, получим:

$$M = \frac{B\Phi l}{\mu_0} \sin \alpha. \quad (27)$$

Роль магнитной среды при образовании поля и при взаимодействии токов может быть описана следующим образом. В однородной среде,

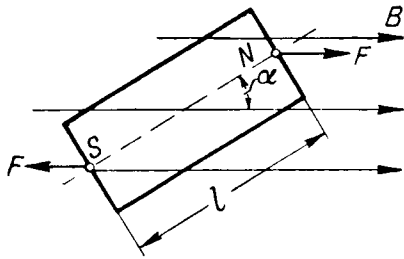


Рис. 7.

находящейся в магнитном поле электрических токов, протекающих по проводникам (макросоков), индукция которых B' , существует магнитное поле элементарных токов намагниченного вещества (микросоков) индукции B'' . Индукция результирующего поля B будет:

$$B = B' + B'' \quad (28)$$

Намагниченность характеризуется магнитным моментом единицы объема—намагниченностью J , по определению равной:

$$\bar{J} = \frac{\sum \Delta v \bar{iq}}{\Delta v} \quad (29)$$

где Δv —элементарный объем выделенного вещества, а i и \bar{q} —ток и вектор площадки элементарного тока.

Если общее число элементарных токов в объеме Δv есть ΔN , то, вводя усредненную проекцию векторов площадок этих токов на направление поля q_0 , которая равна $\bar{q}_0 = \frac{\sum \Delta v \bar{q}}{\Delta N}$, для J получим:

$$\bar{J} = \frac{i \bar{q}_0 \Delta N}{\Delta v} = i \bar{q}_0 n_0 \quad (30)$$

где n_0 —число токов в единице объема вещества.

Намагниченность J для однородно намагниченного тела допускает и другое истолкование. Если взять тело длиной l и сечением S , имеющее N элементарных токов с площадками s_0 , то в этом случае

$$J = \frac{N i q_0}{l S} \quad (31)$$

Учтем далее, что элементарные токи образуют систему элементарных соленоидов, ориентированных вдоль l , число которых равно S/q_0 (рис.8). Тогда $N: S/q_0$ есть среднее число токов в каждом отдельном элементарном соленоиде, которое обозначим через N' . Тогда для J получим:

$$J = \frac{N' i}{l} = n' i \quad (32)$$

где n' —число элементарных токов на единицу длины.

Таким образом, намагниченное тело может быть представлено как цилиндр, боковые поверхности которого обтекаются током с линейной плотностью, равной $n' i$.

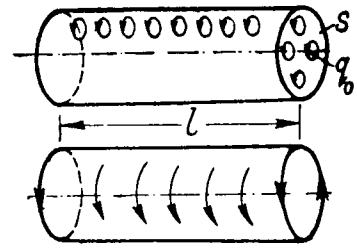


Рис. 8.

Так как магнитная индукция соленоида по формуле (7) равна:

$$B = \mu_0 i n,$$

то для индукции элементарных токов окончательно имеем:

$$B'' = \mu_0 J \quad (33)$$

Таким образом, если поместить в длинный и тонкий соленоид магнитный сердечник, то результирующее поле как внутри соленоида, так и вне его увеличится за счет поля элементарных токов вещества. При этом внутри соленоида будем иметь:

$$B = B' + B'' = \mu_0 i n + \mu_0 J \quad (34)$$

а вне соленоида вместо (13) получим:

$$B = \frac{\Phi}{4\pi R^2} = \frac{\Phi'}{4\pi R^2} + \frac{\Phi''}{4\pi R^2} \quad (35)$$

где Φ' и Φ'' —потоки индукции макро-и микроток. Или в развернутом виде

$$B = \mu_0 \frac{i n S}{4\pi R^2} + \mu_0 \frac{J S}{4\pi R^2} \quad (36)$$

Влияние среды может быть также учтено с помощью относительной магнитной проницаемости μ' , показывающей, во сколько раз увеличивается магнитная индукция соленоида при заполнении его веществом. Тогда формула (34) может быть представлена в виде:

$$B = B' + B'' = \mu' B'.$$

Для потока индукции соответственно имеем:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'' = \mu' \Phi'.$$

В таком случае для индукции поля вне соленоида вместо (35) получим:

$$B = \mu' \frac{\Phi'}{4\pi R^2} \quad (37)$$

т. е. индукция вне соленоида увеличивается в μ' раз.

Увеличение индукции поля, как указано выше, происходит за счет индукции микроток вещества, получивших упорядоченную ориентировку, а увеличение энергии магнитного поля—за счет энергии источника тока, приключенного к соленоиду. Действительно, при введении в соленоид сердечника происходит изменение его потока индукции, приводящее к появлению э. д. с.

индукции; совершающаяся при этом источником тока работа связана с увеличением энергии поля.

Увеличение индукции поля в μ' раз будет наблюдаться и тогда, когда соленоид погружен в однородную среду так, что при этом вещество будет находиться как внутри соленоида, так и вне его. Погружение в среду соленоида, закрытого оболочкой, мешающей проникновению вещества внутрь соленоида, не приводит к увеличению индукции поля, а поток индукции соленоида при этом остается без изменения. Напомним, что рассуждения ведутся для тонкого и длинного соленоида.

Также не изменятся индукция поля электромагнита при его погружении в среду. Роль среды при расчете взаимодействия соленоидов учитывается так. Для соленоидов с сердечниками (электромагнитов), имеющих потоки индукции Φ_1 и Φ_2 , получим:

$$F = \frac{\Phi_1 \Phi_2}{\mu_0 4\pi R^2}, \quad (38)$$

где

$$\Phi_1 = \Phi_1' + \Phi_1'' \quad \text{и} \quad \Phi_2 = \Phi_2' + \Phi_2'',$$

или

$$F = \frac{\Phi_1' \Phi_2'}{\mu_0 \cdot 4\pi R^2} + \frac{\Phi_1'' \Phi_2''}{\mu_0 \cdot 4\pi R^2} + \frac{\Phi_1' \Phi_2''}{\mu_0 \cdot 4\pi R^2} + \frac{\Phi_1'' \Phi_2'}{\mu_0 \cdot 4\pi R^2}. \quad (39)$$

Следовательно, взаимодействие электромагнитов складывается из взаимодействия его соленоидов (обмоток), сердечника первого электромагнита с обмоткой второго, сердечника второго электромагнита и обмотки первого и, наконец, сердечников электромагнита.

Если учесть, что

$$\Phi_1 = \mu_1' \Phi_1' \quad \text{и} \quad \Phi_2 = \mu_2' \Phi_2',$$

то тогда вместо (38) получим:

$$F = \frac{\mu_1' \mu_2' \Phi_1' \Phi_2'}{\mu_0 4\pi R^2}, \quad (40)$$

т. е. взаимодействие увеличивается в $\mu_1' \mu_2'$ раз, где μ_1' и μ_2' — относительные проницаемости сердечников.

При погружении соленоидов в однородную среду с проницаемостью μ' так, что при этом среда заполняет соленоиды, взаимодействие увеличится лишь в μ' раз и будет равно:

$$F = \frac{\mu' \Phi_1' \Phi_2'}{\mu_0 4\pi R^2}, \quad (41)$$

где Φ_1' и Φ_2' — потоки индукции соленоидов.

Это утверждение следует из того, что в данном случае может идти речь о действии индукции поля одного соленоида с сердечником на другой соленоид (без сердечника).

Такое же взаимодействие будет получено для электромагнитов (соленоидов с сердечниками) при их погружении в однородную среду

с проницаемостью μ' , которую для простоты будем считать равной проницаемости сердечников ($\mu_1' = \mu_2' = \mu'$).

Действительно, индукция поля электромагнита при погружении его в среду остается без изменения. Величина же взаимодействия электромагнитов уменьшится в μ' раз, так как и здесь идет речь о действии поля лишь на обмотку соленоида.

Но если взять соленоиды в оболочке, то в магнитной среде их взаимодействие уменьшится в μ' раз. В данном случае следует учесть, что, несмотря на неизменность потоков индукции соленоидов, индукция поля в месте нахождения второго соленоида, в котором отсутствуют микротоки, будет меньше на величину индукции этих микротоков.

В таком случае

$$F = \frac{\Phi_1' \Phi_2'}{\mu_0 \mu' \cdot 4\pi R^2}. \quad (42)$$

Распространив полученные результаты на постоянный магнит, имеющий остаточную намагниченность J_0 или остаточный поток индукции Φ_0 , и учитывая формулу (42), вместо (13), (15), (22) и (25), (27) получим:

$$B = \frac{\Phi_0}{4\pi R^2}, \quad (13')$$

$$B = \frac{2\Phi_0 l}{4\pi R^3}, \quad (15')$$

$$F = \frac{6\Phi_{01} l_1 \Phi_{02} l_2}{\mu' \mu_0 4\pi R^4}, \quad (22')$$

$$F = \frac{\Phi_{01} \Phi_{02}}{\mu' \mu_0 4\pi R^2}, \quad (25')$$

$$M = \frac{B\Phi_0 l}{\mu_0 \mu'} \sin \alpha. \quad (27')$$

В формулах (22') и (25') Φ_{01} и l_1 — поток остаточной индукции и длина первого магнита и Φ_{02} и l_2 — второго магнита.

Следовательно, основные формулы магнитостатики вытекают из законов взаимодействия электрических токов, без введения понятия магнитной массы.

Постоянный магнит, таким образом, является системой упорядочения ориентированных элементарных токов, и его свойства характеризуются остаточной намагниченностью J_0 и геометрическими размерами, т. е. длиной l и сечением S .

Для остаточной индукции и потока остаточной индукции постоянного магнита соответственно получим:

$$B_0 = \mu_0 J_0 \quad \text{и} \quad \Phi_0 = B_0 S = \mu_0 J_0 S.$$

Магнитная масса, входившая в старые формулы магнитостатики, таким образом, должна быть заменена отношением потока остаточной

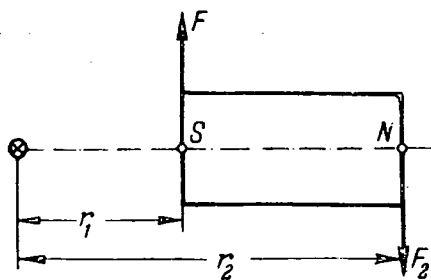


Рис. 9.

индукции магнита к 4π . При этом величина Φ_0 так же, как ранее предполагалось для магнитных масс, остается для данного магнита постоянной. Практически это наблюдается для магнитов, изготовленных из сталей с весьма большой коэрцитивной силой.

Из данного исследования вытекает, что описание явлений старым способом, основанным на представлении о магните как магнитном диполе с полюсами, приводит к правильным результатам, но физическая трактовка явлений должна быть иной. Действительно, ранее считалось, что полюсы магнитов притягиваются или отталкиваются, а уединенный полюс перемещается вдоль направления магнитного поля. Следует же исходить из того, что притягиваются или отталкиваются токи, а ток, находящийся в магнитном поле, перемещается вдоль направления, перпендикулярного полю.

Различие в трактовках может быть показано на следующих примерах.

На магнит, рассматриваемый как магнитный диполь, находящийся в однородном магнитном поле, действует пара сил, при этом силы приложены к полюсам (рис. 7); но рассматривая магнит как соленоид, убеждаемся, что силы приложены к боковым поверхностям магнита (рис. 6). При этом момент пары сил, действующий на магнит, конечно, остается без изменения, но величина силы различна.

Далее, известно, что магнит, укрепленный в рамке, которая может вращаться около оси прямого тока (рис. 9), покоится. Этот факт в свое время послужил доказательством того, что индукция поля прямого тока убывает пропорционально расстоянию.

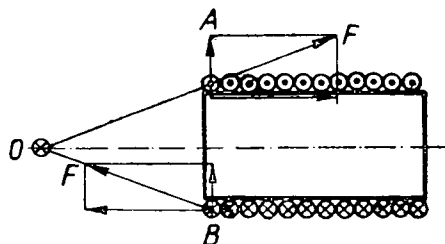


Рис. 10.

Отсутствие вращения объяснялось тем, что на полюсы магнита действуют различные силы F_1 и F_2 , но их моменты относительно оси O уравновешивались, так как

$$F_1 r_1 = -F_2 r_2.$$

В действительности, отсутствие вращения объясняется тем, что силы, действующие на боковые стенки магнита (элементарные токи), пересекаются на оси прямого тока и не могут вызвать вращения относительно этой оси (см. рис. 10).

Такой магнит может вращаться относительно любой другой оси и, кроме того, поступательно перемещаться вдоль линии AB , что объясняется наличием составляющих сил, действующих вдоль этого направления и обусловленных взаимодействием токов.

Наконец, рассмотрим явление „вращения полюса магнита вокруг прямого тока“ (рис. 11). При объяснении этого опыта следует учесть, что

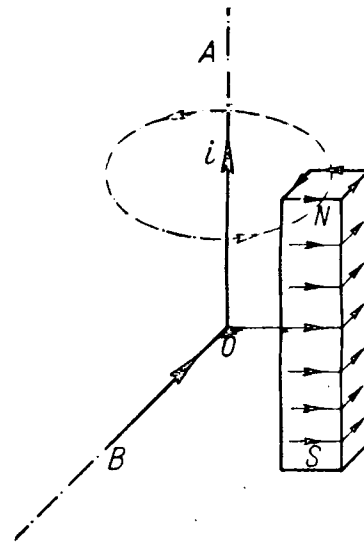


Рис. 11.

помимо полубесконечного прямого тока OA должен обязательно существовать ток BO .

Согласно прежнему способу объяснения это вращение обусловлено действием поля прямого тока OA на полюс, который перемещается вдоль поля. Фактически вращение происходит благодаря действию тока OB на элементарные токи магнита. Анализ этого явления показывает, что оно наблюдается в особо специфических условиях и не является характерным для природы взаимодействия электрических токов. Действительно, непрерывное „движение полюса вокруг тока“ обуславливается взаимодействием замкнутых токов магнита с другим замкнутым током, конфигурация и расположение которого непрерывно изменяются при движении магнита, так как часть проводника BO по условию опыта подвижная, будучи жестко связана с магнитом.

Для того чтобы проводник BO не препятствовал движению магнита, его подвижная часть соединяется с неподвижной частью через ртутный кольцевой проводник, который окружает магнит³. Указанное движение магнита наблю-

³ На рис. 11 подвижная часть проводника обозначена сплошной линией, а неподвижная — пунктиром.

дается лишь тогда, когда длина подвижной части проводника BO мала, и действие на магнит определяется током неподвижной части. Если подвижная часть большой длины, то движение не наблюдается. В этом случае сила, действующая на магнит, будет уже определяться током в подвижном участке проводника, на который со стороны магнита будет действовать равная по величине сила, но направленная в противоположную сторону. Из этих опытов вытекает, что „движение полюса вокруг тока“ следует понимать весьма условно. В некоторых опытах, наоборот, наличие горизонтального проводника, жестко связанного с магнитом, обеспечивает вращение магнита вокруг вертикального тока. Так, например, при пропускании тока через магнит, который может вращаться около собственной оси, наблюдается вращение, если ток подводится через проводник a (рис. 12), и вращение отсутствует, если ток подводится через проводник b , т. е. когда ток проходит лишь вдоль оси магнита. Такая же картина наблюдается с вращением полого цилиндрического магнита, плавающего в ртутной ванне.

Вращение происходит лишь тогда, когда ртутный столбик, в который погружен верти-

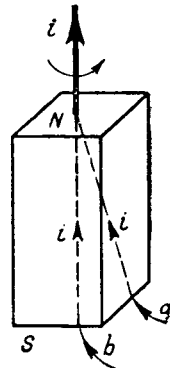


Рис. 12.

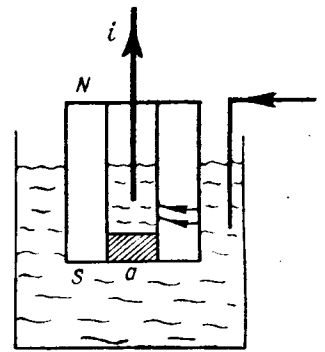


Рис. 13.

кальный проводник, отделен от остальной ртути изолятором a и при этом ток проходит через боковые стенки магнита (рис. 13), т. е. через тело магнита.

Если изолятора нет, то ток проходит помимо магнита; связанного с магнитом проводника нет, нет и вращения магнита.

Итак, электрокинетический метод вскрывает действительный механизм взаимодействия тока и магнита, устраняя неверные допущения старого метода описания этих явлений.

[1. 8. 1951]



О третьем главном размере дугового статора

Кандидат техн. наук, доц. П. А. ФРИДКИН

Ленинградский текстильный институт им. Кирова

Введение. Особенно-сти, обусловленные одной лишь дуговой формой статора, имеют самостоятельное научное и практическое значение и поэтому выделены и рассматриваются здесь независимо от краевого эффекта, учет и методы снижения которого представляют собой отдельную тему. Таким образом, в данной работе дуговой статор впервые анализируется как электрическая машина, обладающая тремя главными размерами.

Рассматриваются технико-экономические достоинства дугового статора, связанные с его третьим главным размером — центральным углом α . Приведен числовой пример.

говой машины величиной α_0 :

$$P_2 = \frac{\alpha_0 D^2 l n_1 B_\delta A_1 k_{qy} \eta \cos \varphi}{8,6 \cdot 10^{11} k_v} \quad (2)$$

где D , l — диаметр и активная длина машины, см;

n_1 — скорость вращения, об/мин;

A_1 — линейная нагрузка статора, а/см;

η — к. п. д.;

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности;

k_{qy} — общий обмоточный коэффициент;

$k_v = \frac{E}{U}$ — отношение противо-э. д. с. E к напряжению U .

Для номинальной мощности электромашин

$$P_2 = C_1 \alpha_0 D^3 l n_1^2 \cdot 10^{-10} [квт]. \quad (3)$$

Третьим главным размером дугового статора является его центральный угол α . В долях от 2π

$$\alpha_0 = \frac{\alpha}{2\pi}. \quad (1)$$

Уравнение мощности на валу асинхронной машины, имеющей произвольный центральный угол, отличается от уравнения мощности кру-

У обычных (по перегружаемости, классу изоляции и по вентиляции) современных асинхронных и синхронных машин C_t убывает от приблизительно 0,75 в случае машин мощностью на единицы киловатт до приблизительно 0,25 для машин на десятки тысяч киловатт.

Электромеханические возможности дугового статора. Для семейства статоров одинаковой мощности и одинаковой скорости вращения согласно (3) получим:

$$l = \frac{C}{\alpha_0 D^3}, \quad \frac{l}{\tau} = \frac{C_1}{\alpha_0 D^4}, \quad (4)$$

так как операция деления на полюсный шаг τ означает деление на величину, пропорциональную диаметру.

У кругового статора α_0 не может иметь иных значений кроме единицы. Поэтому, если круговой статор данной мощности и данной скорости вращения попытаемся встроить в диаметр, который существенно больше так называемого оптимального диаметра D_0 , то получим такое резкое уменьшение $\frac{l}{\tau}$, которое сделает машину абсурдной.

Например, для асинхронного двигателя на 1500 квт, 75 об/мин, 50 цз, 6 кв оптимальный диаметр статора $D_0 = 475$ см. Ширина его стали — 44 см (11 пакетов по 4 см). Развернутая на плоскость активная поверхность этого статора, равная $15 \cdot 0,44 = 6,6$ м², и его обмотка представлены на рис. 1, б.

При тех же 1500 квт и 75 об/мин увеличим теперь диаметр этого статора до $D = 750$ см (рис. 3, а), чтобы встроиться, например, в маховик прокатного стана и этим исключить необходимость самостоятельного ротора. При таком переходе от одного диаметра к другому ширина стали уменьшается в $\left(\frac{750}{475}\right)^3 = 4$, т. е. активная

поверхность статора превратится в узкий прямоугольник со сторонами (рис. 1, а):

$$\pi D = 3,14 \cdot 7,5 = 23,6 \text{ м},$$

$$l = \frac{0,44}{4} = 0,11 \text{ м},$$

а отношение $\frac{l}{\tau}$ уменьшится по (4) в $\left(\frac{750}{475}\right)^4 = 6,2$ раза.

Чрезмерное магнитное рассеяние лобовых частей такого статора не даст развить даже номинального момента вращения, не только 2,5-кратного, который необходим в данном случае. Можно, понятно, добиться такого момента вращения и при диаметре 7,5 м, но по весовым, энергетическим и другим показателям круговой статор, имеющий $D = 1,58 D_0$, останется непригодным.

Иное положение создает дуговой статор. Здесь имеем из (4)

$$\alpha_0 = \left(\frac{D_0}{D}\right)^3 \frac{l_0}{l}; \quad (5)$$

при неизменном $\frac{l}{\tau}$ получаем:

$$\alpha_0 = \left(\frac{D_0}{D}\right)^4, \quad (6)$$

где D_0 — оптимальный диаметр кругового статора.

Таким образом, при любом большом диаметре D можем восстановить оптимальное значение $\frac{l}{\tau}$, уменьшая третий главный размер дугового статора — его центральный угол. При этом у самого дугового статора, встраиваемого в увеличенный диаметр, возникают новые весьма существенные возможности. Например, при $D = 1,58 D_0$ у дугового статора меньше, чем у кругового статора: а) в 3 раза общий вес статора; б) в 1,8 — вес активных материалов и потери мощности; в) в 1,58 — $\text{tg } \varphi$; г) в 4 раза — число секций обмотки и т. д.

Эти данные, соответствующие частному значению $D = 1,58 D_0$, вытекают из общих закономерностей. В их основе лежит понятие о вращающей силе на 1 см² активной поверхности статора. При синусоидальной вдоль полюсного шага волне индукции в зазоре эта сила

$$f_t = 0,707 B_s A_2 \cos \varphi_2 \cdot 10^{-8} \text{ [вт} \cdot \text{сек/см}^2\text{]}. \quad (7)$$

Энергии на 1 см³ и сила на 1 см² представляют собой одно и то же физическое понятие, причем $1 \text{ вт} \cdot \text{сек/см}^3 = 10,2 \text{ кг/см}^2$.

Мощность на 1 см² активной поверхности

$$P_s = f_t v_2 \text{ [вт/см}^2\text{]}, \quad (8)$$

где v — линейная скорость ротора, см/сек.

Объем меди статора и потери в ней. Закономерность изменения объема меди на 1 вт ме-

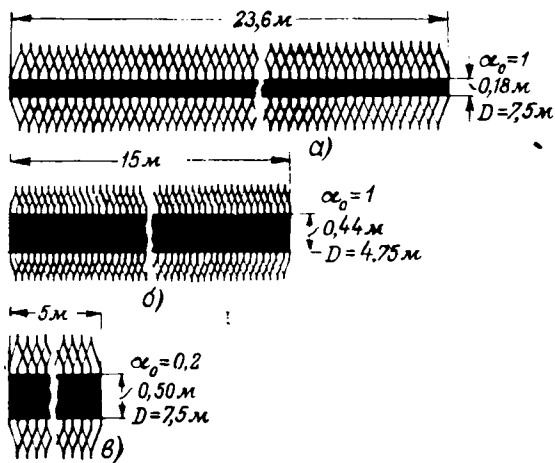


Рис. 1. Развернутые на плоскость магнитопроводы и обмотки трех статоров на 1500 квт, 75 об/мин.

а — круговой статор $D = 7,5$ м; б — то же, но оптимального диаметра $D_0 = 4,75$ м; в — дуговой статор $D = 7,5$ м.

механической мощности определяется простым уравнением:

$$V_p = \frac{A_1 k_{R1}}{j_1 f_1 v_2} [см^3/вт], \quad (9)$$

где j_1 — плотность тока статора, $а/см^2$;

k_{R1} — отношение длины полувитка к активной длине статора;

$\frac{A_1}{j_1}$ — толщина h_1 оболочки, которая получится, если медь, сосредоточенную в пазах, представим себе равномерно распластанной по дуге статора (рис. 2).

Помножив (9) на $j_1^2 \rho k_\varphi$, где ρ — удельное сопротивление меди, k_φ — коэффициент поверхностного эффекта, получим закономерность изменения потерь в меди статора, выраженных в долях от механической мощности,

$$\sigma_i = \frac{\Delta P_i}{P} = \frac{A_1 j_1^2 \rho k_1 k_\varphi}{f_1 v_2}. \quad (10)$$

Из (9) и (10) видно, что объем меди статора и потери в ней обратно пропорциональны $f_1 v_2$. Эта величина пропорциональна D^2 . Однако вместе с увеличением D растет A_1 . Поэтому при неизменном $j_1 \rho k_{R1} k_\varphi$ получаем из (9) и (10):

$$\frac{V}{V_{po}} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{io}} = \left(\frac{D_o}{D}\right)^k; \quad 1 < k < 1,5, \quad (11)$$

где величины с индексом o относятся к круговому статору.

Отсюда ясны особенности дугового статора, у которого $D > D_o$.

Объем стали статора и потери в ней. Закономерность изменения этих величин различна у зубцов и спинки. Объем стали зубцов на 1 *вт* механической мощности (рис. 2)

$$V_{zp} = \frac{S_z k_F}{t_1 f_1 v_2} = \frac{h'_z k_F}{f_1 v_2} [см^3/вт], \quad (12)$$

где S_z — площадь зубца, $см^2$;

t_1 — пазовый шаг, $см$;

k_F — отношение ширины стали к ширине пакета (при стали толщиной 0,5 мм оно близко к 0,9);

$\frac{S_z}{t_1} = h'_z$ — толщина оболочки, которую получим, если сталь зубцов представим равномерно распластанной по дуге статора.

Потери мощности в объеме стали, определяемом по (12), являются потерями в зубцах в долях механической мощности:

$$\sigma_z = \frac{\Delta P_z}{P_z} = \frac{\gamma h'_z k_F \Delta P_{zg}}{10^3 f_1 v_2}, \quad (13)$$

где ΔP_{zg} — потери в 1 *кг* стали зубцов при данной индукции и частоте;

γ — удельный вес стали.

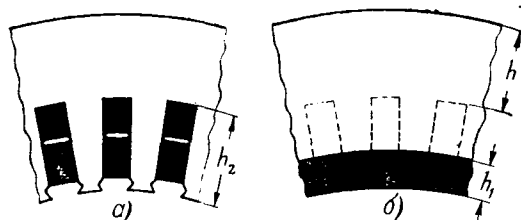


Рис. 2. К определению закономерностей изменения потерь, мощности, расхода стали и меди.

Так как $f_1 \equiv D$; $v_2 \equiv D$, а h'_z несколько возрастает вместе с D , то при одинаковых значениях ΔP_{zg} получим из (12) и (13):

$$\frac{V_{zp}}{V_{zpo}} = \frac{\sigma_z}{\sigma_{zo}} = \left(\frac{D_o}{D}\right)^k; \quad 1 < k < 1,5. \quad (14)$$

Объем стали спинки на 1 *вт* механической мощности (рис. 2)

$$V_{hp} = \frac{h k_D k_F}{f_1 v_2} = \frac{0,25 k_D \cdot 10^8}{f_1 B_{h1} A_2} [вт/см^3], \quad (15)$$

где k_D — отношение среднего диаметра спинки к диаметру расточки статора;

f_1 — частота тока в статоре;

B_{h1} — индукция в спинке;

A_2 — линейная нагрузка ротора;

k — высота спинки.

Потери мощности в этом объеме стали дают искомые потери в спинке статора в долях механической мощности:

$$\sigma_h = \frac{\gamma h k_F k_D \Delta P_{hg}}{10^3} = \frac{0,25 \cdot 10^5 \gamma k_D \Delta P_{hg}}{f_1 B_{h1} A_2}, \quad (16)$$

откуда

$$\frac{V_{hp}}{V_{hpo}} \approx \frac{\sigma_h}{\sigma_{ho}} = \frac{D_o}{D}. \quad (17)$$

Число вырубков и активная поверхность.

Число вырубков на 1 *квт* мощности предопределяет объем работ по штамповке и сборке магнитопровода. Эти работы обычно дороже самой стали. На 1 *квт* необходимо число вырубков

$$C_{Fp} = \frac{10^3}{f_1 v_2 L_F a_{Fc}} \left[\frac{1}{квт} \right], \quad (18)$$

где L_F — длина дуги вырубки;

a_{Fc} — ее толщина с изоляцией.

Активная поверхность статора

$$S = \frac{P_2 \cdot 10^3}{f_1 v_2} [см^2], \quad (19)$$

отсюда получаем:

$$\frac{C_{Fp}}{C_{Fpo}} = \frac{S}{S_o} = \left(\frac{D_o}{D}\right)^2. \quad (20)$$

Таким образом, у дугового статора диаметром $D = 7,5$ м активная поверхность и число вырубков меньше, чем у кругового статора оптимального диаметра $D = 4,75$ м, в $\left(\frac{7,5}{4,75}\right)^2$, в 2,5 раза.

На рис. 1 сопоставлены в одном и том же масштабе развернутые на плоскость магнитопроводы и обмотки трех статоров на 1500 *квт*, 75 *об/мин*, 6 *кв*, 50 *ц*: 1) дугового статора $D=7,5$ *м* (рис. 1,а); 2) кругового статора оптимального диаметра $D_o=4,75$ *м* (рис. 1,б); 3) кругового статора $D=7,5$ *м* (рис. 1,а).

Число секций обмотки. В статорах на высокое напряжение число секций обмотки является весьма важным показателем. Готовая секция на 6 *кв* обычно в 8—12 раз дороже меди этой секции.

При двухслойной обмотке число секций равно числу пазов. Отсюда число секций на 1 *квт* механической мощности

$$C_{wp} = \frac{10^3}{f_1 v_2 t_1 l} \left[\frac{1}{\text{квт}} \right]. \quad (21)$$

Знаменатель дает мощность (*вт*) на один пазовый шаг. Так как $f_1 \equiv D$, $v_2 \equiv D$, а при неизменном $\frac{l}{\tau}$ также имеем $l \equiv D$, то отсюда и из (21) получаем даже при $t_1 = \text{пост}$:

$$\frac{C_w}{C_{wo}} = \left(\frac{D_o}{D} \right)^3. \quad (22)$$

Это, в частности, значит, что у дугового статора, у которого $D=1,58 D_o$, число секций обмотки в $1,58^3$, т. е. вчетверо меньше, чем у кругового статора оптимального диаметра.

Объем изоляционных материалов. Стоимость 1 *кг* микаленты и микафолия в зависимости от качества и процентного содержания слюды превосходит в 15... 25 раз стоимость 1 *кг* меди. Поэтому, несмотря на меньший по сравнению с медью расход этих материалов, их стоимость у машины высокого напряжения в несколько раз больше стоимости меди.

Из (21) получаем закономерность изменения объема изоляционных материалов на 1 *квт* механической мощности:

$$V_{up} = C_{wp} q_u l_R = \frac{q_u k_{R1} \cdot 10^3}{f_1 v_2 t_1} [\text{см}^3/\text{квт}], \quad (23)$$

где l_R — длина полувитка;

k_{R1} — отношение его длины к активной длине;

q_u — среднее значение поперечного сечения изоляции в пазу. Из (23) при $\frac{q_u k_{R1}}{t_1} = \text{пост}$ имеем:

$$\frac{V_{up}}{V_{upo}} = \left(\frac{D_o}{D} \right)^3. \quad (24)$$

Отсюда ясны особенности дугового статора диаметром $D > D_o$.

Коэффициент мощности. Из факторов, определяющих номинальный $\cos \varphi$ асинхронного двигателя, главным является намагничивающий ток. Его относительное значение

$$\frac{I_\mu}{I_1} = 1,77 \frac{k_\delta k_\mu B_\delta \delta}{k_{qy} A_1 \tau}. \quad (25)$$

Для нагрузок, близких к номинальной,

$$\frac{I_\mu}{I_1} \approx \sin \varphi; \quad A_2 \approx A_1 \cos \varphi. \quad (26)$$

Подставив эти отношения в (25), получим:

$$\text{tg} \varphi \approx 1,77 \frac{k_\delta k_\mu B_\delta \delta}{k_{qy} A_2 \tau} \equiv \frac{1}{D}, \quad (27)$$

так как

$$B_\delta \delta \equiv D; \quad A_2 \tau \equiv D^2.$$

Таким образом, если, например, номинальный $\cos \varphi_o$ кругового двигателя 1500 *квт*, 75 *об/мин* равен 0,55 ($\text{tg} \varphi_o = 1,52$), то у дугового электропривода той же мощности и того же числа оборотов в минуту получим по (27) при $D = 1,58 D_o$:

$$\text{tg} \varphi = \text{tg} \varphi_o \frac{D_o}{D} = \frac{1,52}{1,58} = 0,96; \quad \cos \varphi = 0,72.$$

Закономерность изменения к. п. д. статора. Коэффициент полезного действия собственно статора есть отношение электромагнитной мощности (мощности, переносимой полем в ротор) к мощности, подводимой к статору. Введение этого частного к. п. д. дает возможность провести более детальный анализ факторов и их сочетаний, определяющих изменение общего к. п. д. Искомая закономерность изменения к. п. д. статора будет:

$$\eta_1 = 1 - \frac{A_1 j_1^2 k_{R1} k_\varphi + \gamma k_F \cdot 10^{-3} (\Delta P_{zg} h'_z + \Delta P_{hg} h k_D)}{0,707 \frac{k_{qy}}{k_U} B_\delta v_1 A_1 \cos \varphi \cdot 10^{-8}}. \quad (28)$$

Числитель вычитаемого дает полные потери статора на 1 *см*² активной поверхности, а знаменатель — подводимую к статору мощность на 1 *см*². Величина

$$0,707 \frac{k_{qy}}{k_U} B_\delta v_1 \cdot 10^{-8} = U_{lq} \quad (29)$$

есть напряжение на 1 *см* эффективного проводника.

Из физической сущности уравнения (28) ясно, что оно определяет к. п. д. статора любой асинхронной или синхронной машины и что линейная скорость является коренным фактором, определяющим уровень к. п. д. статора.

Знаменатель в уравнении (28) пропорционален приблизительно квадрату линейной скорости, так как

$$B_\delta A_1 \cos \varphi \equiv v_1, \quad (30)$$

а в числителе все три члена пропорциональны приблизительно первой степени линейной скорости поля. Таким образом, относительные потери статора обратно пропорциональны приблизительно первой степени линейной скорости:

$$\frac{\Sigma \Delta P_1}{P_1} \approx \frac{C}{v_1}. \quad (31)$$

С достаточной точностью $C \approx 1$, если v_1 измеряется в *м/сек*, откуда получаем следующее простое уравнение, определяющее главную зако-

померность изменения номинального к. п. д. статора:

$$\eta_1 \approx 1 - \frac{1}{v_1}. \quad (32)$$

У дугового статора диаметра $D > D_0$ более высока линейная скорость поля. Поэтому его к. п. д. выше, чем у кругового статора той же мощности и той же скорости вращения, что вытекает и из ранее полученных соотношений для отдельных видов потерь.

Потери ротора обычно близки к потерям статора. Поэтому для коренной оценки номинального к. п. д. всей машины имеем при сниженных концевых потерях:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \approx \eta_1^2 = \left(1 - \frac{1}{v_1}\right)^2 \approx 1 - \frac{2}{v_1}, \quad (33)$$

где последняя часть равенства верна примерно при $v_1 > 10$ м/сек.

Сводные данные. В табл. 1 сопоставлены на примере асинхронного электропривода 1500 квт, 75 об/мин: круговой статор оптимального диаметра $D_0 = 4,75$ м и дуговой статор диаметра $D = 1,58D_0$. Встроенный круговой статор этого же диаметра опущен, как явно абсурдный.

Данные относятся только к статорам, за исключением $\cos \phi$, общего для всей машины, так как при рабочих режимах общий $\cos \phi$ обусловлен главным образом статором, т. е. его намагничивающим током и реактивностью.

Из табл. 1 и рис. 1 и 3 видно, насколько велика разница между сравниваемыми статорами. Разница предопределяется обоснованными выше закономерностями.

Таблица 1

Данные статоров на 1500 квт, 75 об/мин, 6 кв	Круговой статор	Дуговой статор $D = 1,58D_0$
Активная поверхность, м ²	6,6	2,5
Потери в меди, квт	66	27
Потери в стали, квт	37	21
Коэффициент полезного действия статора, %	93,6	96,9
Коэффициент мощности	0,55	0,72
Вес статора, т	20,5	6,5
Вес меди, т	1,3	0,77
Вес электротехнической стали, т	4	2,5
Вес изоляционных материалов, т	0,42	0,17
Число секций обмотки	570	154
Число вырубков длиной 0,5 м	25 000	10 150
Высота статора, м	6,1	1,7
Расстояние между лапами, м	7	6,7

Использование ротационного узла рабочей машины в качестве готового ротора дополнительно уменьшает вес дугового электропривода в 1,5—2,5 раза по сравнению с электроприводом в виде тихоходного электродвигателя. Кратность 1,5 относится к поршневому компрессору. Таким образом, можно получить общий вес дуго-

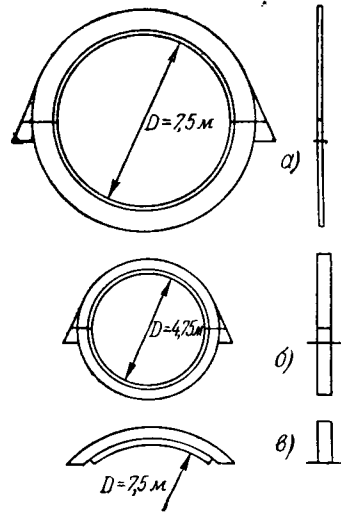


Рис. 3. Станины и магнитопроводы трех статоров на 1500 квт, 75 об/мин.

а — круговой статор $D = 7,5$ м; б — то же оптимального диаметра $D_0 = 4,75$ м; в — дугового статора $D = 7,5$ м.

вого электропривода, меньший веса обычного тихоходного электродвигателя в 4,5...7,5 раз.

В табл. 2 приведены сводные данные двух типов электропривода 625 квт, 167 об/мин на примере поршневого компрессора.

Таблица 2

Данные электроприводов на 625 квт, 167 об/мин, 6 кв	Синхронный двигатель	Дуговой статор $D = 1,6D_0$
Общий относительный вес	1	0,22
Относительный вес меди	1	0,3
Номинальный к. п. д.	0,9	0,92
Номинальный $\cos \phi$	1	0,76
Относительная стоимость, включая конденсаторы для доведения $\cos \phi$ до 1	1	0,4

Выводы. 1. По сравнению с круговым статором оптимального диаметра D_0 у дугового статора увеличенного диаметра D потери мощности, $\lg \phi$, число секций обмотки, общий вес статора, вес активных материалов уменьшаются в $\left(\frac{D}{D_0}\right)^k$ раз, где $k=3$ — для числа секций обмотки; 2 — для веса изоляционных материалов, числа вырубков и активной поверхности; $1 < k < 1,5$ — для веса стали зубцов, меди и потеря в них; $k=1$ — для номинального $\lg \phi$, веса стали спинки и потеря в ней; $2 < k < 2,5$ — для общего веса статора.

2. У малополюсных дуговых статоров указанным возможностям противостоят относительно значительные концевые потери, и поэтому задача о простых методах снижения этих потерь остается весьма актуальной.

[10. 7. 1951]



К расчету величин действующих затуханий в электрических фильтрах

Инж. Г. А. ЧАЯНОВ

Московский политехникум связи им. Подбельского

В статье „О зависимости коэффициентов отдачи мощности двух произвольно выбранных точек электрической цепи“ (Электричество, № 12, 1949) было установлено

соотношение между величинами коэффициентов отдачи мощности двух произвольно выбранных точек электрической цепи и к. п. д. (для противоположных направлений передачи мощности) участка цепи, ограниченного взятыми точками. Для участка цепи, ограниченного точками 1 и 2, это соотношение имело вид:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\eta_{21}}{\eta_{12}}, \quad (1)$$

где N_1, N_2 — коэффициенты отдачи мощности в точках 1 и 2;

η_{12} — к. п. д. участка цепи 12 при передаче энергии в направлении от точки 1 к точке 2;

η_{21} — коэффициент отдачи мощности при передаче энергии в направлении от точки 2 к точке 1.

Применим уравнение (1) для доказательства теоремы: коэффициент отдачи мощности электрической цепи равен коэффициенту отдачи мощности отдельного, произвольно выбранного участка этой цепи, умноженному на к. п. д. остальных частей цепи, при условии, что к. п. д. определяются следующим образом: 1) для части цепи, прилегающей к началу выбранного участка, к. п. д. определяется в направлении начала цепи; 2) для части цепи, расположенной со стороны конца выбранного участка, к. п. д. определяется в направлении конца цепи.



Рис. 1.

Доказывается теорема, устанавливающая зависимость между коэффициентами отдачи мощности всей цепи и какого-либо отдельного ее участка или точки. В виде примера, иллюстрирующего применение теоремы, рассматриваются формулы частотных характеристик действующего затухания простейших фильтров дроссельного и конденсаторного типа.

Схема электрической цепи (рис. 1) может служить пояснением к сказанному. Начало и конец цепи на этом рисунке обозначены точками a и b , а взятый участок цепи ограничен точками m и n .

Обозначим символами:

N — коэффициент отдачи мощностей всей цепи;

N_{mn} — коэффициент отдачи мощности участка цепи mn ;

η_{am} — к. п. д. участка am для передачи мощности в направлении от точки a к точке m ;

η_{ma} — к. п. д. участка цепи am для передачи мощности в направлении от точки m к точке a ;

η_{nb} — к. п. д. участка цепи nb для передачи мощности в направлении $a \rightarrow b$.

N_a, N_m — коэффициент отдачи мощности в точках a и m ;

P_a, P_b, P_n — мощности, передаваемые по цепи в точках a, b и n (в направлении $a \rightarrow b$);

P_{oa}, P_{om} — наибольшие мощности, которые могут быть отданы внешней нагрузке частями цепи, расположенными слева от точек a и m .

Если генератор приключен к началу цепи непосредственно, минуя какие-либо промежуточные передающие устройства, то символ P_{oa} будет соответствовать, очевидно, наибольшей мощности генератора. В этом случае $P_{oa} = P_{ген макс}$.

При указанных обозначениях зависимость, устанавливаемая теоремой, выражается равенством:

$$N = N_{mn} \cdot \eta_{ma} \cdot \eta_{nb}. \quad (2)$$

Справедливость этого равенства может быть доказана весьма простым способом. Напишем коэффициент отдачи мощности рассматриваемой цепи в таком виде:

$$N = \frac{P_a}{P_{oa}} = \frac{P_b}{P_n} \cdot \frac{P_n}{P_{om}} \cdot \frac{P_{om}}{P_{oa}} \quad (3)$$

Первый и второй множители уравнения (3) представляют собою к. п. д. (η_{bn}) участка цепи bn и коэффициент отдачи мощности (N_{mn}) участка цепи ml . Что касается третьего множителя $\frac{P_{om}}{P_{oa}}$, то он может быть заменен к. п. д. (η_{ma}) участка цепи am для направления передачи мощности $b \rightarrow a$.

В этом нетрудно убедиться путем следующих рассуждений. Для первого участка (am) рассматриваемой цепи уравнение (1) может быть написано в виде:

$$\frac{N_a}{N_m} = \frac{\eta_{ma}}{\eta_{am}} \quad (1a)$$

или

$$\frac{P_a}{P_{oa}} \cdot \frac{P_{om}}{P_m} = \eta_{ma} \cdot \frac{P_a}{P_m} \quad (1b)$$

Следовательно,

$$\frac{P_{om}}{P_{oa}} = \eta_{ma} \quad (4)$$

что является доказательством справедливости уравнения (2). Нетрудно убедиться, что уравнение (2) остается справедливым и в том случае, когда части цепи am и nb будут состоять из нескольких отдельных участков или четырехполюсников, соединенных между собой последовательно. В этом случае множители η_{ma} и η_{nb} в уравнении (2) должны быть, очевидно, заменены произведениями к. п. д. промежуточных участков цепи или четырехполюсников.

Так, например, для электрической цепи, условно изображенной на рис. 2 с выделенным участком, заключенным между точками m и m' , справедливо равенство

$$N_{aq} = N_{mm'} \cdot \eta_{ml} \dots \eta_{dc} \cdot \eta_{cb} \cdot \eta_{ba} \cdot \eta_{m'n} \dots \eta_{pq} \quad (5)$$

Следствия из теоремы. В том случае, когда начало и конец выбранного участка (точки m и m') совмещаются, коэффициент отдачи мощности участка (mm') превращается в коэффициент отдачи мощности точки m и уравнение (5) принимает вид:

$$N_{aq} = N_m \cdot \eta_{ml} \dots \eta_{dc} \cdot \eta_{cb} \cdot \eta_{ba} \cdot \eta_{mn} \dots \eta_{pq} \quad (6)$$

и может быть высказано в следующей форме:

Коэффициент отдачи мощности всей цепи равен коэффициенту отдачи мощности в любой, произвольно выбранной точке цепи, умно-

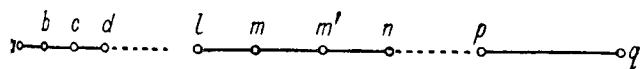


Рис. 2.

женному на к. п. д. всех отдельных участков цепи, при условии, что к. п. д. участков определяются для направлений передачи энергии от взятой точки к концам цепи.

Уравнение (6) весьма упрощается в случае идеальной электрической цепи, когда имеет место условие

$$\eta_{mb} = \eta_{dc} = \eta_{cb} = \eta_{ba} \dots = \eta_{pq} = 1 \quad (6a)$$

и принимает вид:

$$N_{aq} = N_m \quad (7)$$

Таким образом, коэффициент отдачи мощности во всех точках идеальной электрической цепи имеет одинаковую величину, равную коэффициенту отдачи мощности всей цепи.

Аналогичное равенство может быть написано и для величин действующих затуханий:

$$b_{aq} = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{N_{aq}} = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{N_m} \quad (8)$$

Из этого уравнения следует, что для определения величины действующего затухания всей цепи достаточно определить величину действующего затухания в какой-либо отдельной точке цепи.

Сделать это в некоторых схемах, например, в схемах электрических фильтров симметричного типа весьма просто.

Какой бы конфигурации ни были отдельные звенья такого фильтра (рис. 3), его действующее затухание может быть определено по формуле

$$b = b_m = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{N_m} = \frac{1}{2} \ln \frac{|Z_m + Z_m|^2}{4R_m \cdot R_m} = \ln \sec \varphi_m \quad (9)$$

где φ_m — угол входного сопротивления в средней точке фильтра.

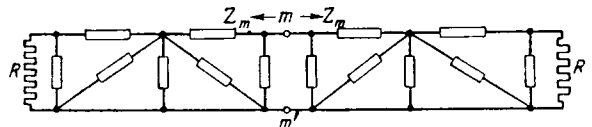


Рис. 3.

Примеры применения теоремы. Воспользуемся уравнением (9) для получения расчетных формул действующего затухания простейших однозвенных фильтров симметричного вида.

На рис. 4 и 5 указаны в общем виде схемы подобных фильтров Т- и П-образного типа.

На схемах обозначены: X_1 и X_2 — реактивные сопротивления последовательных и параллельных плеч отдельных полувзвеньев фильтра; R — нагрузочное сопротивление

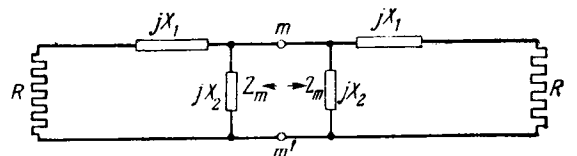


Рис. 4.

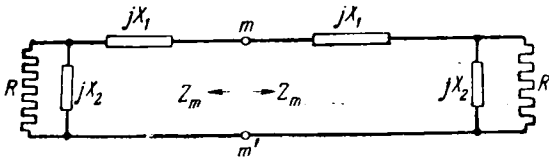


Рис. 5.

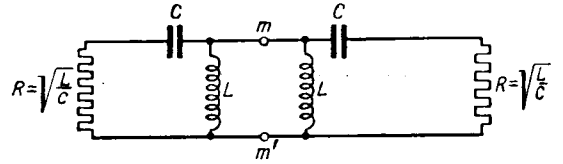


Рис. 8.

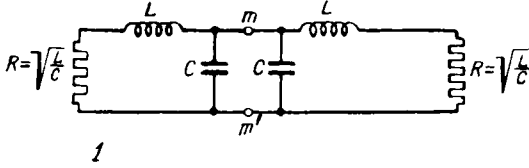


Рис. 6.

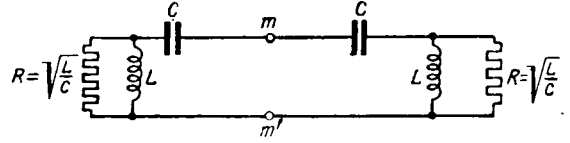


Рис. 9.

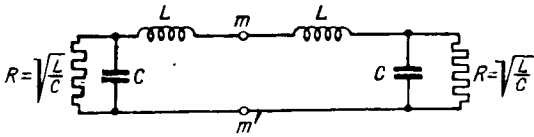


Рис. 7.

фильтра, являющееся активным сопротивлением; Z_m — входные сопротивления в средних точках фильтров Т- и П-образного типа.

Из выражений для входных сопротивлений рассматриваемых фильтров, которые могут быть написаны в виде:

$$Z_{mT} = \frac{R + jX_1 \left(1 + \frac{X_1}{X_2} + \frac{R^2}{X_1 X_2} \right)}{(R/X_2)^2 + (1 + X_1/X_2)^2}, \quad (10)$$

$$Z_{m\Pi} = \frac{R + jX_1 \left(1 + \frac{R^2}{X_2^2} + \frac{R^2}{X_1 X_2} \right)}{1 + (R/X_2)^2}, \quad (10a)$$

и уравнения (9) следует:

$$b_T = \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{X_1}{R} + R/X_2 + \frac{X_1^2}{R X_2} \right)^2 \right], \quad (11)$$

$$b_{\Pi} = \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{X_1}{R} + R/X_2 + \frac{R X_1}{X_2^2} \right)^2 \right]. \quad (11a)$$

Уравнения (11) и (11a) значительно упрощаются, если предположить, как это обычно делается в практических условиях, что реактивные сопротивления X_1 и X_2 имеют различные знаки, а величина нагрузочного сопротивления определяется корнем квадратным из произведения реактивных сопротивлений, взятого со знаком минус, т. е. при $R = \sqrt{-X_1 X_2}$.

В этом случае

$$b_T = b_{\Pi} = \frac{1}{2} \ln \left[1 - \left(\frac{X_1}{X_2} \right)^3 \right]. \quad (12)$$

Таким образом, при заданных величинах реактивностей X_1 и X_2 и нагрузочного сопротивления R схемы подобных фильтров Т- и П-образного вида имеют одинаковую величину действующего затухания.

На основании уравнения (12) можно получить весьма простым способом частотные характеристики действующего затухания фильтров дроссельного и конденсаторного типа.

Так, например, для дроссельного фильтра, схемы Т-образного звена которого указана на рис. 6, можно написать равенства:

$$X_1 = \omega L, \quad X_2 = -\frac{1}{\omega C}, \quad R = \sqrt{-X_1 X_2} = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

$$\frac{X_1}{X_2} = -\frac{\omega^2}{\frac{1}{LC}} = -\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2,$$

где ω_0 — предельная частота фильтра¹ и ω — передаваемая угловая частота.

Следовательно,

$$b = \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^6 \right]. \quad (13)$$

Полученная формула на основании сказанного выше может быть применена также и для расчета величин действующего затухания однозвенного дроссельного фильтра П-образного вида (рис. 7).

Для конденсаторного фильтра, схемы звеньев которого изображены на рис. 8 и 9, можно написать аналогичные равенства:

$$X_1 = -\frac{1}{\omega C}, \quad R = \sqrt{\frac{L}{C}},$$

$$X_2 = \omega L, \quad \frac{X_1}{X_2} = -\left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2,$$

$$b = \frac{1}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^6 \right]. \quad (14)$$

Из уравнений (13) и (14) видно, что формулы для действующего затухания конденсаторных и дроссельных фильтров, рассмотренных в предыдущих примерах, имеют аналогичный характер.

¹ Выражение для предельной частоты имеет одинаковый вид $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ для фильтров П- и Т-образного типа вследствие того, что величины L и C относятся к полувзвешьям фильтров.



Измерение частоты посредством двойной Т-образной схемы

Инж. В. Е. КАЗАНСКИЙ и инж. Л. Д. СТЕРНИНСОН

Обгрэс

Двойная Т-образная схема (рис. 1) широко применяется в ламповых генераторах класса RC, частотных фильтрах и следящих системах в качестве дифференцирующего элемента. Обладая свойствами, близкими к свойствам частотных мостовых схем, двойная Т-образная схема может быть использована для измерительных целей, имея перед мостовыми схемами ряд преимуществ. В частности, наличие общего входного и выход-

Приводится анализ известной, так называемой «двойной Т-образной схемы» для случая, более общего, чем обычно применяемая схема, симметричная относительно входа и выхода. Рассмотрены амплитудные и фазные характеристики. Описаны принципы ряда разработанных в Обгрэс устройств, у которых в качестве органа измерения частоты использована двойная Т-образная схема.

использовать рассматриваемую схему, в частности для измерительных целей.

Исследование характеристик двойной Т-образной схемы при разных соотношениях ее эле-

ментов позволило разработать в Обгрэс ряд принципиально новых устройств для измерения частоты.

Двойная Т-образная схема с нулевой настройкой. Схема применяется в большинстве случаев в электронно-ламповых устройствах и практически достаточно рассмотреть ее работу в режиме холостого хода. Выписывая систему уравнений по методу контурных токов

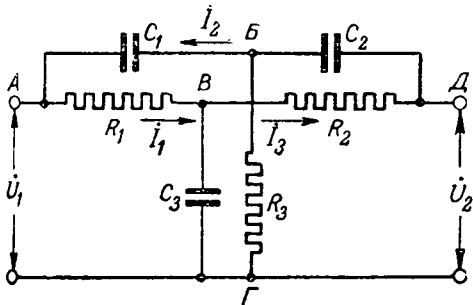


Рис. 1. Двойная Т-образная схема.

ного зажимов позволяет заземлить вход и выход, что в ряде случаев имеет решающее зна-

чение. Мостовые схемы такой возможностью не обладают.

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{R_1 R_2 R_3 - R_3 X_3 (X_1 + X_2) + j[X_1 X_2 X_3 - R_3 X_3 (R_1 + R_2)]}{R_1 R_2 R_3 - X_1 X_3 (R_1 + R_2 + R_3) - X_2 (X_1 R_1 + X_3 R_3) + j[X_1 X_2 X_3 - R_1 R_3 (X_1 + X_2 + X_3) - R_2 (X_1 R_1 + X_3 R_3)]}, \quad (2)$$

и исключая токи, найдем выражение для второго напряжения схемы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 - i_1 \left(R_1 - \frac{j}{\omega C_3} \right) - i_3 \frac{j}{\omega C_3} &= 0, \\ \dot{U}_1 + i_2 \left(R_3 - \frac{j}{\omega C_1} \right) - i_3 R_3 &= 0, \\ \dot{U}_2 + i_1 \frac{j}{\omega C_3} + i_3 \left(R_2 - \frac{j}{\omega C_3} \right) &= 0, \\ \dot{U}_2 + i_2 R_3 - i_3 \left(R_3 - \frac{j}{\omega C_2} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В известных авторам работах [Л. 1, 2] приводится теоретический анализ двойной Т-образной схемы лишь для случая, когда она представляет симметричный четырехполюсник ($Z_{вх} = Z_{вых}$), и, кроме того, обладает нулевой настройкой, т. е. при некоторой частоте баланса ω_0 , $\dot{U}_2 = 0$. Между тем иные соотношения элементов позволяют более широко и более эффективно

где X_1, X_2, X_3 равны соответственно $\frac{1}{\omega C_1}, \frac{1}{\omega C_2}$ и $\frac{1}{\omega C_3}$.

Равенство $\dot{U}_2 = 0$ может быть осуществлено при выполнении следующих двух условий:

$$\left. \begin{aligned} R_1 R_2 - X_2 X_3 - X_3 X_1 &= 0, \\ X_2 X_3 - R_2 R_3 - R_3 R_1 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Так как шесть элементов схемы связываются лишь двумя равенствами (3), то тремя соотношениями элементов можно задаться произвольно. Обычно задаются условиями симметрии схемы относительно входных и выходных зажимов

$$R_1 = R_2 = R \quad \text{и} \quad C_1 = C_2 = C$$

и дополнительно условием вида $R_3 = nR$.

Равенство $\dot{U}_2 = 0$ выполняется в этом случае при

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{2nRC}} \quad \text{и} \quad C_3 = 4nC. \quad (4)$$

Отклонение частоты от значения ω_0 приводит к появлению на выходе схемы некоторого напряжения $\dot{U}_2 \neq 0$. При $n = \frac{1}{2}$; $R_3 = \frac{R}{2}$; $C_3 = 2C$ достигается максимальная крутизна амплитудно-частотной характеристики $U_2 = F(\omega)$ симметричной схемы. Однако симметричная схема среди других ее вариантов не обладает наибольшей крутизной характеристики. Между тем, для ряда применений весьма важно получить максимальную чувствительность схемы к отклонениям частоты, т. е. максимальную крутизну амплитудной характеристики.

Зададимся более общими соотношениями элементов схемы:

$$R_2 = kR_1, \quad C_2 = \frac{C_1}{k}, \quad R_3 = nR_1. \quad (5)$$

Условия нулевой настройки при этом будут:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{n(k+1)}{k} R_1 C_1}}, \quad C_3 = n \left(\frac{k+1}{k} \right)^2 C_1. \quad (6)$$

Подставляя (5) и второе равенство из (6) в (2) и дифференцируя результат по ω и по n , найдем условие максимума $\frac{\partial \dot{U}_2}{\partial \omega}$:

$$n = \frac{k}{k+1}. \quad (7)$$

В частном случае, когда $k=1$ (симметричный четырехполюсник),

$$n = \frac{1}{2}.$$

При условиях (5), (6) и (7) и частоте ω_0 схема имеет симметричную топографическую диаграмму относительно вектора \dot{U}_1 (рис. 2). Комплексная частотная характеристика схемы выражается следующим уравнением:

$$\dot{U}_2 = \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha^2 - 1 - 2j\beta\alpha} \dot{U}_1, \quad (8)$$

где $\alpha = \omega R_1 C_1 = \frac{\omega}{\omega_0}$ и $\beta = \frac{k+1}{k}$.

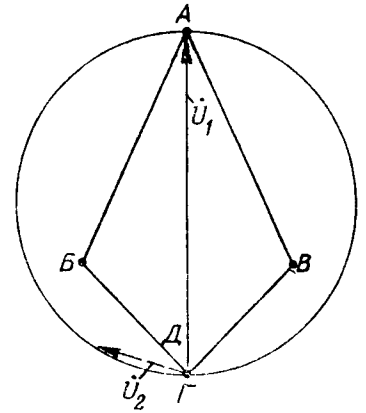


Рис. 2. Топографическая диаграмма двойной Т-образной схемы с нулевой настройкой при частоте баланса.

Выражение (8) является уравнением окружности, построенной на \dot{U}_1 , как на диаметре. Эта окружность (рис. 2) представляет, следовательно, амплитудно-фазную характеристику схемы. Из (8) получаем выражение для амплитудной и фазной частотных характеристик:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\alpha^2 - 1}{\sqrt{\alpha^4 + 2(2\beta^2 - 1)\alpha^2 + 1}}; \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\alpha\beta}{\alpha^2 - 1}. \quad (10)$$

Характеристики для различных значений k приведены на рис. 3. Как видно, крутизна амплитудной характеристики возрастает с увеличением k .

При малых отклонениях ω от ω_0 (или α от 1) амплитудно-частотная характеристика может быть заменена прямой линией, наклон которой характеризуется модулем производной

$$\left(\frac{\partial \dot{U}_2}{\partial \omega} \right)_{\omega=\omega_0} = j \frac{U_1}{\omega_0} \frac{k}{k+1}. \quad (11)$$

В частности, при

$$k=1 \quad \frac{\partial \dot{U}_2}{\partial \omega} = j \frac{U_1}{2\omega_0};$$

при $k \rightarrow \infty \quad \frac{\partial \dot{U}_2}{\partial \omega} \rightarrow j \frac{U_1}{\omega_0}$. Заметим для сравнения, что максимальное значение $\frac{\partial \dot{U}_2}{\partial \omega}$ для моста Рибинсона-Винна составляет $\frac{U_1}{4\omega_0}$.

Фазная характеристика при $\alpha=1$ ($\omega=\omega_0$) делает скачок от $+\frac{\pi}{2}$ до $-\frac{\pi}{2}$. Фаза \dot{U}_2 при малых отклонениях ω от ω_0 изменяется, мало оставаясь равной приблизительно $+\frac{\pi}{2}$, если $\omega > \omega_0$, и $-\frac{\pi}{2}$, если $\omega < \omega_0$.

Из приведенных соотношений следует, что при малых отклонениях частоты от ω_0 можно практически полностью скомпенсировать \dot{U}_2 , вводя последовательно с выходными зажимами схемы напряжение \dot{U}_k , сдвинутое по фазе относительно \dot{U}_1 на угол $\frac{\pi}{2}$, например, как показано на рис. 4.

Положение движка потенциометра, перемещаемого всякий раз так, чтобы обеспечивалась компенсация \dot{U}_2 , может служить мерой частоты. На этом принципе в Оргрэс¹ разработан регистрирующий автокомпенсационный частотомер для промышленной частоты с непрерывной записью.

Двойная Т-образная схема может быть применена также в качестве измерительного органа для автоматического регулятора частоты [Л. 3].

Рассмотрим возможность настройки двойной Т-образной схемы путем изменения одного из ее элементов, например емкости C_2 . Выбор именно этой емкости оправдывается более легким конструктивным изменением C_2 по сравнению с C_1 и C_3 , так как при $k \gg 1$ $C_2 \ll C_1$.

Пусть при частоте баланса ω_0 , когда $\dot{U}_2 = 0$, емкость C_2 имеет значение C_{20} . Спрашивается, можно ли изменением одной емкости C_2 обеспечить равенство $\dot{U}_2 = 0$ при ином значении частоты, отличном от ω_0 , и каково должно быть изменение емкости.

Вторичное напряжение схемы в функции ω и C_2 при их одновременном небольшом изменении вблизи ω_0 и C_{20} может быть определено приближенно через производные от \dot{U}_2 по ω и C_2 :

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_1 \left[\left(\frac{\partial \dot{U}_2}{\partial \omega} \right)_{\omega=\omega_0} \Delta\omega + \left(\frac{\partial \dot{U}_2}{\partial C_2} \right)_{C_2=C_{20}} \Delta C_2 \right] = \\ &= \dot{U}_1 \left\{ \frac{k \Delta C_2}{4 C_{20} (k+1)^2} + j \left[\frac{k(2k+1)}{4(k+1)^2} \frac{\Delta C_2}{C_{20}} - \frac{k}{k+1} \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right] \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

Из (12) следует: 1) составляющая \dot{U}_2 , сдвинутая на $\frac{\pi}{2}$ относительно \dot{U}_1 , может быть полностью скомпенсирована изменением емкости C_2 ; 2) изменение C_2 приводит, однако, одновременно к появлению составляющей \dot{U}_2 , совпадающей по фазе с \dot{U}_1 ; 3) эта составляющая уменьшается с увеличением k и стремится к нулю при $k \rightarrow \infty$; 4) относительное изменение C_2 , необходимое для компенсации "мнимой" составляющей \dot{U}_2 при заданном отклонении частоты $\Delta\omega$, определяется выражением

$$\frac{\Delta C_2}{C_{20}} : \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{4(k+1)}{2k+1} \quad (13)$$

и уменьшается с увеличением k . Таким образом, увеличение k не только повышает крутизну амплитудно-частотной характеристики двойной

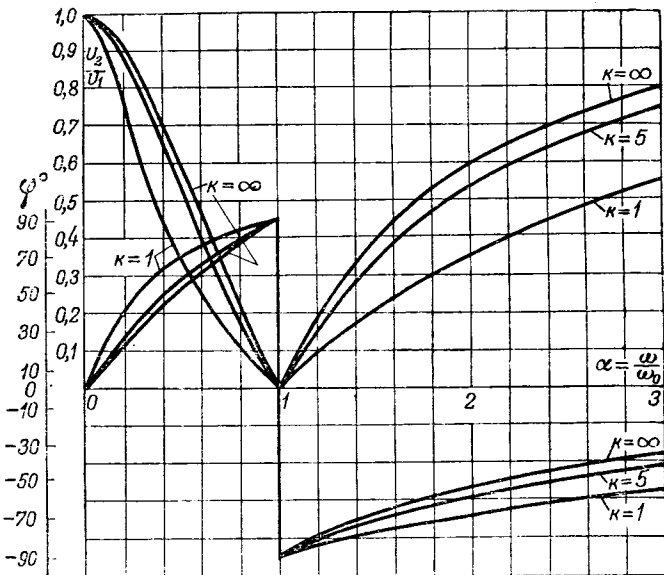


Рис. 3. Амплитудные и фазные характеристики двойной Т-образной схемы с нулевой настройкой.

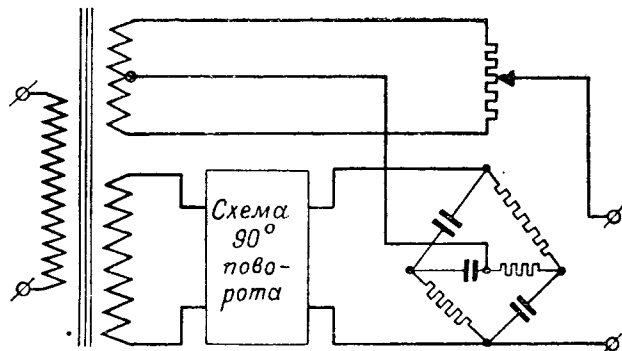


Рис. 4. Принцип компенсации выходного напряжения двойной Т-образной схемы.

Т-образной схемы, но и облегчает условия компенсации \dot{U}_2 путем изменения одного элемента схемы.

Описанные свойства схемы показывают, что ее нетрудно использовать для точного измерения частоты в узком диапазоне. В автокомпенсационном стрелочном частотомере (рис. 5), разработанном в Оргрэс, конденсатор переменной емкости C приводит в движение ваттметровой измерительной системой 3 без противодействующей пружины. Измерительная система подключена через усилитель 2 к выходу двойной Т-образной схемы 1. При наличии компенсации мощность, подводимая к ваттметру, равна нулю. В противном случае система приходит в движение, которое продолжается до наступления компенсации. Шкала ваттметра проградуирована в герцах. Прибор используется одновременно в качестве частотного корректора к регулятору мощности 4 для генераторов электростанции². Если частота

¹ Авторами данной статьи.

² Частотный корректор разработан авторами совместно с Б. А. Антоновым.

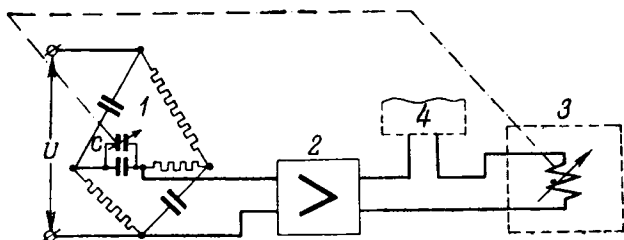


Рис. 5. Принципиальная схема автокомпенсационного частотомера — частотного корректора к регулятору мощности.

1 — двойная Т-образная схема; 2 — усилитель; 3 — ваттметровый прибор; 4 — регулятор мощности.

выходит за пределы шкалы прибора и его стрелка доходит до упора, то в цепи ваттметра остается конечная мощность, являющаяся функцией разности между значением крайней точки шкалы и действительным значением частоты (рис. 6).

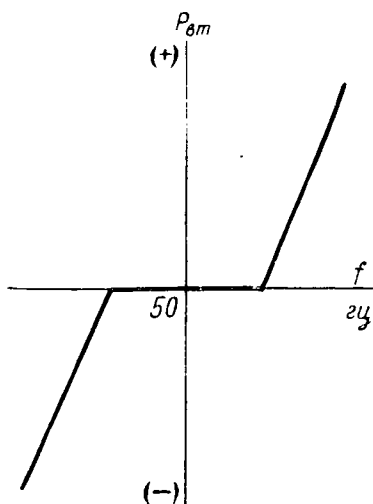


Рис. 6. Характеристика частотного корректора.

Эта нескомпенсированная мощность воздействует на автоматический регулятор мощности, изменяя его уставку. Благодаря этому, величина поддерживаемой на генераторе мощности оказывается зависимой от частоты. При аварийном снижении частоты регулятор мощности увеличивает нагрузку генератора, мобилизуя имеющийся резерв.

Двойная Т-образная схема с ненулевой настройкой. Рассмотрим ту же схему, но с таким выбором параметров, что при некоторой частоте ω_0 вектор напряжения \dot{U}_2 не равен нулю, но совпадает по фазе с \dot{U}_1 . Из (2) следует, что это может иметь место, если

$$\frac{X_1 X_2 X_3 - X_3 R_3 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2 R_3 - X_3 R_3 (X_1 + X_2)} = \frac{X_1 X_2 X_3 - R_1 R_3 (X_1 + X_2 + X_3) - R_2 (X_1 R_1 + X_3 R_3)}{R_1 R_2 R_3 - X_1 X_3 (R_1 + R_2 + R_3) - X_2 (X_1 R_1 + X_3 R_3)} \quad (14)$$

Легко видеть, что равенство (14) удовлетворяется при $R_1 = X_1$, $R_2 = X_2$, $R_3 = X_3$.

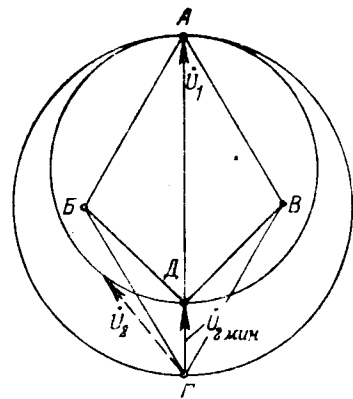


Рис. 7. Топографическая диаграмма двойной Т-образной схемы с ненулевой настройкой при частоте баланса.

Если принять, кроме того, $R_1 = R_3$ (а следовательно, $C_1 = C_3 = C$), $R_2 = kR$ и считать опять $\omega RC = \frac{\omega}{\omega_0} = \alpha$, то

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{k(\alpha^2 - 1) - j\alpha}{k(\alpha^2 - 1) - j2(k+1)\alpha} \quad (15)$$

Нетрудно показать, что и в этом случае кончик вектора \dot{U}_2 скользит по окружности (рис. 7), с диаметром, меньшим, чем U_1 . При частоте $\omega_0 = \frac{1}{RC}$, $\alpha = 1$, \dot{U}_2 совпадает по фазе с \dot{U}_1 , а амплитуда U_2 имеет минимальное значение, равное

$$U_{2 \text{ мин}} = \frac{U_1}{2(k+1)} \quad (16)$$

$U_{2 \text{ мин}}$ уменьшается с увеличением k . При $k \rightarrow \infty$ схема превращается в схему с нулевой настройкой.

Фазо-частотные и амплитудно-частотные характеристики схемы с ненулевой настройкой могут быть построены (рис. 8) по уравнениям

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{k(2k+1)\alpha(\alpha^2 - 1)}{k^2(\alpha^2 - 1) + 2(k+1)\alpha^2} \quad (17)$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \sqrt{\frac{k^2(\alpha^2 - 1)^2 + \alpha^2}{k^2(\alpha^2 - 1)^2 + 4(k+1)^2 \alpha^2}} \quad (18)$$

С увеличением k крутизна фазной характеристики резко растет. При $k = \infty$ фаза меняется скачком с $-\frac{\pi}{2}$ до $+\frac{\pi}{2}$. Выбирая k достаточно большим, можно получить фазную характеристику, близкую к характеристике резонансного контура с очень высокой добротностью.

Это свойство двойной Т-образной схемы было использовано при разработке автокомпенсационного частотомера-приемника³ частотной системы

³ Разработан лауреатами Сталинской премии В. Иванкиным, В. Е. Казанским и Г. П. Мининим.

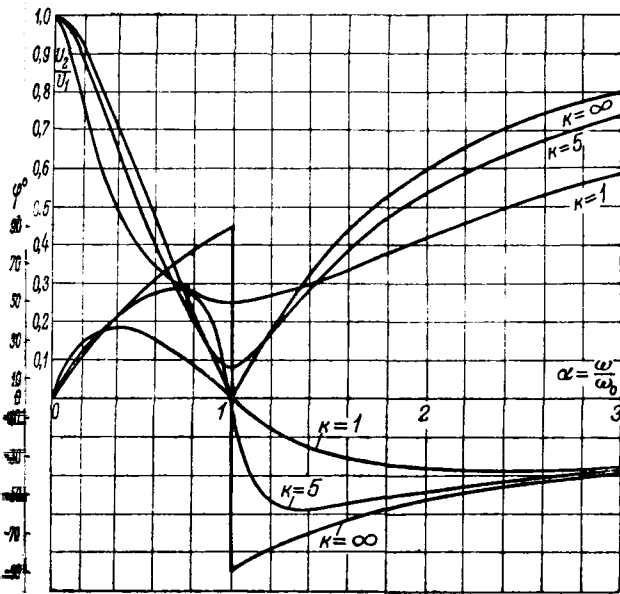


Рис. 8. Амплитудные и фазные характеристики двойной Т-образной схемы с ненулевой настройкой.

телеизмерения дальнего действия ОргрЭС типа ТЧО-ЗК (рис. 9). При помощи фазочувствительной схемы 2 сдвиг фазы между векторами входного и выходного напряжения двойной Т-образной схемы 1 преобразовывается в постоянный ток, действующий на миллиамперметр 3. Миллиамперметр, поворачивая ротор конденсатора переменной емкости, включенного в схему, автоматически подстраивает ее на частоту, близкую к частоте проходящего сигнала. При этом устанавливается значение тока в цепи миллиампер-

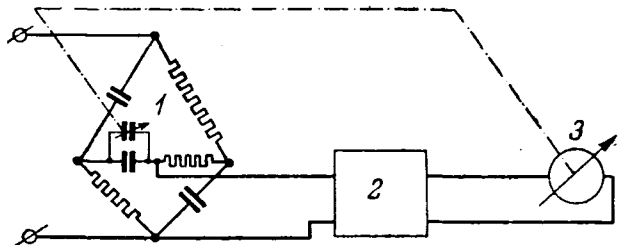


Рис. 9. Принципиальная схема частотомера — приемника частотной системы телеизмерения типа ТЧО-ЗК. 1 — двойная Т-образная схема с ненулевой настройкой; 2 — фазочувствительный элемент и усилитель; 3 — миллиамперметр.

метра является мерой частоты проходящего сигнала телеизмерения, а в конечном счете — мерой телеизмеряемой величины.

В заключение необходимо отметить, что использование во всех описанных приборах реостатно-емкостной схемы вместо обычного в подобных случаях резонансного контура $L-C$ позволяет значительно повысить стабильность характеристик, так как устраняется основной источник нестабильности (особенно при низких частотах) — индуктивность со сталью.

Литература

1. Б. П. Асеев. Основы радиотехники. Связьиздат, 1947.
2. Г. Лауэр, С. Лесник, Л. Мадсон. Основы теории сервомеханизмов. Госэнергоиздат, 1948.
3. В. Е. Казанский и Л. Д. Стернинсон. Автоматический регулятор частоты непрерывного действия. Электричество, № 4. 1951.

[4. 6. 1951]



ОБРАЩЕНИЕ ВНИТОЭ К ЧИТАТЕЛЯМ

О Правилах устройства электротехнических установок

Всесоюзное научно-техническое совещание по рассмотрению первого выпуска Правил устройства электротехнических установок, проведенное в декабре 1950 г. Всесоюзным научным инженерно-техническим обществом энергетиков совместно с Техническим управлением Министерства электростанций СССР выдвинуло ряд рекомендаций по различным разделам Правил. Техническое управление МЭС выпускает в настоящее время дополнения и изменения с учетом материалов Совещания по следующим разделам Правил:

1. Распределительные устройства и подстанции напряжением выше 1000 в;
 2. Распределительные устройства напряжением до 1000 в;
 3. Проводки цепей управления и измерения;
 4. Статические конденсаторы;
 5. Аккумуляторные батареи;
 6. Проводки;
 7. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1000 в;
 8. Электрооборудование взрывоопасных помещений;
 9. Электрооборудование пожароопасных помещений;
 10. Заземления в электрических установках напряжением выше 1000 в;
 11. Заземления и зануления в электрических установках напряжением до 1000 в.
- В соответствии с решением Совещания, секция правил и норм ВНИТОЭ продолжает сбор, изучение и систематизацию предложений и замечаний по Правилам, а также ведет подготовительные работы по созыву второго Всесоюзного научно-технического совещания для рассмотрения материалов второго выпуска Правил.

Правление ВНИТОЭ и секция правил и норм ВНИТОЭ обращаются с призывом к инженерам и техникам-электрикам выступить со своими замечаниями и предложениями, направив их либо в редакцию журнала «Электричество» (Москва, Главпочтамт, почтовый ящик № 648) для опубликования в разделе дискуссий либо в секцию правил и норм ВНИТОЭ (Ленинград, 25, Стремянная ул. 10).

Операторное исчисление и электротехническое образование

Доктор техн. наук, проф. В. Ю. ЛОМОНОСОВ

Москва

Стремительное развитие электротехники предъявляет все более высокие требования к теоретическому уровню инженера-электрика. Расширяется тематика задач, попадающих в поле зрения инженера-электрика, растет их объем, повышается их трудность. Нагрузка студента увеличивается от года к году, но срок обучения—жесткий. Некоторое облегчение достигается дроблением преподавания электротехники на отрасли, но измельчанию специальности кладутся разумные пределы. Учебные программы понемногу приближаются к формуле „все необходимое и ничего лишнего“, но до этого идеала еще далеко. А между тем электротехническое образование напоминает корабль, перегруженный настолько, что его мореходные качества находятся под угрозой. Ясно, что в первую очередь должен быть выброшен балласт, и цель этой заметки—показать, что операторное исчисление является балластом на электротехническом корабле.

Вспомним, как операторное исчисление проникло в литературу, а оттуда в преподавание. После того, как Хевисайд ошеломил всех то ли своими формулами, то ли тем, что придал им внешность астрологического гороскопа, началось состязание в доказательствах этих формул. В литературе начали мелькать имена Бромвича, Карсона, Вайдера, Вандерполя, Дэча, но никем не упоминалось имя Ващенко-Захарченко². Не имела никакого успеха весьма здравая статья Каспера, показавшего, что формулы Хевисайда могут быть получены чисто „классическими“ средствами, а именно при помощи лагранжевой вариации постоянных. Зато договаривались до утверждения, будто ряд задач может быть решен лишь операторным способом и классическими приемами не решается.

Операторное исчисление вошло в моду. Вслед за потоком журнальных статей начался подлинный диссертационный потоп, не оскудевший по сей день. Понемногу началось подведение итогов. Значительным большинством голосов было решено, что обоснование хевисайдовых формул, если в его основу положить лапласово функциональное преобразование, будет наиболее строгим, полным, научным, перспективным и т. п. С этим соглашались, с этим спорили, но неизменно упускали из виду, что существо вопроса—не в оправдании

Выражается сомнение в целесообразности преподавания в высшей электротехнической школе операторного исчисления. Выдвинуто положение, что расчет переходных процессов достаточно просто выполняется классическим способом. Печатается в порядке обсуждения.¹

или осуждении Хевисайда в выработке целесообразных приемов интегрирования дифференциальных уравнений.

Распространеннейшей задачей является описание переходных процессов в линейных цепях. Весьма скромная математическая подготовка достаточна для того, чтобы сразу же записать для искомого напряжения (или тока) выражение

$$u(t) = u_1(t) + \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t}, \quad (1)$$

где u_1 —так называемое „частное“ решение в качестве которого обычно берут значение, соответствующее „принужденному режиму“; p_k —корни характеристического уравнения, A_k —коэффициенты, зависящие от начальных условий. Все согласны с тем, что нельзя обойтись без решения характеристического уравнения $Z(p)=0$. Никто не спорит о том, как проще всего составить это уравнение,—разумеется, алгебраизацией системы дифференциальных уравнений. Предметом спора является способ определения коэффициентов A_k , для которых, как известно, можно составить систему

$$\left. \begin{aligned} A_1 + A_2 + A_3 + \dots &= u(0) - u_1(0), \\ p_1 A_1 + p_2 A_2 + p_3 A_3 + \dots &= u'(0) - u_1'(0), \\ p_1^2 A_1 + p_2^2 A_2 + p_3^2 A_3 + \dots &= u''(0) - u_1''(0), \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} (2)$$

По мнению одних приступать к решению системы (2) можно лишь после ознакомления с интегральными соотношениями Римана-Меллина, Бромвича и Карсона, лишь после того, как доказано, что трансформация Лапласа определяет трансформируемую функцию с точностью до множества меры нуль, и дано интегральное представление унитарного оператора. Другую точку зрения, а именно, что система (2) проще всего решается средствами элементарной алгебры, разделяет, к сожалению, меньшинство.

Распространен взгляд, будто достоинства операторного исчисления проявляются наиболее выпукло при решении *уравнений с частными производными*. Доля истины в этом, конечно, есть, но и здесь дело обстоит совсем не так, как это кажется поборникам операторных методов. Обратимся к уравнению теплопроводности, которым описываются процессы распространения

¹ См. раздел „Дискуссии“, стр. 66.

² Лишь совсем недавно о работе Ващенко-Захарченко напомнил В. А. Диткин и П. И. Кузнецов.

электромагнитных волн в металле. Определенности ради будем говорить о проникновении постоянного магнитного поля в стальной лист ширины $2a$ с магнитной проницаемостью μ и удельной проводимостью γ . В некотором отношении эта задача очень близка к задаче о включении разветвленной электрической цепи на постоянное напряжение. Сходство в том, что электромагнитный процесс здесь начинается одновременно во всех точках листа сразу же после появления поля на его границах. Такая же картина наблюдается в электрической цепи, где переходный процесс начинается во всех ветвях одновременно. Совсем по иному протекают переходные процессы в линиях, но об этом позже.

Итак мы имеем уравнение

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \mu\gamma \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

и знаем, что установившимся значением напряженности магнитного поля будет постоянная величина H_0 . Поэтому вполне логичным является предположение о том, что решение имеет форму

$$H(x, t) = H_0 + \sum_{k=1}^n A_k(x) e^{-\alpha_k t}, \quad (4)$$

отличающуюся от (1) лишь тем, что коэффициенты A_k оказываются функцией координаты x . Техника решения состоит в определении вида функции A_k из уравнения $A_k'' + \mu\gamma\alpha_k A_k = 0$, определении постоянных интегрирования и чисел α_k из граничных и начальных условий.

На это возражают: проще составить уравнение $\frac{d^2 H}{dx^2} - \mu\gamma p H = 0$, решить это уравнение с учетом граничных условий

$$H = H_0 \frac{\operatorname{ch}(x\sqrt{\mu\gamma p})}{\operatorname{ch}(a\sqrt{\mu\gamma p})}, \quad (5)$$

отыскать на стр. 176 справочника Диткина и Кузнецова подходящее выражение $\frac{\operatorname{ch} v \sqrt{p}}{\operatorname{ch} \sqrt{p}}$, взять за единицу времени не секунду, а произведение $\mu\gamma a^2$ (оно имеет размерность времени), получить $v = \frac{x}{a}$ и $t' = \frac{t}{\mu\gamma a^2}$ и выписать из того же справочника готовое решение

$$H = H_0 \left\{ \int_0^v \vartheta_1 \left(\frac{u}{2}, t' \right) du + 1 \right\}, \quad (6)$$

где ϑ_1 — эллиптическая зэта-функция, для которой нет удобных таблиц, но которая разлагается в ряд типа (4).

Возражение на первый взгляд сильное, но, существу, малоубедительное. Отметим прежде всего совпадение ряда операций в обоих способах: то же самое дифференциальное уравнение того порядка, те же самые граничные усло-

вия. Кажущимся образом обойдено определение числа α_k из уравнения

$$\cos(a\sqrt{\mu\gamma\alpha_k}) = 0 \quad (7)$$

и постоянных коэффициентов C_k из уравнения

$$H_0 + \sum_k C_k \cos(x\sqrt{\mu\gamma\alpha_k}) = 0 \quad (8)$$

(при $a > x > -a$), так как результаты этих операций нашлись в справочнике. Но ведь в справочник они попали лишь потому, что кем-то было дано решение уравнения (1) при наших начальных и граничных условиях. После того, как решение уравнения внесено в справочник, бесцельно спрашивать, каким способом это уравнение лучше всего решается. Сличению подлежит, с одной стороны время, потребное квалифицированному вычислителю для перехода от (5) и (6), а с другой стороны, время, которое надо затратить для решения (7) и (8). В обоих случаях получаются очень близкие величины, но тогда в чем же преимущества операторного исчисления и зачем мы должны ему обучаться?

Если обратиться к *телеграфному уравнению*, то и здесь нельзя найти серьезных доводов в пользу операторных методов расчета. Задача о переходных процессах в линии конечной длины еще ожидает решения, и оба соревнующихся способа — классический и операторный — с ней не справились. С инженерной точки зрения можно считать решенной лишь задачу о включении бесконечной линии (отдельные частные случаи общей задачи в счет не идут). Трудность возникает при подчинении решения граничным условиям на приемном конце и состоит в необходимости решать некоторое трансцендентное уравнение, обладающее рядом неприятных особенностей. Но ведь это как раз та операция, которой нельзя избежать ни при каком из применяемых способов.

Итак, ни в цепных задачах, ни в задачах, приводящих к уравнениям теплопроводности и телеграфному, операторный способ не может показать своего объективного преимущества над классическим способом. Остается оценить еще один довод: говорят, что исключение операторного исчисления из учебных программ сделает недоступной для инженера ту обширную литературу, где это исчисление применяется и притом с несомненным успехом. Но не так уже трудно переложить на классический язык те достойные внимания результаты, которые получены операторным путем. Напрашивается вывод, что включение операторного исчисления в учебные программы электротехнических высших учебных заведений не имеет достаточно веского основания, особенно учитывая весьма напряженную загрузку учебного плана рядом, безусловно, необходимых дисциплин.

Получение в лабораторных условиях момента, не зависящего от скорости

Инж. Б. И. КАМЕНЬ

Новочеркасский политехнический институт

Момент многих производственных механизмов не зависит от скорости (подъемные краны, шахтные подъемные установки и пр.). Для управления подобными приводами часто применяются довольно сложные электрические схемы (например, схемы электрических кранов).

Механические характеристики, снятые в лаборатории обычным путем, не дают еще достаточно полного представления об удобстве управления подобными схемами и о их поведении в переходных режимах. Вместе с тем испытание каждой новой схемы в эксплуатационных условиях затруднительно.

Важно иметь возможность предварительно испытать такие схемы в лабораторных условиях при нагрузке, приближающейся по своему характеру к эксплуатационной, т. е. при нагрузочном моменте, не зависящем от скорости. Потребность в схеме, позволяющей получить постоянный момент, имеется также в учебных лабораториях вузов, например для изучения особенностей электропривода подъемных механизмов.

Получение в лаборатории такого момента представляет известные трудности. В некоторых лабораториях для этой цели применяются небольшие подъемники типа лифтов. Такой способ получения постоянного момента требует дорогих сооружений и далеко не везде осуществим. В других лабораториях к валу испытуемого двигателя присоединяют в качестве нагрузки двигатель последовательного возбуждения или асинхронный двигатель, работающий в режиме противотока. Этот способ позволяет удовлетворительно имитировать режим подъема груза. Для имитации спуска груза необходимо, очевидно, чтобы направление момента нагрузки совпадало с направлением вращения, иначе говоря, чтобы нагрузочный двигатель работал не в тормозном, а в двигательном режиме. Но в этом случае момент начинает сильно зависеть от скорости.

Описана схема, позволяющая получить у генератора смешанного возбуждения характеристики трехобмоточного генератора, путем введения добавочной э. д. с. в цепь параллельной обмотки. Указан способ экспериментальной настройки. Схема пригодна для получения постоянного нагрузочного момента при лабораторных испытаниях схем управления электродвигателями.

Почти постоянный момент в некоторых пределах скорости можно получить, если питать нагрузочный двигатель от трехобмоточного генератора. Постоянство момента достигается как

в двигательном, так и в генераторном режиме нагрузочной машины. Однако далеко не во всякой лаборатории имеется трехобмоточный генератор¹. Автор рассмотрел возможность замены трехобмоточного генератора генератором смешанного возбуждения, имеющимся почти в каждой учебной лаборатории, путем применения в нем вместо сложения ампервитков независимой и параллельной обмоток непосредственного наложения токов в одной и той же обмотке².

Принципиальная схема соответствующей установки показана на рис. 1. Для создания требуемой нагрузки двигатель ИД механически соединяется с нагрузочной машиной Д. Якорь

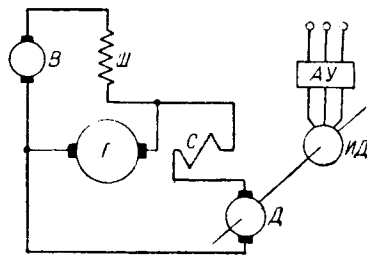


Рис. 1.

машины Д питается от главного генератора Г, приводимого в движение любым двигателем с жесткой характеристикой. Последовательно с обмоткой Ш генератора Г включен якорь возбуждателя В, имеющего независимое возбужде-

¹ Те же замечания можно сделать относительно применения электромашинного усилителя.

² Подобная схема была применена в промышленном электроприводе Б. М. Яковлевым (Авторское удостоверение на техническое усовершенствование Народного комиссариата по строительству № 21 от 18. 4. 1945).

дение. Кроме того, генератор имеет последовательную обмотку *C* с противовключением.

Обозначим:

$i_{ш}$ — ток в параллельной обмотке;

E_g — э. д. с. генератора *G*;

U_2 — напряжение на зажимах якоря генератора *G*;

E_b — э. д. с. возбудителя *B*;

$R_{ш}$ — сопротивление обмотки;

$r_{яв}$ — сопротивление якоря возбудителя *B*;

$F_{ш}$ — н. с. обмотки;

$w_{ш}$ — число витков обмотки.

Применим второй закон Кирхгофа:

$$i_{ш} = \frac{E_b + U_2}{R_{ш} + r_{яв}} \quad (1)$$

Намагничивающая сила обмотки

$$F_{ш} = i_{ш} w_{ш} = \frac{E_b \cdot w_{ш}}{r_{яв} + R_{ш}} + U_2 \cdot \frac{w_{ш}}{r_{яв} + R_{ш}} \quad (2)$$

Таким образом, н. с. обмотки как бы складывается из н. с., пропорциональной напряжению генератора U_2 , и из другой н. с., не зависящей от него. Аналогичную картину имеем и в трехобмоточном генераторе.

Внешняя характеристика генератора в данной схеме строится так же, как и для трехобмоточного генератора [Л. 1, 2, 3].

В системе координат $i_{ш} - E_2$ (рис. 2) строим характеристику холостого хода генератора (кривая 1). Затем проводим прямую 2, изображающую зависимость $i_{ш} = f(U_2)$, согласно уравнению

$$i_{ш} = \frac{E_b}{R_{ш} + r_{яв}} + \frac{U_2}{R_{ш} + r_{яв}} \quad (3)$$

При холостом ходе установившееся состояние будет изображаться точкой *b* пересечения кривой 1 и прямой 2.

Вписывая между прямой 2 и кривой 1 реактивный треугольник *cde*, можно построить внешнюю характеристику. Если прямая 2 параллельна начальной части кривой 1, то внешняя характеристика приобретает вид, показанный на рис. 2 (кривая 3). Верхняя часть характеристики соответствует тормозному режиму испытуемого двигателя *ИД* и двигательному режиму нагрузочного двигателя *Д*.

В лабораторных условиях оказывается более целесообразным заменить возбудитель *B* (рис. 1) потенциометром 1, включенным в общую сеть постоянного тока (рис. 3). Рассматривать действие потенциометра проще всего с помощью метода наложения.

При отсутствии э. д. с. в сети схема *a* рис. 3 превращается в схему *б*. Тогда по обмотке протекает ток, пропорциональный напряжению генератора.

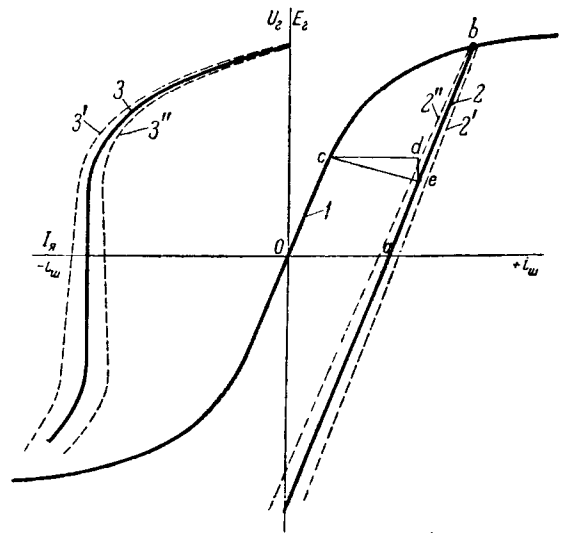


Рис. 2.

Если же э. д. с. генератора отсутствует и действует лишь напряжение сети, то по обмотке возбуждения протекает ток i_0 , зависящий только от положения движка потенциометра:

$$i_0 = \frac{U_c \frac{R_x}{R_1}}{R_x \left(1 - \frac{R_x}{R_1}\right) + R_{ш} + R_2} \quad (4)$$

где U_c — напряжение сети;

R_2 — сопротивление реостата 2;

R_1 — сопротивление потенциометра 1;

R_x — сопротивление части потенциометра 1, заключенной между движком и точкой *a* (рис. 3, в).

При действии обеих э. д. с. по обмотке возбуждения протекает сумма двух токов, один ток пропорционален напряжению генератора, а другой не зависит от него, совершенно аналогично тому, что имеет место в схеме рис. 1.

Настройка схемы. Для получения внешней характеристики подобно рис. 2 необходимо правильно подобрать сопротивление цепи шунта, для чего служит реостат 2 (рис. 3).

Следует отметить, что передвижение движка потенциометра изменяет общее сопротивление цепи обмотки *Ш*. В самом деле, из рис. 3, б видно, что сопротивление потенциометра разбивается движком на две части, R_x и $(R_1 - R_x)$, соединенные между собой параллельно. Поэтому

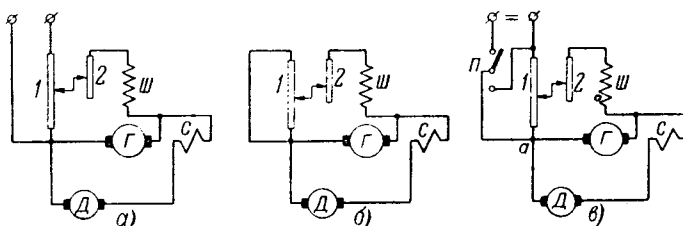


Рис. 3.

эквивалентное сопротивление потенциометра I выражается формулой:

$$R_n = R_x \left(1 - \frac{R_x}{R_1} \right). \quad (5)$$

Из этой формулы следует, что при крайних положениях движка ($R_x = 0$ или $R_x = R_1$) сопротивление R_n равно нулю. Максимальная величина R_n получается при среднем положении движка ($R_x = \frac{R_1}{2}$). При этом $R_n = \frac{1}{4} R_1$.

Как явствует из построения рис. 2, для получения тока якоря постоянного значения необходимо, чтобы прямая 2 была параллельна начальной части кривой 1. Это означает, что сопротивление цепи шунта должно быть равно критическому. Если при каком-либо положении движка потенциометра I мы с помощью реостата 2 настроим сопротивление цепи шунта на критическую величину, то при передвижении движка сопротивление будет, вообще говоря, отличаться от критического. Внешняя характеристика генератора при этом, очевидно, изменится. На рис. 2 пунктиром показаны некоторые возможные положения характеристических прямых 2' и 2'' и соответствующие им внешние характеристики генератора 3' и 3''. Для получения постоянного момента при новом положении движка потенциометра I необходимо изменить сопротивление реостата 2 так, чтобы сопротивление цепи шунта снова стало равным критическому.

Потребное сопротивление можно определить как расчетным путем с использованием метода наложения, так и путем эмпирического подбора.

Экспериментальное определение сопротивления лучше всего производить путем имитации метода наложения. Как известно, критическое

сопротивление цепи шунта соответствует порогу самовозбуждения. Отсюда вытекает способ настройки реостата 2 (рис. 3, в): поставив переключатель Π в нижнее положение, довести генератор до порога самовозбуждения, практически возбудить до 40...50% номинального напряжения. Положение движка потенциометра I определяется, исходя из требуемого тока якоря. Для этого следует затормозить двигатель D (или закортить его) переключателем Π , включить потенциометр в сеть и, передвигая его движок, установить необходимый ток по амперметру в цепи якоря. После этого надлежит опять подстроить реостат 2 указанным выше способом, так как при перемещении движка потенциометра I изменяется общее сопротивление цепи возбуждения.

Испытания. После настройки схемы на определенный ток (момент) параметры системы остаются неизменными. Экспериментатор воздействует лишь на скорость испытуемого двигателя $ИД$ с помощью какого-либо аппарата управления (работа которого при этом также подвергается проверке). При этом ток якоря нагрузочного двигателя D , а значит, и момент остаются почти постоянными по величине и направлению, независимо от величины и направления скорости. Меняются лишь напряжение и ток возбуждения генератора G . Таким образом схема имитирует некоторую подъемную установку, приводимую двигателем $ИД$.

Литература

1. Г. Н. Петров. Электрические машины, ч. 2. Госэнергоиздат, 1947.
2. В. К. Попов. Основы электропривода. Госэнергоиздат, 1945.
3. Э. Арнольд и И. Лакур. Машины постоянного тока. Гостехиздат, т. I, 1931.

[25. 5. 1951]



Эксплуатация электроприводов прокатных станов на Магнитогорском металлургическом комбинате имени Сталина

Инж. Г. М. БИДЕР

Магнитогорск

Главный электропривод. Недостатки электрических машин. Опыт эксплуатации электроприводов прокатных станов показывает, что контактные соединения обмоток, бандажи, контактные кольца, коллекторы и щетки являются более чем другие детали причиной аварий, простоев и неполадок в работе главного электропривода.

Контактные соединения обмоток вызывают справедливые нарекания эксплуатации. В первые три года работы прокатного двигателя МП-24 7000 л. с. блуминга зарегистрировано 60 случаев распайки хомутиковых шин, соединяющих компенсационную обмотку с обмоткой дополнительных полюсов, главным образом, контактных шин, идущих от вывода дополнительного полюса к соседним стержням компенсационной обмотки.

Проведенные тепловые испытания показали, что при работе нормально потребного количества воздуха и загрузке двигателя на 80% хомутики нагреваются до 75°С, а при жаркой погоде и полной нагрузке — до температуры размягчения олова, вызывающее нарушение контактных соединений якорной обмотки. Распайка хомутиковых соединений связана с конструктивным недостатком: хомутики изолированы друг от друга деревянными клиньями и проложены между ними литерондной лентой, кроме того, они снаружи покрыты бандажем. При такой изоляции случалась плохая теплоотдача и хомутики перегревались. Когда сняли часть бандажа и удалили деревянные клинья, температура этой части обмотки снизилась с 75 до 26°С.

Бандажи. Применение некачественной проволоки может вызвать разрыв бандажа. Такой разрыв произошел на генераторе 2000 квт 750 об/мин. Металлографическое исследование бандажной проволоки установило в различных ее частях колебание временного сопротивления от 22 до 160 кг/мм². Основной причиной разрушения являются трещины в поперечном направлении, возникшие при изготовлении проволоки.

Изоляция. Основная конструктивная причина пробоя изоляции машин постоянного тока — наличие большого числа неизолированных частей, недоступных для очистки и продувки. Компенсационные обмотки с малым запасом лаковой изоляции и неизолированными шинными соединениями, обмотки главных и дополнительных полюсов, изолированные только лаковым покровом, неизолированные шины уравнительных соединений — все это ухудшает изоляционные свойства машины и может привести к пробоям. Например, конструкция полюсов генератора ГП-16 3000 квт 750 в и двигателя МП-24 7000 л. с. такова, что если в зазор между выполняемой из голый стержень и покрытой лаком катушкой и сердечником полюса попадает пыль, то ее можно удалить, только демонтировав полюс и сняв катушку. Попадание пыли в этот зазор в сильной степени снижает сопротивление изоляции обмотки возбуждения.

Контактные кольца. Ухудшение изоляции может быть вызвано быстрым износом контактных колец, увлекающим за собой интенсивное засорение двигателя металлической пылью. Поэтому контактные кольца машин главного привода должны изготавливаться из материала, обеспечивающего их длительную службу. Однако контактные кольца асинхронного двигателя 5000 л. с. завода «Электросила» стали заметно изнашиваться после пуска двигателя в эксплуатацию и за два года истерлись. Пришлось заменить подшипниками, изготовленными на комбинате. Новые подшипники работают без износа уже длительное время.

Коллекторы и щетки. Конструктивные недостатки коллектора машин постоянного тока не только отрицательно сказываются на работе главного привода, но

выявляются некоторые конструктивные и производственные недостатки оборудования электроприводов прокатных станов и намечаются пути их устранения¹. Частично освещаются усовершенствования оборудования, осуществленные на Магнитогорском комбинате имени Сталина.

иногда могут и лимитировать производительность стана. Примером может служить следующий случай.

У двигателя МП-24 7000 л. с. приводящего блуминг, недостаточно надежно крепление коллекторной втулки, так как она крепится болтами и коническими контрольными втулками, ослабевающими при реверсах. При работе двигателя на максимальной скорости втулки несколько сдвинулись с места. Это явилось одной из причин, по которой стан длительное время работал только на основной скорости, что ограничивало его производительность.

В работе непрерывных станом большую роль играет устойчивость скоростных характеристик двигателей. Но на эту устойчивость большое влияние оказывает качество щеток — особенно в тех случаях, когда двигатель работает на максимальной скорости.

Опыт эксплуатации комбината позволяет отметить следующие основные недостатки щеток: 1) высокая абразивность, приводящая к сильному износу коллекторов; 2) плохое механическое и электрическое соединение армировки со щеткой, что обычно приводит к перегоранию гибких соединений и разогреву щеткодержателей; 3) слабая механическая прочность материала, что приводит к быстрой порче щеток. Наряду с этим следует отметить неоднородность качества щеток одной и той же марки, но разных поставок, что свидетельствует о недостаточно строгом соблюдении требований, предъявляемых к материалу и технологии производства щеток.

Схемы управления главным электроприводом реверсивных станом. Стремление к увеличению производительности станом вызвало необходимость во внесении ряда изменений в схемы управления реверсивным электроприводом. Изменению подвергались схемы: 1) ускорения на скоростях выше, основной, 2) регулирования напряжения генераторов, 3) схема регулятора нагрузки.

Регулирование ускорения двигателя. Электропривод блуминга 1100 мм, управляемый по схеме ХЭМЗ 1939 г., вследствие конструктивных недостатков машин, длительное время работал только на основной скорости.

После замены двигателя 7000 л. с. возникла возможность повысить скорость, но так как на этом блуминге прокатываются в основном короткие штуки, то двигатель не успевает разогнаться до максимальной скорости, поэтому была введена только одна ступень ослабления поля, без ввода в работу клавиатуры замедления. В последних пропусках скорость двигателя достигала 70 об/мин, а время торможения незначительно увеличивалось.

Опыт показал, что при вводе в работу полного ослабления поля, вследствие работы клавиатуры замедления, в большой степени увеличивается время торможения, что снижает эффективность работы на повышенной скорости.

На комбинате на электроприводе блуминга, управляемого по квадратичной схеме возбуждения, для увеличения ускорения двигателя при скоростях, выше основной, в цепь возбуждения параллельно добавочному сопротивлению подключена динамическая емкость. Это мероприятие дает возможность, с одной стороны, сократить время ослабления поля и, следовательно, время разгона, с другой — сократить время торможения за счет уменьшения времени усиления поля при торможении и времени действия клавиатуры замедления. Осциллограммы разгона и торможения двигателя по указанной схеме показывают, что сокращение времени ослабления и усиления поля достигается в большей степени от добавочного со-

¹ Доклад автора на научно-технической сессии ВНИТОЭ по электроприводе в черной металлургии (Электростроение, № 12, 1951).

противления в цепи обмотки возбуждения, чем от динамической емкости.

Регулирование напряжения генераторов. Для компенсации посадки напряжения на генераторах, вызываемой посадкой скорости асинхронного двигателя преобразовательного агрегата, установлены регуляторы вибрационного типа. Но эти регуляторы оказались ненадежными в эксплуатации.

Вибрационные регуляторы заменены более надежными в эксплуатации электромашинными регуляторами, разработанными А. Б. Челюсткным.

Регулирование нагрузки. Для защиты прокатных двигателей от перегрузки при работе на основной скорости применено быстроедействующее реле перегрузки ИРБТ, катушка которого подключается через добавочное регулируемое сопротивление к компенсационной обмотке, а контакты действуют на снятие возбуждения генератора.

Такая схема включения не обеспечивает четкой работы реле. Во-первых, потому, что она температурно некомпенсирована. Во-вторых, компенсационная обмотка обладает индуктивным сопротивлением, что обуславливает в цепи реле, помимо постоянной составляющей тока, и переменную, амплитуда которой увеличивается вместе со скоростью двигателя. Вследствие этого уставка реле понижается против расчетной, и это понижение будет тем меньше, чем больше скорость нарастания тока и скорость вращения двигателя. В конечном итоге, это приводит к излишним срабатываниям реле, что ограничивает производительность стана.

Для устранения излишних срабатывания и температурной зависимости в цепь реле включили дроссель. Индуктивность дросселя выбрали такой, чтобы постоянные времени цепи реле и компенсационной обмотки были одинаковы. Благодаря этому ток в цепи реле стал пропорциональным току нагрузки, а переменная составляющая тока почти полностью погашается дросселем. Это в значительной мере уменьшило общее число срабатываний реле, хотя нагрузка двигателя не изменилась.

Схемы управления главными электроприводами неререверсивных станов. На комбинате работали над разрешением следующих проблем: распределение нагрузки между параллельно работающими генераторами, регулирование напряжения генераторов, максимальная защита, повышение скорости двигателей сверх номинальных и улучшение охлаждения машин.

Распределение нагрузки между генераторами. Чистовые клети неререверсивных прокатных станов, а на некоторых станах и черновые, приводятся двигателями постоянного тока 600 в, питаемыми от специальных преобразовательных агрегатов, обычно состоящих из синхронного двигателя 10 кВт и двух или трех параллельно работающих генераторов постоянного тока 600 в. Генераторы не имеют специальных уравнивательных обмоток, и равномерное распределение нагрузки между ними зависит исключительно от соответствия характеристик холостого хода и внешних характеристик. Но таким соответствием характеристик обладают не все генераторы, и подгонка характеристик сдвигом траверсы не всегда приводит к нужным результатам.

Несоответствие характеристик вызывает неравномерное распределение нагрузок, приводящее к перегрузке одного из генераторов и его отключению от максимальной защиты, что влечет за собой отключение и второго генератора и остановку стана. В результате получается брак продукции и простой стана.

Регулирование напряжения генераторов. Понижение напряжения генераторов преобразовательных агрегатов при полной нагрузке достигает 5%, а иногда и выше. Это приводит к соответствующему уменьшению скорости прокатных двигателей, вызывая понижение производительности стана. Для устранения этого применяют регуляторы напряжения.

Но установленные на некоторых станах гидравлические регуляторы с серводвигателем, действующим на шунтовой регулятор генераторов, обладает рядом недостатков: большая инерционность, подверженность влиянию температуры и ненадежность в эксплуатации, ибо они часто изменяют чувствительность и требуют тщательного наблюдения.

На комбинате разработали регуляторы напряжения с электромашинными усилителями.

Эти регуляторы, установленные на двух станах, оказались менее инерционными и более чувствительными и надежными в эксплуатации, чем гидравлические.

Максимальная защита генераторов и двигателей клетей некоторых станов осуществляется двумя параллельно включенными контакторами КП-7 со встроенными максимальными реле. Такая защита очень ненадежна и часто вызывает неселективное отключение, а следовательно, и излишние простои и брак.

Повышение скорости двигателей. На настоящем этапе развития стахановских методов работы, а также комплексной автоматизации в некоторых случаях уже скорость двигателей ограничивает дальнейший рост производительности труда. Комбинат осуществил перевод на повышенную скорость (около 20%) 10 двигателей. Проверочные расчеты показали, что в большинстве случаев увеличения скорости достаточно усилить бандажи, увеличив число витков на 25..55%. Усилить коллектор требуется только в отдельных случаях.

Улучшение охлаждения машин. Раньше холодный воздух подавался в машину установленным в подвале вентилятором, а нагретый воздух выходил из машины в машинный зал. Теперь на машине устанавливается дополнительный кожух, а нагретый воздух выводится установленным снаружи вытяжным вентилятором за пределы зала.

Такая реконструированная вентиляция применена на двух синхронных двигателях 5000 кВт и на одном двигателе типа МП-24, 7000 л. с. В результате такой реконструкции количество охлаждающего воздуха, подаваемого к синхронным двигателям, увеличивалось с 20 000 м³/час до 40 000 м³/час. Температура машинного зала понизилась на 10°С.

Электропривод вспомогательных механизмов. Наиболее распространенные в цехах двигатели вспомогательных механизмов прокатных станов — это двигатели постоянного тока типа КП, КПД и КП4 и двигатели переменного тока типа КТ, КТК и АЗР (для индивидуальных рольгангов).

Из двигателей постоянного тока наилучшими эксплуатационными качествами обладают двигатели КПД. Но их основной недостаток — частое повреждение обмоток возбуждения и дополнительных полюсов. Пробой этих обмоток на сердечник являются следствием плохого крепления. Посадка катушек на сердечник производится без металлического каркаса, поэтому катушка разбалтывается, изоляция на углах перетирается и обмотка замыкается на корпус. Хотя катушки хорошо компаундированы, их изоляция по отношению к корпусу недостаточна, выпуск изоляции на катушку мал.

Электроремонтный цех Комбината практикует сплошную укладку прессшпана по всей станине, что снижает число пробоев.

Основной конструктивный недостаток двигателей КП — применение подшипников скольжения, вследствие чего масло попадает в обмотки двигателей и повреждает их изоляцию. На двигателях, мощностью до 100 кВт, согласно существующим нормам, для заливки подшипников применяется алькусин, и при попадании пыли в смазку происходит большая выработка шеек валов, а при недостаточной смазке — портятся и подшипники, и вал. Но наряду с указанными недостатками, эти двигатели имеют хорошую коммутацию и достаточную изоляцию. Учитывая это, комбинат предпринял реконструкцию двигателей, заменив подшипники скольжения подшипниками качения — шариковыми в двигателях малой мощности и роликовыми — в двигателях большой мощности.

Сейчас на комбинате работают больше 100 реконструированных двигателей различной мощности. Если до реконструкции двигатель КП вскрывался 4 раза в год, то после реконструкции он вскрывается раз в год, — срок службы двигателя без вскрытия увеличился в четыре раза.

В заключение необходимо подчеркнуть, что создать технически совершенный и безотказно работающий электропривод можно только при совместной работе проектных организаций, конструкторов и работников эксплуатации.

Электростатический генератор с ленточным транспортером — изобретение Б. И. Угримова

Доктор техн. наук, проф. Э. А. МЕЕРОВИЧ и инж. А. А. КУЗНЕЦОВ

Энергетический институт им. Кржижановского АН СССР

Электростатические генераторы с ленточными транспортерами широко применяются при различных физических и технических исследованиях, когда при небольшой мощности требуются весьма высокие напряжения.

Работа такого электростатического генератора основана на принципе изменения заряженной емкости при постоянном заряде. В этом случае напряжение на емкости по мере ее уменьшения возрастает по закону $U'' - U' =$

$$= \frac{q}{C''} - \frac{q}{C'}, \text{ где } q \text{ — заряд, а } C'' \text{ и } C' \text{ — значения емкости}$$

для двух положений заряда, U'' и U' — соответствующие им значения напряжения.

Конструктивно электростатический генератор с ленточным транспортером состоит из устройства, которое служит для зарядки движущейся ленты (ремня) при сравнительно невысоком потенциале, устройства для съема зарядов при высоком потенциале и проводящей сферы, служащей для собирания зарядов [Л. 1].

Распространенное мнение, что идея, положенная в основу конструкции такого генератора, а также предложение об использовании такого генератора для практических задач физического исследования впервые высказаны Ван-де-Граафом, — неверно.

Начальная идея переноса зарядов при помощи движущейся ленты относится по некоторым данным [Л. 3] к 1784 г. Движение ленты тогда предлагалось осуществлять ручным способом. Однако эта идея до работ Б. И. Угримова не получила развития.

Непосредственным предшественником Ван-де-Граафа являлся известный московский электротехник проф. Угримов, Борис Иванович, который впервые указал на возможность получения весьма высоких потенциалов с помощью ленточного транспортера.

Мысль об электростатическом генераторе с ленточным транспортером возникла у Б. И. Угримова в результате изучения некоторых случаев повреждения изоляции электрических машин, приводившихся во вращение с помощью ременной передачи. Ему удалось выяснить, что пробой изоляции электрических машин может происходить в результате возникновения высокой разности потенциалов за счет электризации ременной передачи и переноса зарядов движущимся ремнем. Б. И. Угримов не только исследовал это явление, но и предложил его использовать для генерирования высоких напряжений. В лаборатории МВТУ им была создана соответствующая экспериментальная установка. Электризация ремня производилась за счет трения при проскальзывании ремня у шкива двигателя. Заряд при этом накапливался на емкости, созданной ремнем и шкивом. По мере движения ремня, заряженный элемент которого удаляется от шкива, эта емкость уменьшается и потенциал заряда увеличивается.

Распределение потенциала вдоль ремня, полученное Б. И. Угримовым, представлено на рис. 1. При движении ремня передачи со скоростью 21 м/сек удалось получить напряжение, равное 80 кв. Заряд при высоком потенциале

снимался с движущегося ремня при помощи специального электрода, расположенного у его середины. Ток, который был получен от этой установки, был равен 2 ма. Так как оба конца передачи находились при потенциале земли, то наибольший потенциал устанавливался у середины ремня. В качестве нагрузки на генератор включалась катодно-лучевая трубка (рис. 2).

По интенсивности катодного пучка этой трубки было установлено, что такой генератор дает постоянное высокое напряжение при постоянной скорости движения ремня, переносящего электрические заряды.

Таким образом, Б. И. Угримов¹ была не только реализована идея высоковольтного электростатического генератора, но и указана широкая область применения —

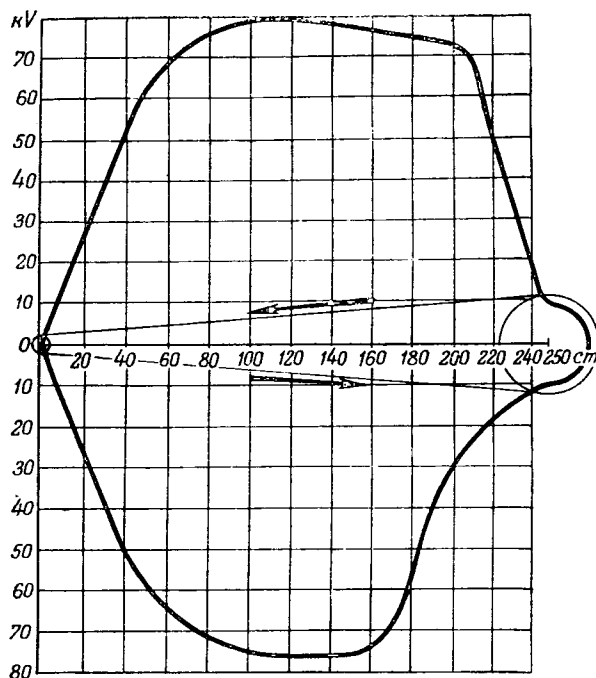


Рис. 1.

создание потока заряженных частиц высокой интенсивности.

Заметим далее, что работа Б. И. Угримова была подробно освещена в 1926 г. в широко распространенном во

¹ Рис. 1 и 2 заимствованы из статьи Б. И. Угримова [Л. 5].

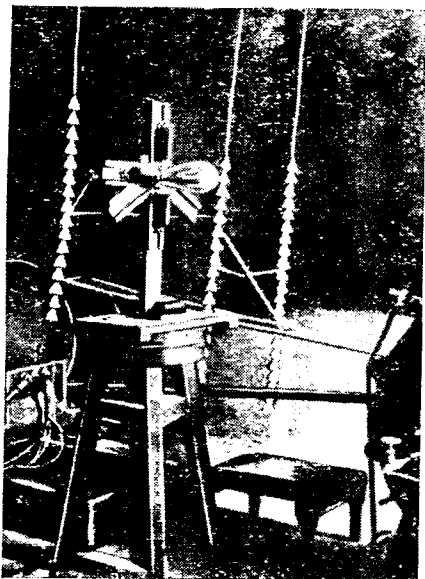


Рис. 2.

в всех странах французском журнале *Revue Generale de L'electricite*. На год раньше, в 1925 г., содержание работы было изложено в хорошо известном журнале *ETZ*. Конструктивно генератор, предложенный Ван-де-Граафом в 1929 г. [Л. 2], является дальнейшим развитием

и усовершенствованием установки, созданной Б. И. Угрюмовым.

Необходимо отметить, что в статье, опубликованной Ван-де-Граафом совместно с Комптоном и др. [Л. 1] посвященной описанию генератора, приводятся исторические данные, касающиеся развития идеи электростатического генератора. Упоминается генератор Томпсона, в котором заряды переносятся падающими водяными каплями, генератор Сванна, в котором заряды переносятся на галлическими шариками, генераторы Риджи и Берби с переносом зарядов при помощи сегментированных лент упоминается генератор с переносом зарядов при помощи взвешенных в струе воздуха твердых частиц; работы Б. И. Угрюмова не упоминаются.

Конечно, генератор Ван-де-Граафа, получивший широкое техническое применение и построенный на миллионы вольт, сильно отличался по конструкции от лабораторной установки Б. И. Угрюмова, построенной на основе скромных возможностей учебной лаборатории. Однако справедливо утверждать, что генератор Б. И. Угрюмова был прообразом современных сверхвысоковольтных электростатических генераторов с ленточным транспортером. Приоритет создания электростатического генератора высокого напряжения рассмотренного выше типа принадлежит Б. И. Угрюмову. Основываясь на этом и учитывая последовательность разработки упомянутых генераторов, следует последним присвоить имя Угрюмова—Ван-де-Граафа

Литература

1. А. П. Гринберг. Методы ускорения заряженных частиц. Гостехтеоретиздат, 1950.
2. *Phys. Rev.* v. 43, p. 149, 1933.
3. *A T M* № 81, 1938.
4. *ETZ*, N. 33, S. 1237, 1925.
5. *Revue Generale de L'electricite* T. XIX, № 25, 1926.



Работы М. О. Доливо-Добровольского по созданию электроизмерительной техники переменного тока

Заслуги Михаила Осиповича Доливо-Добровольского (3.1.1862 — 15.11.1919) в области мировой электротехники исключительно велики. Он — творец системы трехфазного тока, позволившей разрешить задачу передачи электроэнергии на большие расстояния и обеспечившей быстрое развитие промышленного электропривода. Он — изобретатель трехфазного асинхронного электродвигателя и трехфазного трансформатора. Доливо-Добровольскому принадлежит наряду с этим выдающаяся роль в создании и развитии электроизмерительной техники переменного тока; ценный вклад внесен им и в другие области электротехники.

По отзыву проф. М. А. Шателена М. О. Доливо-Добровольский был прямым продолжателем метрологических работ великих русских физиков Ленца, Якоби и Столетова. Между тем вклад М. О. Доливо-Добровольского в электроизмерительную технику обычно освещается значительно слабее других его работ. Помещая статью проф. А. Е. Каплянского, редакция журнала «Электричество» имеет целью привлечь внимание читателей к этой стороне деятельности талантливого русского инженера и изобретателя М. О. Доливо-Добровольского.

Изобретение и разработка М. О. Доливо-Добровольским трехфазной системы и всех ее звеньев — двигателей, генераторов, трансформаторов и линий электропередачи — были сопряжены с исследованиями и изобретениями также в области электрических измерений. Разработке новых приборов и методов измерения М. О. Доливо-Добровольский уделял на протяжении всей своей деятельности очень большое внимание. Характерно в этом смысле одно место в его статье «Из истории трехфазного тока» (1917 г.), касающееся успешного пуска в ход первого трехфазного асинхронного электродвигателя мощностью в 0,1 л. с. Он вспоминает о переделке в ваттметр имевшегося у него под рукой электродинамометра путем наложения

соответствующего числа витков на подвижную катушку, чтобы как можно скорее перейти к определению к. п. д. двигателя при нагрузке (торможении).

В большой статье «К вопросу легализации электрических единиц» (1893 г.), написанной накануне Чикагского электротехнического конгресса, установившего международную систему единиц, М. О. Доливо-Добровольский пишет: «Если дело идет об уточнении значения ома, оно может быть предоставлено точным наукам; но вопрос выбора обозначений и определений непосредственно касается техников, которые могут пострадать от путаницы или сложности системы». В этой статье М. О. Доливо-Добровольский приводит замечания к предложениям, подготов-

ленным к Чикагскому конгрессу, и вносит следующие собственные предложения: 1) возражая против определения ~~она~~ по длине и массе ртутного столба, он предлагает оставить старое определение по длине и сечению, как соответствующее обычной электротехнической практике; 2) он предлагает определять по количеству разложенного вещества сначала кулон, а по нему уже — ампер, а не наоборот, так как это логичнее и соответствует самому опыту; 3) он предлагает определять переменный ток по его среднему значению; действующее же значение измерять в «эффективных амперах», т. е. по названию единицы судить о том, что измеряется — среднее или действующее значение; 4) он предлагает сначала определять единицу работы (джоули), а по ней — единицу мощности (ватт), а не наоборот; 5) он предлагает определять фараду, как емкость, заряжаемую 1 в до 1 к , а не как емкость, которая при 1 к заряжается до 1 в ; 6) он предлагает в области магнитных величин оставить, как практическую, абсолютную электромагнитную систему CGSM.

В книге «Русские электротехники второй половины XIX века» М. А. Шателен пишет о Доливо-Добровольском как об авторе ряда электроизмерительных приборов: «Он разработал особый вид электромагнитных амперметров и вольтметров, которые.. очень широко применялись для измерений как постоянных, так и переменных токов. Позже Доливо-Добровольский применял для устройства измерительных приборов принцип двигателя с вращающимся магнитным полем переменного тока. На этом принципе устроены его ваттметры, фазометры и частотомеры».

Описание и рисунок электромагнитного амперметра Доливо-Добровольского помещены в книге проф. Эрика Жера «Электрические измерения», изданной в 1898 г. на русском языке с дополнениями проф. П. Д. Войнаровского.

«В амперметре Доливо-Добровольского подвижная часть состоит из стержня мягкого железа, втягиваемого соленоидом при протекании через этот соленоид тока (рис. 1). Это действие передается двуплечему рычагу, уравновешиваемому на одном из своих концов противовесом. Движение рычага передается длинному указателю, конец которого перемещается по градуированному кругу».

В своих работах Доливо-Добровольский внес полную ясность в вопрос о сдвиге фаз между напряжением и током и предложил первый прибор для его измерения.

Статью «Прибор для определения разности фаз при переменном токе» (1894 г.) Доливо-Добровольский начинает словами, характерными для создателя трехфазной системы: «Современная техника переменного тока по праву может быть названа техникой сдвига фаз». Он дает векторную диаграмму, разлагая ток на активную и реактивную составляющие, и предлагает «амперметр для безындуктивной (реактивной) составляющей тока», показывающий также и знак этого тока. Прибор похож на асинхронный двигатель (рис. 2). Он состоит из двух неподвижных взаимно перпендикулярных катушек, внутри которых расположен подвижный стальной диск; противодействующий момент создается спиральной пружиной.

Если токи I_1 и I_2 , обтекающие катушки, сдвинуты по фазе на угол φ , то при данной частоте момент вращения

$$D = aI_1I_2 \sin \varphi.$$

Если одна из катушек, выполненная из большого числа витков вместе с большим безиндуктивным добавочным сопротивлением будет включена в цепь параллельно, ток в ней будет почти совпадать по фазе с напряжением U . Если другая катушка с малым числом витков будет включена в цепь последовательно, момент вращения будет равен:

$$D = bUI \sin \varphi$$

и в зависимости от знака сдвига фаз диск будет отклоняться в ту или другую сторону.

Если напряжение будет неизменно (или его изменение будет скомпенсировано соответствующим изменением добавочного сопротивления), то

$$D = cI \sin \varphi = cI_r,$$

т. е. момент вращения при заданном напряжении и частоте пропорционален реактивному току.

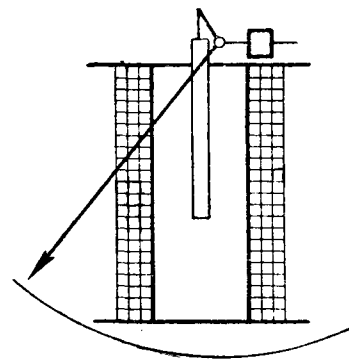


Рис. 1.

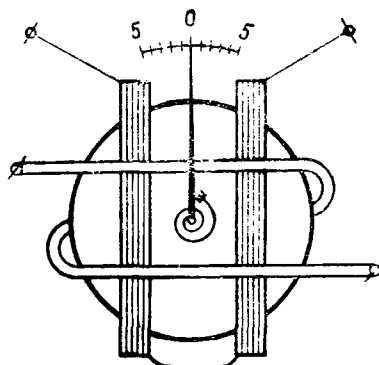


Рис. 2.

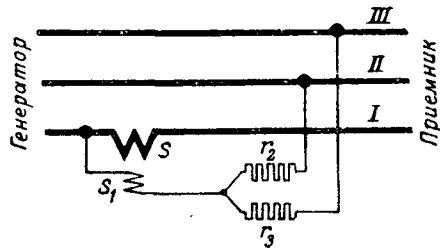


Рис. 3.

М. О. Доливо-Добровольский предлагал включать этот прибор в цепи генераторов переменного тока, так как амперметр и вольтметр не могут дать полной картины работы этих генераторов. Как видно из описания и теории этого прибора, он является по существу своему измерителем реактивной мощности

$$P_r = UI \sin \varphi,$$

а не фазометром, как его называют некоторые авторы.

Вопросы измерения в цепях генераторов трехфазного тока весьма занимали электротехников того времени. В статье «Измерение мощности трехфазного тока» (1896 г.) немецкий электротехник Бен-Эшенбург, указывая на затруднение измерения мощности при неодинаковой нагрузке фаз и отсутствии нулевого провода, предлагал для этой цели метод одного ваттметра (рис. 3); в этой схеме сопротивление параллельной катушки S_1 мало по сравнению с добавочными сопротивлениями $r_2 = r_B$, последовательная катушка S включена в одну фазу. Бен-Эшенбург писал: «Теория очевидна. Через параллельную цепь идет сумма токов, каждый из которых пропорционален и совпадает по фазе с линейными напряжениями U_{II} и U_{IIII} . Следовательно, отклонение ваттметра дает суммарную мощность трехфазной системы также и для неодинаковой нагрузки». Однако в письме, опубликованном через 2 недели, М. О. Доливо-Добровольский указал, что предложение Бен-Эшенбурга в части, касающейся измерения неодинаковой нагрузки, неверно: пусть имеется нагрузка

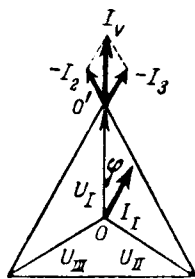


Рис. 4.

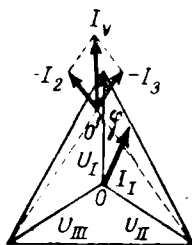


Рис. 5.

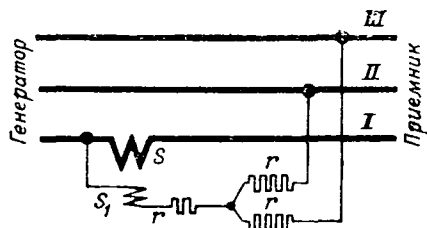


Рис. 6.

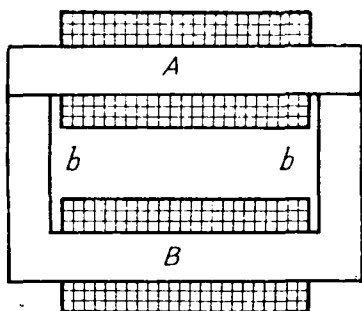


Рис. 7.

только между проводами II и III; провод I будет без тока и ваттметр ничего не покажет. Вместе с тем схема полезна для одинаковой нагрузки, так как не требует нулевой точки и может быть выполнена обычным ваттметром.

Заметим, что если можно пренебречь сопротивлением параллельной катушки S_1 , то для схемы рис. 3 получается векторная диаграмма (рис. 4), где изображены векторы токов I_V, I_2, I_3 всех трех измерительных цепей; при симметричной системе фазных напряжений ваттметр даст отклонение, пропорциональное $U_I I_1 \cos \varphi_I$, т. е. мощности первой фазы, и, следовательно, Доливо-Добровольский был прав, отметив пригодность схемы для одинаковой

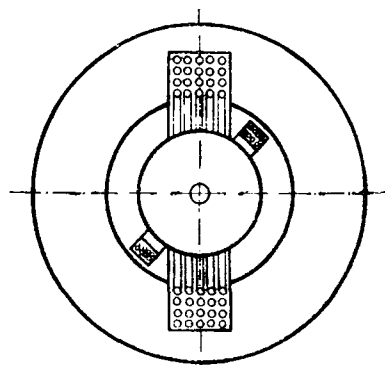


Рис. 8.

нагрузки фаз. Если же сопротивлением катушки пренебречь нельзя, то векторная диаграмма получает вид рис. 5, вектор тока I_V параллельной цепи в общем случае не совпадает по фазе с фазным напряжением первой фазы; показание было бы верным только, если сопротивление катушки S_1 было бы безиндуктивным. Схема с искусственной нулевой точкой (рис. 6) лучше схемы Бен-Эшенбурга, так как при равенстве всех сопротивлений параллельной цепи и симметрии фазных напряжений всегда даст правильную мощность одной фазы.

М. О. Доливо-Добровольского, расчетчика и конструктора электрических машин и трансформаторов, всегда интересовало измерение потерь в стали на гистерезис и вихревые токи и он является автором ваттметрового метода измерения этих потерь. В статье „Магнитное испытание листового железа“ (1900 г.) Эпштейн пишет „своем“ аппарате магнитная цепь которого состоит из двух пакетов испытываемого железа и связывающего их яра. Обмотка наложена на замыкающее яро и аналогична в принципе аппарату, предложенному Добровольским и Каппом».

Аппарат, созданный М. О. Доливо-Добровольским описан в упомянутой выше книге Жерара 1898 г. Аппарат состоит из четырехугольного железного яра с двумя катушками (рис. 7), в цепь которых включается ваттметр. Зная вес всего яра и его верхней части А, можно легко вычислить долю потерь, приходящуюся на нижнюю П-образную часть яра. Верхняя часть яра А заменяется испытываемым железом; потери в нем равны разности нового показания ваттметра и потерь в нижней части яра.

Свой громадный опыт электромашиностроителя М. О. Доливо-Добровольский переносит в электроприборостроение. В большой статье „О применении железа в электроизмерительных приборах“ (1913 г.) Доливо-Добровольский доказывает целесообразность внедрения стали в технические приборы для увеличения момента вращения. В названной статье описывается первый хорошо работающий ферродинамический ваттметр; его магнитный провод (рис. 8) весьма напоминает динамомашину постоянного тока.

Хотя идея применения стали в ферродинамометрах была не нова, многочисленные попытки известных специалистов — Бенишке, Лотца (Германия), Сумпнера (Англия) — не увенчались успехом из-за неправильного конструирования приборов, оказавшихся очень неточными. Поэтому укоренилось неправильное мнение, что сталь является источником больших погрешностей и что ее применять не следует. М. О. Доливо-Добровольский рассмотрел влияние причины погрешностей — остаточной индукции в стали. Гистерезисная петля замкнутого магнитопровода (рис. 9) дает значительную остаточную индукцию B_r . Ее можно рассматривать, как созданную коэрцитивной силой внутренней и. с. F_c стали. Если теперь сделать в магнитопроводе воздушный зазор, для создания той же максимальной индукции B_m потребуется значительно большая и. с. и петля получит вид 2; у этой петли остаточная индукция B_r' будет значительно меньше B_r . Объясняется это тем, что та же внутренняя и. с. стали F_c создает теперь поток также и в воздушном зазоре, обладающем

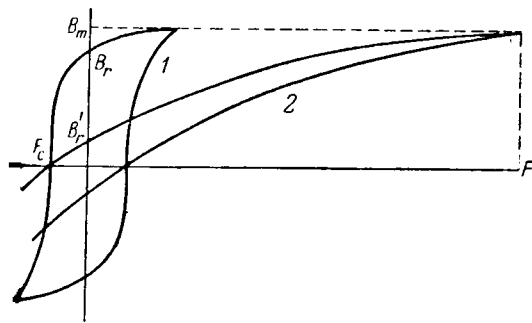


Рис. 9.

альшим магнитным сопротивлением; доля н. с., остающаяся на сталь, невелика и созданная ею индукция также мала. В результате относительное значение остаточной индукции в стали будет не больше отношения н. с. (ампервитков), нужных для намагничения стали, суммарной н. с. всего магнитопровода.

Следовательно, выбирая достаточно большой воздушный зазор, можно сделать остаточную индукцию и вызываемую ею погрешность сколь угодно малой. В ферродинамическом ваттметре М. О. Доливо-Добровольского в 200 ампервитков всей магнитной цепи собственно на галь приходится меньше одного ампервитка, следовательно, от остаточной индукции остается меньше 0,5%, хотя н. с. стали составляет 300 г. В нежном электромагнитном приборе, у которого остаточная индукция составляет также 0,5%, сталь весит всего 1 г. Таким образом, «много гали» отнюдь не значит «большая остаточная индукция». М. О. Доливо-Добровольским при той же погрешности получен восьмикратный момент, хотя вес подвижной системы увеличился меньше, чем в 3 раза.

Погрешность от гистерезиса и вихревых токов из-за сдвига фаз тока и магнитного потока может быть также уменьшена очень малой путем снижения активной мощности по сравнению с реактивной; для этого следует устроить сильный воздушный зазор и применить большую н. с. возбуждения.

Доливо-Добровольский отмечал целесообразность применения ферродинамической системы для регистрирующих приборов.

Георг Кейнат (Германия) в своей книге «Электроизмерительная техника» полностью приводит патент Доливо-Добровольского на описанный выше ферродинамический ваттметр и рисунок прибора, взятый из упомянутой статьи (рис. 10). Как видно из рис. 10, прибор скон-

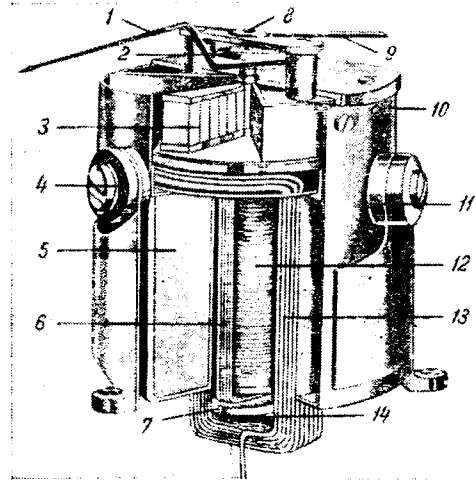


Рис. 10.

1 — стрелка; 2 — верхняя пружина; 3 — крыло успокоителя; 4 — болт крепления; 5 — ярмо магнитопровода; 6 — подвижная катушка; 7 — нижняя пружинка; 8 — верхний подпятник; 9 — установка на нуль; 10 — камера успокоителя; 11 — изоляция; 12 — железный сердечник; 13 — неподвижная катушка; 14 — нижний подпятник.

струирован весьма целесообразно и компактно и является вполне современным.

Интересно отметить, что М. О. Доливо-Добровольский рекомендовал вести работу по внедрению стали также и в электромагнитные приборы, чтобы получить больший момент вращения и более прочную систему. Он указывал, что это следует сделать по ряду соображений: крайней простоты электромагнитной системы, меньшего собственного потребления, лучшего соотношения для добавочного сопротивления и возможности сделать показания прибора независимыми от частоты в широких пределах.

В рамках статьи нет возможности осветить более полно вклад М. О. Доливо-Добровольского в области электрических измерений. Но и из изложенного выше видно, насколько взгляды и предложения М. О. Доливо-Добровольского по вопросам электроизмерительной техники были плодотворными и ценными.

Доктор техн. наук, проф.
А. Е. КАПЛЯНСКИЙ



К статье В. Ю. Ломоносова „Операторное исчисление и электротехническое образование“

(Электричество, № 2, 1952, стр. 54)

Член-корр. АН СССР К. А. КРУГ

Большинство задач, относящихся к исследованию переходных процессов, описываемых дифференциальными уравнениями, бесспорно могут быть решены классическим методом, в том числе и методом, выдвигаемым В. Ю. Ломоносовым. Однако для решения таких дифференциальных уравнений с многими неизвестными в случае сложных цепей приходится иногда многократно производить дифференцирование и подстановки для того, чтобы получить дифференциальное уравнение с одним неизвестным, при этом порядок такого уравнения может доходить до двухкратного числа неизвестных. После этого составляется характеристическое уравнение, решение которого даст значения коэффициентов в показателях степени при времени t . Далее для нахождения множителей перед экспонентами приходится снова решать ряд уравнений, число которых может равняться порядку дифференциальных уравнений, умноженному на число неизвестных, увеличенное на единицу. Такое решение сначала системы дифференциальных уравнений, затем характеристического уравнения и, наконец, системы алгебраических связано с весьма кропотливыми и трудоемкими вычислениями.

Хотя алгебраизация дифференциальных уравнений, впервые примененная Лапласом, не есть исключительная особенность операторного исчисления и она может быть применена для упрощения записи дифференциальных уравнений и при классическом методе, однако алгебраизация дифференциальных уравнений неотделима от операторного исчисления, и в то же время операторное исчисление позволяет одновременно с алгебраизацией дифференциальных уравнений учитывать также и начальные условия. В результате мы получаем лишь одну систему алгебраических уравнений, связывающих изображения искомых величин, решая которую, мы находим изображения каждой из искомых величин в виде функций от оператора p .

Для практических расчетов совершенно не важно как по изображениям получаются оригиналы, т. е. соответствующие функции времени, по методу ли трансформаций Лапласа, при помощи вычетов и интегралов Фурье или по методу Карсона. Существуют длиннейшие таблицы, сопоставляющие изображения (функции от p) и оригиналы (соответствующие им функции времени), например, в книге В. А. Диткина и П. И. Кузнецова.

По этим таблицам сразу могут быть найдены решения. Если в таблицах нет подходящего изображения с его оригиналом, то вряд ли и классический метод даст искомое решение. В таких случаях приходится изображение разлагать в ряд и для отдельных слагающих ряда находить их оригиналы или прибегать к другим приближенным методам.

Когда же мы имеем дело с цепными схемами или схемами с распределенными параметрами, то операторный метод также гораздо проще и скорее приводит к формальному решению задачи, чем метод классический.

По сравнению с классическим методом преимущества операторного метода заключаются в его простоте и однообразии составления уравнений и их решения и в возможности наглядного и быстрого решения практических

задач. Все это привело к тому, что операторный метод широко внедрился в практику и было бы неправильно исключить его из программ курсов электротехнического образования.

Кандидат техн. наук, доц. С. В. СТРАХИ

Операторное исчисление является мощным методом решения ряда важных и трудных задач современной электротехники и его роль в электротехническом образовании должна еще более возрасти.

Рассмотрим, какие новые возможности дает применение операторного исчисления при расчете переходных процессов в разветвленных цепях с сосредоточенными параметрами, при расчете переходных процессов в цепях с вращающимися машинами, при решении ряда задач теории автоматического регулирования и при расчете переходных процессов в цепях с распределенными параметрами.

Покажем, что именно применение операторного исчисления дает возможность строго доказать применимость всех методов расчета установившихся режимов линейных электрических цепей (метод контурных токов, метод узловых потенциалов, метод эквивалентного генератора, метод преобразований пассивных и активных цепей) к расчету переходных процессов.

Доказательство приведем на примере достаточной общей схемы с ненулевыми начальными условиями, при

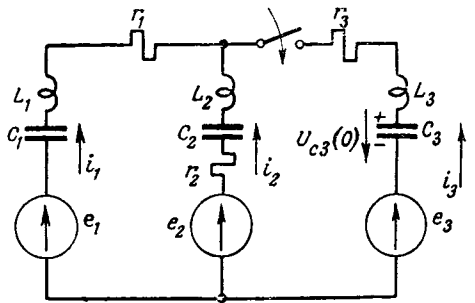


Рис. 1.

ставленной на рис. 1. Записав для этой цепи уравнения Кирхгофа в операторной форме:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0,$$

$$E_1 - E_2 = r_1 I_1 + L_1 p [I_1 - i_1(0)] + \frac{1}{C_1 p} + u_{c1}(0) - r_2 I_2 -$$

$$- L_2 p [I_2 - i_2(0)] - \frac{1}{C_2 p} - u_{c2}(0),$$

$$E_2 - E_3 = r_2 I_2 + L_2 p [I_2 - i_2(0)] + \frac{1}{C_2 p} +$$

$$+ u_{c2}(0) - r_3 I_3 - L_3 p I_3 - \frac{1}{C_3 p} + u_{c3}(0)$$

и переписав их в виде:

$$\begin{aligned}
 I_1 + I_2 + I_3 &= 0, \\
 E_1 + L_1 p i_1(0) - u_{c1}(0) - [E_2 + L_2 p i_2(0) - u_{c2}(0)] &= \\
 &= \left(r_1 + L_1 p + \frac{1}{C_1 p} \right) I_1 - \left(r_2 + L_2 p + \frac{1}{C_2 p} \right) I_2, \\
 E_2 + L_2 p i_2(0) - u_{c2}(0) - E_3 - u_{c3}(0) &= \\
 &= \left(r_2 + L_2 p + \frac{1}{C_2 p} \right) I_2 - \left(r_3 + L_3 p + \frac{1}{C_3 p} \right) I_3,
 \end{aligned} \quad (2)$$

легко находим по ним эквивалентную схему, представленную на рис. 2. Из нее следует, что, вводя операторные реактивные сопротивления Lp и $\frac{1}{Cp}$, заменив заданные э. д. с. их изображениями и включив в каждую ветвь с индуктивностью и емкостью дополнительные операторные э. д. с. $Lpi(0)$ и $-u_c(0)$, учитывающие ненулевые начальные условия в этой ветви (причем положительные направления этих дополнительных операторных э. д. с. приняты совпадающими с положительным направлением тока в этой ветви), получим, что уравнения Кирхгофа для изображений выглядят совершенно так же, как и для расчета установившегося режима цепи гармонического тока. А так как все методы расчета цепей выводятся из уравнений Кирхгофа, то, следовательно, для расчета изображений какого-либо тока или напряжения в схеме рис. 2 можно пользоваться методами контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного генератора и пре-

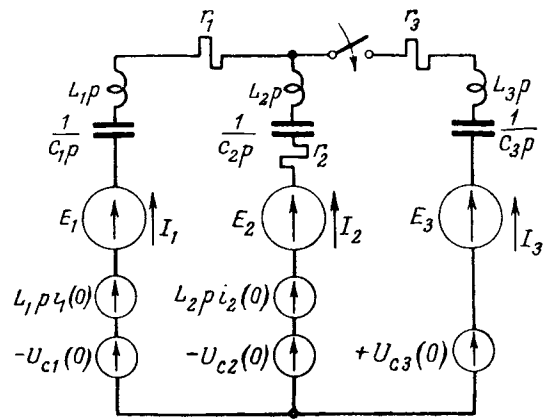


Рис. 2.

не нужно писать систему уравнений (2), ибо никаких постоянных интегрирования при этом определять не нужно.

Еще более значительны преимущества операторного метода при расчете переходных процессов в цепях с вращающимися машинами. Так, при определении токов в цепях статора синхронной (или асинхронной) машины для учета влияния обмоток ротора вводятся эквивалентные операторные реактивные сопротивления по продольной и поперечной осям $x'_d(p)$, $x''_d(p)$ и $x''_q(p)$ [Л. 1 уравнения (34, 19) и (34, 21)]:

$$x'_d(p) = x_d - \frac{i p x_{afd}^2}{p x_{ffd} + r_{fd}}$$

$$x''_d(p) = x_d - \frac{p^2 (x_{11d} x_{afd}^2 - 2 x_{f1d} x_{aid} x_{afd} + x_{ffd} x_{aid}^2) - p (x_{afd}^2 r_{1d} + x_{aid}^2 r_{fd})}{p^2 (x_{11d} x_{ffd} - x_{f1d}^2) + p (x_{11d} r_{fd} + x_{ffd} r_{1d}) + r_{1d} r_{fd}}, \quad (3)$$

образований. В развитие последнего положения заметим, что в схеме для изображений можно, например, преобразовать активный треугольник в активную звезду и наоборот. Итак, применение операторного исчисления позволяет чрезвычайно легко использовать для определения изображений токов и напряжений весь аппарат вычислений, применяемый для расчета установившихся токов и напряжений. Если найдено изображение величины, то, применяя теорему разложения и другие теоремы операционного исчисления, пользуясь таблицами оригиналов и изображений или в необходимых случаях применяя формулу обращения, можно найти искомого оригинал, т. е. временную функцию искомой величины.

Проводя расчет переходных процессов классическим методом, нельзя пользоваться методом эквивалентного генератора и методом преобразований и весьма затруднительно пользоваться методом узловых потенциалов.

С двумя утверждениями В. Ю. Ломоносова, касающимися расчета переходных процессов в цепях с сосредоточенными постоянными, согласиться никак нельзя. Дело в том, что, обсуждая классический и операторный метод, в конечном итоге никогда не забывали, что последний представляет собой один из возможных методов интегрирования дифференциальных уравнений. И при этом вовсе не ставился вопрос „об оправдании или осуждении Хевисайда“, так как современное операторное исчисление значительно переросло приемы Хевисайда. В своей статье В. Ю. Ломоносов утверждает, что по мнению одних праступать к решению системы уравнений (2) можно лишь после ознакомления с интегральными соотношениями Римана-Меллина, Бромвича и Карсона и т. д., в то время как другая точка зрения состоит в том, что система уравнений (2) проще всего решается средствами элементарной алгебры. Это утверждение неправильно, так как если уже написана система (2), содержащая произвольные постоянные интегрирования, то имеется ввиду их находить, т. е. решать задачу классическим методом. При решении задачи операторным методом даже

$$x''_q(p) = x_q - \frac{p x_{a1q}^2}{p x_{11q} + r_{1q}}$$

Они позволяют автоматически учитывать влияние этих обмоток на переходные процессы, не прибегая каждый раз к составлению дифференциальных уравнений для этих обмоток и исключению их токов из всей системы дифференциальных уравнений.

Такой возможности не дает классический метод. Больше того, ему чуждо само понятие операторных сопротивлений и, тем более, всякая возможность каких-либо действий с ними.

Если это иногда и делается при пользовании классическим методом (алгебраизация и результаты, из нее следующие), то только потому, что возможность этого обоснована в операторном методе.

Вся огромная современная литература по переходным процессам в электрических машинах пользуется операторным методом. И не потому, как утверждает В. Ю. Ломоносов, что „операторное исчисление вошло в моду“, а потому, что пользование им экономит время и труд исследователя и вычислителя.

Приведенный в конце обсуждаемой статьи довод в пользу операторного исчисления, заключающийся в том, что исключение операторного исчисления из учебных программ сделает недоступной для инженера обширную литературу, где это исчисление применяется и притом с несомненным успехом, действительно не может быть игнорирован, и В. Ю. Ломоносов ничем, собственно, не смог опровергнуть справедливости этого довода. Ведь не думает же серьезно автор статьи, что кто-то будет перерешать классическим методом хотя бы самые основные задачи расчета переходных процессов в электрических машинах, уже решенные операторным методом.

Большое значение имеет операторное исчисление в теории автоматического регулирования. В ней очень широко пользуются понятием передаточной функции

звена $K(p)$, равной отношению изображений выходной $x_{вых}(p)$ и входной величин $x_{вх}(p)$, т. е.

$$K(p) = \frac{x_{вых}(p)}{x_{вх}(p)}. \quad (4)$$

Знание передаточной функции звена $K(p)$ и возмущения на его входе позволяет найти процесс на выходе. Изучение звеньев систем автоматического регулирования проводится путем исследования их передаточных и временных функций. В частности, применяют передаточные функции звеньев нулевого, первого и второго порядков

$$\left. \begin{aligned} K(p) &= k, \\ K(p) &= \frac{k}{T_p \pm 1}, \\ K(p) &= \frac{k}{p^2 + 2\delta p + \omega_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

приходится весьма широко при решении задач теории автоматического регулирования. При решении задач устойчивости и качества регулирования обязательно требуется вычисление так называемой передаточной функции разомкнутой системы $W(p)$, что возможно только с помощью операторного исчисления. Решение задач стабилизации систем автоматического регулирования и ряда других вопросов также целиком основано на применении операторного исчисления. В теории автоматического регулирования, как и в других дисциплинах, весьма большое применение находят частотные методы исследования. Но ведь проще всего получить частотную (амплитудно-фазную или спектральную) характеристику $K(j\omega)$ системы, связав ее с изображением ее по Лапласу. Если

$$f(t) \doteq F(p) \quad (6)$$

и при этом

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt, \quad (7)$$

то

$$K(j\omega) = [F(p)]_{p=j\omega}. \quad (8)$$

Этой возможности лишится тот, кто не будет знаком с операторным методом. Итак, можно сказать, что в современной теории автоматического регулирования нельзя буквально шагу ступить, не зная операторного метода. Когда-то раньше теория автоматического регулирования развивалась, основываясь на классическом методе исследования переходных процессов. Но это время давно прошло. Преимущества операторного метода здесь неоспоримы. Любая современная книга или учебник по теории автоматического регулирования [Л. 2] построены, конечно, на базе операторного исчисления.

Переходя к расчету *переходных процессов в цепях с распределенными параметрами*, необходимо прежде всего отметить, что подавляющее большинство монографий по этому вопросу [Л. 3, 4, 5] написано с применением операторного исчисления. Видимо, операторным методом эти задачи решались потому, что он проще. В каком же положении окажутся студенты и инженеры, не знающие операторного метода? Несомненно, все эти задачи можно решить и классическим методом. Но зачем это делать? Гораздо проще познакомиться с операционным исчислением студентов в вузах, тем более что при 5½-летнем сроке обучения на лекции по операторному исчислению в курсе математики затрачивается 8—10 часов и в курсе теоретических основ электротехники 4—5 часов.

Задача о проникновении постоянного магнитного поля в стальной лист, которую В. Ю. Ломоносов решил в своей статье классическим методом, может быть решена операторным методом все же проще, чем классическим. Непонятными представляются те соображения, которые

приводит В. Ю. Ломоносов, чтобы доказать обратное. В самом деле, при сравнении обоих методов совершенно не нужно говорить о совпадающих операциях, к каковым относится, например, решение характеристического уравнения. Непонятно также, причем тут ссылки на справочник В. А. Диткина и П. И. Кузнецова и на то, как попали в справочник имеющиеся там 1538 оригиналов и изображений. Если даже согласиться с В. Ю. Ломоносовым в том, что затрата времени на решение приведенным задаче с помощью обоих методов примерно одинакова, то это только потому, что задача очень проста. В более сложных задачах существенные преимущества будут, конечно, на стороне операторного метода, как это говорилось выше.

Рассматривая далее общий случай задачи о включении линии конечной длины, отметим, что изображения напряжения и тока получены для любой точки линии [Л. 4, уравнения (45,18) и (45,19)]:

$$\left. \begin{aligned} U(x,p) &= U_0(p) \times \\ &\times \frac{Z_c Z_2 \operatorname{ch} \gamma(l-x) + Z_c^2 \operatorname{sh} \gamma(l-x)}{Z_c (Z_2 + Z_c) \operatorname{ch} \gamma l + (Z_c^2 + Z_c Z_2) \operatorname{sh} \gamma l} \\ I(x,p) &= U_0(p) \times \\ &\times \frac{Z_2 \operatorname{sh} \gamma(C-x) + Z_c \operatorname{ch} \gamma(l-x)}{Z_c (Z_2 + Z_c) \operatorname{ch} \gamma l + (Z_c^2 + Z_c Z_2) \operatorname{sh} \gamma l} \end{aligned} \right\}$$

Трудности заключаются в решении трансцендентного характеристического уравнения

$$Z_c (Z_2 + Z_c) \operatorname{ch} \gamma l + (Z_c^2 + Z_c Z_2) \operatorname{sh} \gamma l = 0, \quad (II)$$

чего не избежать и классическим методом расчета. И в то время как читателю, знакомому с операторным методом, эту задачу пришлось бы решать заново, лицу знакомому с ним, можно было бы рекомендовать использовать, например, приближенный метод Коизуми [Л. 1] и получить с нужной степенью точности оригиналы напряжения и тока.

Неправ В. Ю. Ломоносов, когда говорит, что «отдельные частные случаи общей задачи в счет не идут». Они могут не идти в счет, ибо такие задачи, как включение конечной линии без потерь, нагруженной на конце, включение конечной холостой и короткозамкнутой линий с потерями к постоянному напряжению, включение бездлинного кабеля конечной длины, нагруженного емкостью нагрузкой, решены до конца, притом именно операторным методом, и забывать об этом нельзя.

Отметим, наконец, что расчет переходных процессов в цепных схемах и электрических фильтрах в литературе также рассматривается только на базе операторного метода [Л. 3, 4, 5].

Итак, во всех рассмотренных областях электротехники операторный метод расчета переходных процессов широко применяется и имеет часто значительные преимущества перед классическим методом. Поэтому нужно углубить и расширить его изучение в вузах. С выводами статьи В. Ю. Ломоносова нельзя согласиться.

Литература

1. С. А. Лебедев и П. С. Жданов. Устойчивость параллельной работы электрических систем. Энергоиздат, 1934.
2. А. А. Воронов. Элементы теории автоматического регулирования. Воениздат, 1950.
3. Д. Р. Карсон. Электрические нестационарные явления и операционное исчисление. ГНТИ Украины, 1934.
4. К. А. Круг. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Госэнергоиздат, 1948.
5. М. И. Конторович. Операционное исчисление и нестационарные явления в электрических цепях. ГИИТ, 1949.
6. А. И. Лурье. Операционное исчисление и его приложения к задачам механики. ГИИТ, 1950.

**Доктор техн. наук, проф.
К. М. ПОЛИВАНОВ**

Не берусь утверждать, что операторное исчисление не нужно в электротехнике, но мне кажется бесспорным то, что многие электротехники сильно преувеличивают его значение. Часто приходится встречаться с примерами применения операторного метода там, где его целесообразность сомнительна. Еще чаще приходится встречаться собственно не с методом, а с языком операторного исчисления там, где, по существу дела, речь идет всего лишь о составлении характеристического уравнения или об определении его корней.

Недостаточное понимание существа метода иногда приводит к неверной записи, затемняющей полностью простое и ясное существо дела: например, складываются или приравниваются $f(t)$ и $F(p)$.

Мне представляется, что преувеличено внимание к операторному методу и в учебных программах. Еще больше это относится к аспирантским планам и к программам кандидатского минимума.

Многим представляется, что умение говорить на языке хевисайдских формул и преобразований Лапласа (особенно, если этот разговор становится мало доступным для окружающих) является таким свидетельством учености, что уже не требуется других доказательств ее. Я встречал лиц, „изучивших“ трансформацию Лапласа, теорию вычетов, помнящих наизусть интеграл Бромвича, но неумевших решить простую задачу о воздействии импульса на контур C, R .

Мне представляется, что вопрос о фетишизации операторного метода поднят В. Ю. Ломоносовым своевременно.

Правила устройства электротехнических установок¹

**Инж. А. Б. КРИКУНЧИК
и инж. А. Н. ШЕРЕНЦИС**

Теплоэлектропроект

Раздел „Защита от перенапряжений“

Анализ опыта эксплуатации высоковольтных линий электропередачи в СССР [Л. 1, 2, 3] показал совершенно определенные и бесспорные преимущества защиты от прямых ударов молнии при помощи тросовых молниеотводов, представляющих собой надежное профилактическое средство, предупреждающее возможность грозовых аварий на линиях электропередачи. Поэтому нельзя согласиться с формулировкой § 11 рассматриваемого раздела Правил, согласно которой не требуется защита тросами одноцепных линий электропередачи 110 кВ на металлических опорах обслуживающего потребителя, имеющего другие источники питания.

Как показывает опыт эксплуатации, широкое применение автоматического повторного включения значительно улучшило эксплуатационные показатели воздушных линий электропередачи и резко снизило количество грозовых отключений.

Тем не менее рекомендуемое Правилами применение автоматического повторного включения в качестве основного грозозащитного мероприятия на линиях 110 кВ на металлических опорах не может заменить защиту линий при помощи тросовых молниеотводов по следующим причинам:

а) Необходимо считаться со случаями неудачных включений. Несомненно, что процент неудачных включений с улучшением качества эксплуатации будет все время уменьшаться, тем не менее из-за возможности отказа аппаратуры и другим причинам определенный процент неудачных включений всегда имеет место [Л. 4]. Убытки же, вызванные даже единичными авариями, могут быть значительно больше, чем расходы по подвеске тросовых молниеотводов, стоимость которых, как известно, составляет незначительный процент от стоимости электропередачи.

б) Частое применение АПВ, вызванное отсутствием тросовой защиты, усложняет работу выключателей, так как после отключения короткого замыкания и затем повторного включения необходима ревизия выключателя. В одной из энергетических систем зарегистрированы случаи, когда пофазное АПВ вследствие интенсивной грозовой деятельности приходило в действие до шести раз в течение суток. В результате частого применения АПВ увеличивается износ и сокращаются сроки службы оборудова-

ования, а также возрастает объем профилактических работ на подстанции. Кроме того, применение АПВ на линиях без троса заставляет изоляцию подвергаться многочисленным воздействиям от атмосферных перенапряжений. При этом нет никаких гарантий в том, что в результате прямого удара не последует разрушения изоляторов. Кроме того, наиболее часто встречающиеся случаи перекрытия гирлянды, даже с незначительными следами повреждений, несомненно, приведут к ускоренному износу изоляторов и замена их окажется в конце концов неизбежной.

Поэтому в § 11 Правил следует изменить формулировку и указать, что все линии 110—220 кВ на металлических опорах должны защищаться тросом по всей длине.

В этом же параграфе написано, что максимально допустимая величина защитного угла тросового молниеотвода на опоре по отношению к внешним проходам не должна превышать 35°. Анализ опыта эксплуатации [Л. 1, 2] показывает, что вероятность прорыва молнии через тросовую защиту при углах более 30° заметно возрастает. В то же время на металлических опорах линии электропередачи очень легко создать защитный угол порядка 20...30° без того, чтобы это обстоятельство практически отразилось на стоимости электропередачи [Л. 5]. Поэтому нет никаких оснований нормировать предельно допустимую величину защитного угла на металлических опорах выше 20...30°. На деревянных опорах защита тросами применяется только на подходах к подстанции. Так как длина защищенного тросом подхода не превышает 1...2 км, то уменьшение величины защитного угла до 20...30° также практически не отразится на общей стоимости линии электропередачи на деревянных опорах.

На линиях электропередачи 35 кВ, как правило, можно отказаться от подвески тросов по всей длине. Однако встречаются случаи, когда линия 35 кВ обслуживает ответственных потребителей, отключение которых также недопустимо, как и в сетях 110...220 кВ. Кроме того, встречаются одиночные линии 35 кВ на металлических опорах. Для перечисленных выше категорий линий 35 кВ подвеска тросовых молниеотводов также является необходимой и должна быть рекомендована Правилами.

В § 16 Правил указывается, что линии 35 кВ и выше на металлических опорах без троса должны иметь защитную арматуру на гирляндах изоляторов. Прежде всего следует отметить, что защитная арматура не в состоянии предотвратить разряд по гирлянде. Поэтому применение защитной арматуры в виде колец может рекомендоваться только в сетях 220 кВ для улучшения распределения напряжения вдоль гирлянды в рабочем режиме. В сетях же 35...110 кВ нет оснований к установке защитной арматуры на гирляндах изоляторов как для линий с тросом, так и для линий без троса.

¹ Электричество, № 11 и 12, 1949; № 3, 4, 6, 8, 9 и 10, 1950; № 7 и 12, 1951.

В § 21 Правил указывается, что защита закрытых распределительных устройств и зданий электрических станций от прямых ударов молнии не требуется. Это указание основано на том, что повреждения зданий и сооружений на территории электростанции, вызванные ударами молнии, происходят очень редко, тем не менее нет никаких оснований отказываться от защиты сооружений на территории станции, тем более, что в этом случае основным защитным мероприятием является надежное заземление металлических частей зданий.

В § 21 указано, что «на подстанциях 20...35 кВ защита от прямых ударов должна быть осуществлена отдельно стоящими молниеотводами, имеющими отдельное заземление, не связанное с заземлением подстанции и отстоящее от него на расстоянии не менее 3 м». Между тем в том же параграфе указывается, что «для устройства молниеотводов могут быть использованы сооружения, расположенные вблизи открытого распределительного устройства (здание подстанции, прожекторные мачты, дымовые трубы и т. п.)». При использовании для этой цели прожекторных мачт и дымовых труб молниеотводы входят в прямое соприкосновение с заземленными оболочками аппаратов и кабелей значительно более низкого напряжения, чем напряжение 20...35 кВ. Поэтому в этом параграфе необходимо указать, что для того, чтобы избежать опасности заноса высокого потенциала в сеть низкого напряжения, электрическая проводка к прожекторам и осветительным приборам в указанных случаях должна осуществляться в металлической оболочке, например, свинцованным кабелем, а кабель после спуска с молниеотвода необходимо прокладывать непосредственно в земле и присоединять к заземляющему контуру подстанции таким образом, чтобы его оболочка не могла войти в соприкосновение с заземляющим контуром распределительного устройства на расстоянии менее 10 м от молниеотвода.

В § 23 написано, что защита подходов тросами должна удовлетворять требованиям, предусмотренным для линий электропередачи. Это значит, что на подходах допускается защитный угол порядка 35°, что еще более недопустимо, чем для линий электропередачи, так как каждый прорыв молнии через тросовую защиту представляет опасность для оборудования распределительных устройств.

В § 25 указано, что вентиляльные разрядники должны размещаться таким образом, чтобы силовые трансформаторы находились в зоне их защиты. Эта формулировка недостаточна. В зону защиты вентиляльных разрядников должно входить все оборудование распределительного устройства (кроме разомкнутого линейного выключателя).

В § 29 указано, что не допускается присоединение воздушных линий к генераторам мощностью 12 тыс. кВт и выше каждый, к синхронным компенсаторам, а также к генераторам меньшей мощности для станций, работающих изолированно, за исключением машин, удовлетворяющих требованиям § 31.

Эту рекомендацию нельзя признать полностью правильной по следующим причинам:

а) Невозможно запретить присоединение воздушных линий ко всем генераторам любой мощности, меньшей, чем 12 тыс. кВт для электростанций, работающих изолированно. В эту категорию попадает большое число мелких электростанций — коммунальных, сельскохозяйственных и промышленных, выполнение электрических сетей для которых только подземными кабелями экономически совершенно нецелесообразно, а практически во многих случаях и неосуществимо. Поэтому ограничение допустимости присоединения воздушных линий для всех электростанций с генераторами мощностью менее 12 тыс. кВт должно быть снято.

б) Не следует в отношении синхронных компенсаторов ставить более строгое требование, чем это сделано в Правилах для генераторов. Если в отношении генераторов не допускается присоединение воздушных линий при мощности генератора 12 тыс. кВт и выше, то Правила не допускают присоединения воздушных линий при любой мощности синхронного компенсатора. Это тем более неправильно, что отключение генератора имеет большее значение для сети, чем отключение синхронного компенсатора. Поэтому § 29 «Правил» целесообразно распространить только на синхронные компенсаторы мощностью 20 тыс. кВА и выше, осуществляя при наличии синхронных компенсаторов меньшей мощности в случае

присоединения воздушных линий те защитные мероприятия, которые рекомендуются последующими параграфами этого раздела.

Из § 30 следует исключить рекомендацию о применении реакторов на воздушных линиях для защиты от перенапряжений. Реакторы являются дорогостоящим аппаратом, требующим большого расхода меди, и их следует применять только в тех случаях, когда это необходимо для ограничения токов короткого замыкания. На воздушных линиях, в подавляющем большинстве случаев для ограничения токов короткого замыкания, не приходится устанавливать реакторы. Поэтому не следует рекомендовать применять реакторы на воздушных линиях только для защиты от перенапряжений, осуществляя защиту другими, более экономичными средствами.

В § 34 необходимо оговорить, что применение конденсированной емкости для защиты витковой изоляции рекомендуется только для тех машин, у которых межвитковая изоляция слабее изоляции обмотки по отношению к корпусу.

В § 36 указывается, что для генераторов, связанных с трансформаторами, работающими на воздушной линии электропередачи, специальной защиты от атмосферных перенапряжений не требуется при всех видах связи между генератором и трансформатором (кабели, голый провод и голые шины).

Между тем при соединении генераторов с трансформаторами голыми проводами или открытыми голыми шинами защита молниеотводами от прямых ударов молнии совершенно обязательна, а вопрос о защите в таких случаях от индуктированных перенапряжений подлежит дополнительному изучению.

В § 38 указано, что основным способом защиты от внутренних перенапряжений является достаточно высокий уровень изоляции электрических установок. Эта формулировка не характеризует требования, которые должны предъявляться к изоляции при установлении испытательных напряжений. Вместо этого следует указать расчетную или плиту коммутационных перенапряжений, возможную в сетях с различными способами заземления нейтрали.

Кроме замечаний, изложенных выше, следует остановиться на некоторых общих вопросах построения и содержания различных разделов «Правил».

Так, следует, чтобы положения, относящиеся к различным разделам Правил, были изложены в одном разделе, основном для данного вопроса, а в остальных разделах должны быть приведены только ссылки на соответствующий пункт другого раздела. Иначе неизбежно противоречие между разными разделами, особенно в процессе последующей переработки и пересмотра отдельных разделов Правил.

По-разному сформулированы требования к опорным заземлениям опоры при наличии защитного троса в разных разделах Правил.

Противоречие имеется также в вопросе о применении автоматического повторного включения на воздушных линиях электропередачи между разделами Правил «Защита от перенапряжений» и «Автоматика электрических систем».

Эти примеры показывают, что каждый вопрос должен быть однажды детально разработан в одном разделе «Правил», являющимся для этого вопроса основным, а во всех других разделах должны быть сделаны, в случае необходимости, лишь ссылки на соответствующий раздел Правил.

Ввиду важности издания Правил особое внимание должно быть уделено тщательной их корректуре, так как опечатки в Правилах могут приводить к очень неприятным последствиям. Поэтому непростительна опечатка, имеющаяся в § 19 рассматриваемого раздела Правил (вместо 75 см указан размер 75 м).

Литература

1. В. В. Бургсдорф. Электричество, № 2, 1949.
2. П. А. Юриков. Эл. станции, № 9, 1950.
3. В. А. Вершков и П. А. Юриков. Эл. станции, № 6, 1949.
4. И. И. Соловьев, М. М. Богина и др. Эл. станции, № 5, 1951.
5. А. Н. Шеренцис. Эл. станции, № 8, 1949.

Инж. Т. П. МУСАТОВ Донбассэнерго

Ячейка НИТОЭ Сталинского района электросетей Донбассэнерго, тщательно обсудив вторую часть Правил, высказав ряд пожеланий по отдельным вопросам, в достаточной мере не учитывающих уже имеющегося на местах эксплуатационного опыта. Наиболее существенные из принятых пожеланий приведены ниже.

По разделу «Релейная защита» § 34 предусматривает постоянный контроль исправности цепи отключения в цепях управления выключателями напряжением 35 кВ и выше, установленных на обслуживаемых подстанциях.

В данном случае, во-первых, надо исключить не отвечающее действительности определение «обслуживаемых» дистанций, так как не существует не обслуживаемых дистанций.

Даже при отсутствии непрерывного дежурства обслуживающего персонала в соответствии с § 577 Правил технической эксплуатации любая подстанция напряжением 20 кВ и выше должна быть осматрена не реже одного раза в сутки. Очевидно, что осмотр подстанции будет являться ее обслуживанием.

Во-вторых, по сути дела, контроль исправности цепи отключения на подстанциях 35 кВ и выше в равной степени необходим для всех выключателей, установленных в этих подстанциях. Как известно, подстанции 35 кВ выше располагают распределительными устройствами 6 кВ, к которым подключается разветвленная потребительская сеть, повреждаемость которой во много раз превышает повреждаемость сетей 35...110 кВ.

Неисправность цепи отключения выключателя 3...6 кВ при коротком замыкании у потребителя влечет за собой отключение силовых трансформаторов данной подстанции.

В целях повышения надежности энергоснабжения потребителей контроль исправности цепи отключения должен быть на всех выключателях подстанции 35 кВ и выше.

В этом же разделе в отношении защит шинносоединительного выключателя рекомендуется дополнить § 107 указанием на желательность установки АПВ и на шинносоединительных выключателях 35 кВ и выше тем более, что такое мероприятие в ряде энергосистем уже проводится и дало положительные результаты.

Вводятся АПВ и на силовых трансформаторах подстанций 35 кВ, что, к сожалению, не получило отражения в Правилах. Следует, учитывая опыт внедрения в энергосистемах АПВ на силовых трансформаторах, установленных на подстанциях напряжением 35 кВ, включить соответствующее дополнение в часть, посвященную автоматизации энергетических систем.

В разделе «Защита предохранителями», подсоединение силовых трансформаторов через предохранители и обычные разъединители допускается только в тех случаях, когда, например, мощность трансформатора при напряжении 35 кВ не будет превышать 1000 кВА. Такое ограничение мощности силовых трансформаторов для напряжения 35 кВ нельзя считать приемлемым, так как предшествующее в стране широкое развитие сетей 35 кВ ставит вопрос о предельно возможном упрощении подстанций этого напряжения. Упрощение будет особенно эффективно и легко достижимо на тех подстанциях, защита трансформаторов которых будет выполнена на предохранителях. Практика эксплуатации передвижных подстанций с мощностью трансформаторов до 1800 кВА включительно в защищенных предохранителями показала вполне необходимую работу при наличии обычных разъединителей действующего типа с дугогасящими рогами. Исходя из эксплуатационного опыта, следует допустить установку трансформаторов 55 кВ мощностью до 1800 кВА включительно при защите их предохранителями на обычных разъединителях вертикально-рубящего типа с дугогасящими рогами.

По разделу «Защита от перенапряжений» следует категорически возразить против рекомендации § 16, предусматривающего устанавливать защитную арматуру на гирляндах изоляторов металлических опор без троса, начиная с линии напряжением 35 кВ, поскольку это требование не отвечает опыту эксплуатации. Применение защитной арматуры на гирляндах изоляторов до сих пор рег-

ламентировалось только § 48 «Руководящих указаний по защите от перенапряжений установок переменного тока 3...220 кВ». § 48 не требовал установки защитной арматуры на металлических опорах линий 35 кВ, так как защитная арматура, ранее установленная на таких линиях, в дальнейшем была демонтирована за ненадобностью.

Требование об установке защитной арматуры на металлических опорах линий 35...110 кВ без троса, должно быть, безусловно, исключено, оно может быть сохранено для линий 220 кВ и выше, на которых наличие защитных колец способствует лучшему распределению напряжения по гирлянде.

По разделу «Объем и нормы приемосдаточных испытаний» вызывает сомнение целесообразность измерений переходных сопротивлений контактов вновь смонтированных разъединителей, соединителей, натяжных зажимов, имеющих контактное соединение, и петлевых зажимов воздушных линий электропередачи напряжением выше 1000 В.

Как показывает опыт эксплуатации, любой вновь смонтированный контакт перед вводом в эксплуатацию находится во вполне удовлетворительном состоянии и ухудшение его — процесс, прогрессирующий во времени. Более целесообразно подобную проверку контактов проводить термоштангой после ввода их в эксплуатацию, под нагрузкой. В этом смысле и рекомендуется пересмотреть редакцию § 82, 83 и 109.

В заключение следует отметить, что проводимое по инициативе правления ВНИТОЭ обсуждение Правил новыми ячейками НИТОЭ способствует широкому ознакомлению с Правилами инженерно-технической общественности, а также максимально возможному использованию накопившегося на местах опыта эксплуатации высоковольтных установок при окончательном редактировании и переиздании Правил.

Инж. Е. С. ГРОЙС НИИ постоянного тока

Раздел «Защита от перенапряжений»

В § 1 необходимо указать на возможность отступлений от Правил для установок, расположенных в районах с малой грозовой деятельностью, и что Правила не предусматривают условий, которые могут возникнуть по отношению к установкам, обладающим особенностями, выдвигающими специфические требования к устройствам защиты от перенапряжений.

В обоих этих случаях выбор защиты от перенапряжений должен производиться на основе специальных проектных разработок, выполняемых в соответствии с принципиальными установками Правил и Руководящих указаний.

По § 2...8, в которых даются определения некоторых элементов грозозащиты, имеются неудачные формулировки: в § 2, 7 и 8, отсутствует определение термина «импульсное сопротивление заземления». Введение этого раздела в Правила вообще ничем не оправдано, а возможность и целесообразность его исключения представляются очевидными.

В § 9 механически совмещены полезное и прогрессивное определение назначения защиты и указания о классификации типов перенапряжений. Этот последний абзац является излишним.

§ 11. Для одноцепных линий 110 кВ Правила предусматривают подвеску тросов только в случае, если потребители не имеют другого источника питания. Между тем в большинстве случаев даже для хорошо зарезервированных линий весьма нежелательно иметь частые короткие замыкания, что неизбежно для линий с металлическими опорами без тросов. Частые перекрытия и короткие замыкания в сетях 110 кВ связаны с опасностью развития аварии, вносят дополнительные затруднения вследствие необходимости частых ревизий выключателей, представляют опасность для линейной изоляции и т. п.

Поэтому в согласии с решениями научно-технической сессии по перенапряжениям (1949 г.) следовало бы считать подвеску тросов нормальным средством защиты для всех линий 110 кВ на металлических опорах и допускать

отказ от нее только в отдельных случаях, если это технически и экономически обосновано.

§ 13. Для линий 35 кВ Правила исключают возможность применения тросовой защиты. Представляется целесообразным ввести оговорку, допускающую в отдельных случаях подвеску тросов на линиях 35 кВ с металлическими опорами, если это технически и экономически обосновано.

Это добавление открывает возможность создания повышенной надежности для некоторых, в частности двухцепных, линий, а также предотвращения частых коротких замыканий в тех случаях, если это требуется особенностями сети (например, линии, отходящие от шин грЭС, и др.).

Необходимо ввести в Правила указания о защите линий на железобетонных опорах.

§ 16. Вопрос о защитной арматуре поставлен в Правилах в неоправданно узком разрезе, а для рассматриваемого случая неправильно. Назначение, область применения и конструкция защитной арматуры подлежат подробному рассмотрению и обсуждению.

Из эксплуатационного опыта не видно оснований для облегчения требований к пересечениям против тех, которые действуют в настоящее время, тем более, что это не внесло бы каких-либо заметных экономических преимуществ.

Представляется целесообразным остаться на уровне расчетных условий, принятых в последней редакции Руководящих указаний, предусматривающих защиту пересечений линий 110 кВ и выше между собой и с линиями низших классов напряжений от прямых ударов молнии в пролетах пересечения.

§ 21 В Правилах указано, что защита закрытых распределительных устройств и зданий станций от прямых ударов молнии не требуется (§ 21).

Это положение расходится с практикой наших ведущих проектных организаций, которые предусматривают защиту на станциях основных зданий и возвышающихся объектов, в том числе: главного здания, здания щитового блока, трансформаторной башни и маслохозяйства, дымовых труб, градирен и некоторых других.

Мероприятия грозозащиты для этих сооружений весьма просты и, как правило, сводятся к заземлению металлических конструкций или металлических перекрытий.

Защита ответственных объектов от их разрушения молнией, принята во всех областях промышленности и, казалось бы, нет оснований ставить электростанции в исключительное положение. Приведенные в том же параграфе указания по защите открытых распределительных

устройств излишне детализированы и в таком виде не позволяют реализовать предложения Руководящих указаний, направленных к упрощению, где это возможно, условий защиты (установка молниесотводов на конструкциях 35 кВ и др.).

§ 22, 24...27 и табл. 1. Указания по защите подстанций от набегающих с линии волн перенапряжений должны быть написаны заново в соответствии с новыми работами в этой области, апробированными при пересоставлении Руководящих указаний. Составленная таким образом редакция этого раздела позволит в ряде случаев сделать защиту более рациональной и дешевой.

§ 23. Приведенные указания, касающиеся защиты подходов стержневыми молниеотводами, следует опустить поскольку такая система защиты на практике не применяется.

§ 28. Табл. 2 во внешних промежутках для трубчатых разрядников содержит случайные сведения и по своей чрезмерной детализации совершенно не соответствует духу стилю Правил.

Следует привести лишь данные о минимально допустимых значениях внешних промежутков или опустить эту таблицу совсем.

Раздел «Защита вращающихся машин, работающих на воздушной линии» написан неудачно и должен быть полностью пересоставлен.

§ 29. Учитывая перспективы сельской электрификации и потребности станций малой мощности, представляется необходимым пересмотреть запрещение присоединения воздушных линий к генераторам малой мощности, работающим изолированно от сети.

В § 30...34 даны отрывочные сведения об отдельных элементах защиты без достаточной их взаимной увязки и без учета влияния других элементов установки.

Рекомендуемые схемы защиты должны быть приведены в соответствие с материалами Руководящих указаний.

Требование схемы с кабельными вставками для всех генераторов независимо от их мощности представляется чрезмерным. Повидимому, можно распространить разрешение применять схемы с воздушными подходами не только на двигатели до 3000 кВт (§ 33), но и на генераторы.

§ 36. Отсутствие необходимости защиты генераторов не подключенных непосредственно к воздушным линиям достаточно надежно подтверждено союзным эксплуатационным опытом. Однако практикующееся в последнее время широкое применение длинных гибких связей побуждает поставить вопрос о защите в этом случае генераторов от перенапряжений, которые могут быть наведены при разрядах молнии вблизи этих связей.

Тарифные мероприятия в борьбе за повышение $\cos \varphi$

(Электричество, № 7 и 11, 1950, № 6 и 11, 1951)

Инж. Ю. Л. МУКОСЕЕВ

г. Горький

Вопрос о правильном тарифе на реактивную энергию для промышленных предприятий давно назрел и требует своего разрешения.

Существует неправильное мнение о том, что тариф на реактивную энергию и шкала премий и штрафов за средневзвешенный $\cos \varphi$ предприятий являются разными вещами. Между тем еще в 1939 г. А. С. Либерманом и Б. А. Поляковым [Л. 1] была выведена зависимость стоимости реактивной энергии, отпускаемой энергосистемами МЭС, от шкалы премий и штрафов за $\cos \varphi$.

Рассмотрим эту зависимость применительно к действующему в Ленэнерго двухставочному тарифу. Согласно действующему тарифу, в случае искусственного повышения $\cos \varphi$ предприятие получает скидку по определенной шкале, начиная с $\cos \varphi = 0,81$ и до $\cos \varphi = 1$. При $\cos \varphi = 1$ скидка максимальная и составляет 20% от стоимости всей энергии.

При двухставочном тарифе на электроэнергию один установленный киловольтампер трансформатора оплачи-

вается по B руб. в год, а 1 квтч, учтенный по счетчику, по B коп. Следовательно, годовая стоимость энергии в рублях при оплачиваемой мощности трансформаторов S_T квт/а и годовом расходе энергии W_a квтч составляет:

$$A = BS_T + \frac{BW_a}{100}.$$

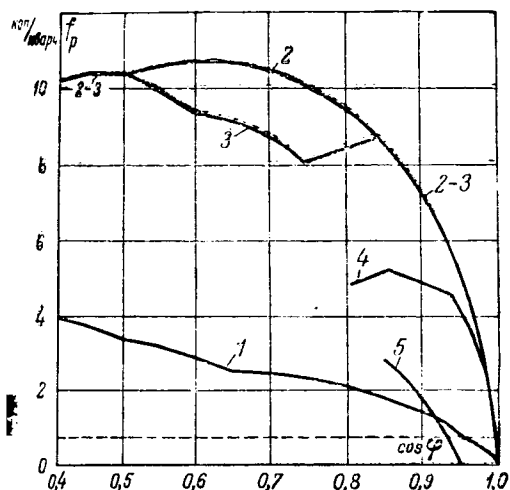
Стоимость 1 квтч в рублях

$$f_a = \frac{A}{W_a} = \frac{B \cdot S_T}{W_a} + \frac{B}{100}.$$

или в копейках

$$f_a = \frac{100 B}{T_T} + B,$$

где $T_T = \frac{W_a}{S_T}$ — тарифное число часов использования оплачиваемой мощности трансформаторов S_T .



Кривые зависимости стоимости кварчаса от $\cos \varphi$.

1 — при шкале штрафов и премий 1935 г.; 2 — при шкале штрафов и премий 1936 г.; 3 — при шкале штрафов и премий 1937 г.; 4 — при шкале штрафов и премий 1943 г.; 5 — при шкале, предусмотренной проектом Госснаба 1951 г.

При $\cos \varphi = 1$, когда имеет место премия, равная 20%, стоимость энергии составит:

$$A_{\cos \varphi = 1} = A' = 0,8 A.$$

Так как реактивная энергия при этом равна нулю, то эту стоимость можно с полным основанием считать за стоимость чисто активной энергии W_a . Когда предприятие имеет $\cos \varphi < 1$, то оно потребляет из системы некоторую реактивную энергию W_p , стоимость которой можно определить как разницу в оплате энергии по тарифу при данном $\cos \varphi$ и при $\cos \varphi = 1$. Если премия (или штраф) для данного значения искусственно повышенного $\cos \varphi$ равна $\beta\%$, то полная стоимость реактивной энергии, получаемая предприятием от энергосистемы, составит:

$$\frac{A(100 - \beta)}{100} - A' = \frac{A(100 - \beta)}{100} - 0,8A = \frac{20 - \beta}{100} A$$

и стоимость кварчаса, получаемого предприятием от энергосистемы,

$$f_p = \frac{A(20 - \beta)}{100W_p} = \frac{A(20 - \beta)}{100W_a \operatorname{tg} \varphi} = \frac{(BS_T + \frac{BW_a}{100})(20 - \beta)}{100W_a \operatorname{tg} \varphi} = \frac{20 - \beta}{100 \operatorname{tg} \varphi} \left(\frac{B}{T_T} + \frac{B}{100} \right).$$

Таким образом, стоимость кварчаса, получаемого предприятием от энергосистемы при данных B , V и T_T , является функцией только $\cos \varphi$.

На рисунке представлены кривые стоимости кварчаса в системе Ленэнерго при $B = 184$ руб., $V = 13,5$ коп и $T_T = 4000$ в функции от $\cos \varphi$ для шкал 1935, 1936, 1937, 1943 г.г. и шкалы, предусмотренной проектом Госснаба 1951 г. При других значениях T_T кривые пройдут несколько выше или ниже, но характер их остается неизменным. Кривая 1943 г. обрывается при $\cos \varphi = 0,81$, так как при меньших значениях $\cos \varphi$ премий за искусственно повышенный $\cos \varphi$ не предусматривается, а премии и штрафы за естественный $\cos \varphi$ не зависят от компенсации.

Так как все шкалы, кроме шкалы 1935 г., дают при $\cos \varphi = 0,99$ стоимость кварчаса энергосистемы более 1 коп., а все компенсаторы при соответствующем их использовании имеют стоимость кварчаса ниже 1 коп, то для предприятий получается выгодным всегда искусственно повышать $\cos \varphi$ до 1, что, конечно,

но, неприемлемо с государственной точки зрения.

Дело в том, что действующая шкала премий за искусственно повышенный $\cos \varphi$ не отражает реальной стоимости реактивной энергии в энергосистемах и приводит к ненормальному положению, при котором предприятие «выгодно» повышать $\cos \varphi$ до 1 любыми средствами и получать премию, а энергосистеме «выгодно» ограничить мощность компенсаторов и не платить премии, а получать штрафы.

Совершенно другая картина получается при шкале 1935 г. (рисунок). В этом случае предприятию, имеющему компенсатор, стоимость реактивной энергии которого равна 0,75 коп/кварч, будет выгодно повышать искусственно $\cos \varphi$ только до 0,95, так как при дальнейшем повышении $\cos \varphi$ кварчас, получаемый от энергосистемы, будет дешевле и компенсация получается невыгодной для предприятия. Едва ли и система нуждается в $\cos \varphi$, большем 0,95.

При наличии правильной кривой стоимости кварчаса энергосистемы желательную степень компенсации легко было бы найти как точку пересечения ее с горизонтальной линией стоимости кварчаса компенсатора (рисунок). При этом нет необходимости делать варианты расчеты и сложные калькуляции. В этом заключается изыскательство метода стоимости реактивной энергии, предложенного А. С. Либерманом и Б. А. Поляковым [Л. 1].

Любопытно отметить, что в тарифе 1943 г. предусмотрена шкала штрафов и премий за естественный $\cos \varphi$, действующая независимо от шкалы за искусственно повышенный $\cos \varphi$. Так как эти штрафы и премии не зависят от искусственной компенсации и не влияют на стоимость кварчаса, получаемого от энергосистемы, то их следует отнести на стоимость активного киловаттчаса, стоимость которого завышается, что неверно с общегосударственной точки зрения.

Независимая шкала штрафов за естественный $\cos \varphi$, который падает более круто, чем шкала премий за искусственно повышенный $\cos \varphi$, приводит к другому ненормальному положению, когда потребитель, установивший компенсатор и улучшивший режим своего предприятия по напряжению, снижает свой естественный $\cos \varphi$ и платит штраф, превышающий премию за искусственно повышенный $\cos \varphi$.

Все отмеченные обстоятельства подтверждают решение Всесоюзной научно-технической сессии по электрооборудованию промышленных предприятий от 7—12 декабря 1948 г., в котором сказано: «Отмечая, что существующая система оплаты реактивной энергии промышленными предприятиями не всегда стимулирует рациональное повышение коэффициента мощности, считать необходимым всестороннее изучение вопроса о рациональности существующей системы оплаты реактивной энергии и в случае необходимости изменения ее» [Л. 2].

Применение двух шкал для естественного и искусственного $\cos \varphi$, имевшее значение в военные годы, когда компенсаторы промышленностью не выпускались, в настоящее время не стимулирует рациональное повышение $\cos \varphi$.

Вопрос о естественном $\cos \varphi$ следует рассмотреть более подробно. Известно, что все прогрессивные мероприятия по электрификации промышленных предприятий (внедрение многодвигательного привода станков, применение переменного тока для электродвигателей подъемно-транспортных устройств с повторно-кратковременным режимом, внедрение электросварки на переменном токе), давая большой производственный эффект и снижение удельного расхода активной электроэнергии, как правило, вели к ухудшению $\cos \varphi$ и тем самым к повышению стоимости энергии. Известно также, что при недогрузке асинхронных двигателей $\cos \varphi$ значительно ухудшается. Но к сожалению, очень мало известно, что оптимальный экономичный режим нагрузки асинхронных двигателей с точки зрения потерь лежит значительно ниже 100%. Это обстоятельство отмечалось автором еще в 1936 г., позднее инж. Б. А. Разумовым, и подробно изложено в статье О. П. Шишкина [Л. 3].

В свете этих обстоятельств безоговорочная политика нажима на повышение «естественного» $\cos \varphi$, даже за счет

¹ См. Вестник электропромышленности, № 7, 1936.

увеличения активных потерь, проводимая МЭС, представляется не оправдывающей себя с точки зрения интересов народного хозяйства.

Автор считает, что вопрос об установлении нейтрального естественного $\cos \varphi$ для предприятий должен решаться путем разбивки их на характерные группы, как это делается при определении расчетных нагрузок различных потребителей, в зависимости от органического состава нагрузки предприятия (станки, электросварка, электропечи и т. д.), от его технологии. Огульное применение нейтрального значения $\cos \varphi = 0,75 \dots 0,85$ без такой разбивки неправильно ориентирует энергетиков различных отраслей промышленности, которые могут оказаться заинтересованными в целях повышения $\cos \varphi$, например, в таких мероприятиях, как перевод мельниц с индивидуальных приводов на общий трансмиссионный привод с одним двигателем 6 кв. Это звучит парадоксально, но хуже всего то, что такая «рационализация» сулила предприятию «экономии» вследствие неправильной действующей шкалы премий по $\cos \varphi$.

Шкала премий и штрафов за $\cos \varphi$ должна быть единой как для естественного, так и для искусственного $\cos \varphi$, она должна давать плавный характер возрастания кривой стоимости кварчаса энергосистем с уменьшением $\cos \varphi$, а сами значения стоимости кварчаса должны приближаться к реальным значениям таковых для энергосис-

тем с учетом стоимости генерации и передачи реактивной энергии потребителю.

Госснабом разработан проект новой шкалы по премиям и штрафам за $\cos \varphi$, однако в нем повторяются те же ошибки: независимые друг от друга шкалы штрафов и премий за естественный и искусственный $\cos \varphi$; завышенная стоимость реактивной энергии систем (рисунк).

В заключение следует отметить, что задача установления правильного тарифа на реактивную энергию является важной государственной задачей и может быть решена только путем привлечения широкой инженерно-технической общественности. По линии ВНИТОЭ должно быть проведено всесоюзное совещание с участием заинтересованных организаций.

Литература

1. А. С. Либерман и Б. А. Поляков. *Снабжение предприятий реактивной энергией*, ч. II. Ростов н/Дону, 1939.

2. Материалы Всесоюзной научно-технической сессии по электроснабжению промышленных предприятий. Стройиздат, 1950.

3. О. П. Шишкин. К вопросу компенсации реактивной мощности. *Энергетический бюллетень Министерства нефтяной промышленности*, № 3, 1951.



Заметки и письма

К ВОПРОСУ О НЕСИММЕТРИЧНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

(*Электричество*, № 8, 1950 и № 4, 1951)

В письме в редакцию (*Электричество*, № 4, 1951, стр. 76) главный инженер завода «Электросила» им. С. М. Кирова Ф. К. Архангельский обратил внимание читателей на основной недостаток статьи Г. Н. Тер-Газаряна «Результаты экспериментального исследования несимметричных режимов гидрогенератора», вызвавший необоснованные выводы автора этой статьи (*Электричество*, № 8, 1950).

Ограничение несимметрии нагрузки пятью процентами, введенное заводом «Электросила» для гидрогенераторов со сварными станинами, рассматривается в статье Г. Н. Тер-Газаряна, как вызванное в основном нагревами от тока обратной последовательности. Ф. К. Архангельский счел необходимым подчеркнуть, что для современных сварных гидрогенераторов это ограничение (5%) продиктовано не опасением нагревов, а соображениями о недостаточной усталостной прочности элементов крепления сердечника статора. В связи с возрастанием вибрации 100 гц при появлении несимметрии в нагрузке знакопеременные напряжения увеличиваются как раз в тех узлах, в которых уже имеются значительные напряжения постоянного знака. Поэтому, производя опытное определение вибраций, нужно точно измерять нарастание вибраций 100 гц при повышении несимметрии и, что самое главное, учитывать расположение вибрографов. Казалось бы, эти указания Ф. К. Архангельского следует Г. Н. Тер-Газаряну принять, по-

скольку этот вопрос совсем не рассмотрен в статье, и как сказано в письме Ф. К. Архангельского, «в ряде случаев выводы могут привести к недоразумениям в эксплуатации гидростанций». Соображения, которые Г. Н. Тер-Газарян выдвинул в своем ответном письме в пользу допустимости повышенных несимметрий (*Электричество*, № 4, 1951), умозрительны, а потому ничего нового не дают читателям и, тем более, не дают автору права делать вид, что он остается на позициях обсуждаемой статьи.

Попутно Ф. К. Архангельский обратил внимание на второй недостаток в статье, а именно—неправильное определение суммарных потерь в обмотке возбуждения гидрогенератора, указав, что следовало бы учитывать вытеснение переменной составляющей тока. Возражая, Г. Н. Тер-Газарян утверждает, что вытеснение токов в проводнике обмотки возбуждения столь ничтожно, что о нем можно не говорить. Это также ошибочно, так как коэффициент вытеснения для обмоток возбуждения гидрогенераторов, вследствие концентрированного расположения витков этих обмоток в междуполюсных окнах, весьма значительны (обычно он доходит до величины порядка десяти и выше, а не 1,04, как утверждает Г. Н. Тер-Газарян).

Таким образом, оба замечания Ф. К. Архангельского сохраняют полную силу.

Доктор техн. наук, проф. А. Е. АЛЕКСЕЕВ

ОТВЕТ АВТОРА СТАТЬИ

По располагаемым опытным данным (мы надеемся их опубликовать) для одной весьма крупногабаритной машины со сравнительно пониженной жесткостью по вибрациям 100 гц, о которых пишет А. Е. Алексеев, степень несимметрии может быть увеличена три раза сравнительно с рекомендуемой заводом. Механические напряжения в деталях конструкции крепления активной стали, в том числе и в сварных швах, должны быть существенно меньше предельных. Небольшое увеличение этого напряжения за счет возрастания знакопеременных усилий при несимметричной нагрузке, соответствующей

указанной $\frac{I_2}{I_1} = 15...20\%$, не приводит к превышению допустимого предела усталости и вообще меняет сильно картину механической нагрузки деталей машины сравнительно симметричным режимом.

На некоторых генераторах то же может быть и при большей несимметрии.

Опасение Ф. К. Архангельского и А. Е. Алексеева в части вибрации 100 гц могут относиться лишь к машинам некачественной сборки или неудачной конструкции.

В моем ответе на замечания Ф. К. Архангельского (Электричество, № 4, 1951) приведена неверная цифра коэффициента вытеснения переменного тока для обмотки возбуждения. Этот коэффициент, как пишет А. Е. Алексеев, больше указанного мною значения. Однако приведенные в статье (Электричество, № 8, 1950) основные данные по нагреву обмоток возбуждения совершенно не меняются. Они получены из опыта, без использования указанного коэффициента. Таким образом, допущенная мною ошибка совершенно не влияет на сущность рассматриваемого вопроса.

А. Е. Алексеев считает, что я «делаю вид» будто остаюсь на позициях обсуждаемой статьи (Электричество, № 8, 1950). Располагая материалом опытного исследования несимметричного режима более 20 гидрогенераторов, подтверждающим возможность для многих машин существенного увеличения несимметрии, допускаемой заводом, было бы довольно странно не оставаться на своих позициях, которым противопоставлены соображения, не подтвержденные, насколько мне известно, достаточным опытом.

Кандидат техн. наук Г. Н. ТЕР-ГАЗАРЯН

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ЗАМЕНЫ НЕДОГРУЖЕННЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В нашей статье «Работа асинхронного двигателя при пересоединении обмоток статора с треугольника на звезду» (Электричество, № 9, 1951 г.) рассмотрена целесообразность замены уже установленных недогруженных двигателей, исходя только из сравнения активных потерь и потребляемой реактивной мощности. Очевидно, что одного такого сравнения недостаточно для принятия решения о целесообразности замены недогруженных двигателей на двигатели меньшей мощности.

Вопрос этот должен решаться на основе технико-экономических расчетов.

Заменяя двигатель большей мощности на двигатель меньшей мощности, мы получаем экономию в капитальных затратах за счет разности в ценах двигателей с учетом расходов по доставке. Но с другой стороны, необходимо учесть единовременные расходы на демонтаж и монтаж при замене двигателей, расходы по реализации сня-

того двигателя и уменьшение эксплуатационных расходов на оплату потерь. Кроме того, следует учесть, что срок службы обмоток двигателя большей мощности при его работе с неполной загрузкой будет больше по сравнению со сроком службы обмоток двигателя меньшей мощности, работающего с полной нагрузкой. В результате расходы по замене обмоток будут значительно меньше у двигателя, работающего с неполной загрузкой. Сказанное относится к случаю замены уже установленного двигателя.

При выборе же мощности для новых установок соотношение расходов будет, конечно, другим.

Следует обратить внимание на необходимость проведения исследований для выяснения целесообразного соотношения между переменными и постоянными потерями в двигателе. Это имеет весьма важное значение при решении вопроса о замене незагруженных двигателей.

Кандидат техн. наук И. А. СЫРОМЯТНИКОВ

К СТАТЬЕ Г. И. БАБАТА „ТРАНСФОРМАТОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ“

(Электричество, № 7, 1950)

В статье содержится определение понятия «трансформатор электромагнитной энергии», из которого следует изменение соотношения между током и напряжением как частный случай изменения концентрации электромагнитной энергии. Такое утверждение представляется нам не вполне правильным. Как известно, в теории трансформаторов может рассматриваться электрический трансформатор с предельно малыми потерями. Для такого электрического трансформатора величина вектора Умова-Пойнтинга, определенная для его первичной и вторичной стоек будет практически одинаковой. Поскольку $S = [\vec{E}\vec{H}]$ и поскольку для случая преобразования токов и напряжений в трансформаторе изменения сомножителей векторного произведения обратно пропорциональны (при отсутствии учета потерь в трансформаторе), то величина вектора Умова-Пойнтинга остается неизменной. Но плотность потока электромагнитной энергии, проходящего через элект-

рический трансформатор и распространяющегося определенным образом далее, выражается как раз величиной модуля вектора Умова-Пойнтинга.

Отсюда следует вывод, что изменение соотношения между током и напряжением является изменением концентрации не в большей степени, чем, например, отсутствие излучения является частным случаем излучения. Пригодность этой характеристики для определения оканчивается, таким образом, достаточно сомнительной.

Нам представляется, что для столь общего определения, как определение трансформатора электромагнитной энергии, формулировка могла бы иметь примерно следующий вид: «Трансформаторами электромагнитной энергии называются устройства, преобразующие структуру или направление потока электромагнитной энергии». В одном частном случае при преобразовании может про-

исходить лишь изменение концентрации преобразуемой электромагнитной энергии. В другом случае может происходить преобразование вовсе без изменения концентрации электромагнитной энергии в потоке. Предлагаемая формулировка в качестве пояснительного определения может включать следующее: «Трансформаторы электромагнитной энергии могут быть либо преобразователями концентрации энергии, либо преобразователями токов и напряжений, называемыми электрическими трансформаторами».

Г. И. Бабат для характеристики преобразователей электромагнитной энергии пользуется понятием о частотно-энергетическом критерии, приложение которого, однако, к практически применяемым преобразовательным устройствам убеждает нас прежде всего в том, что критерий этот не является универсальным и, строго говоря, применим только к устройствам, имеющим одинаковые величины напряженностей электрического и магнитного полей.

Для построения шкалы частотно-энергетических критериев значение напряженности электрического поля принято Г. И. Бабатом равным $E = 1000$ в/см, а значение напряженности магнитного поля взято $H = 8$ а/см. Эти величины, однако, не являются типичными и универсальными, в результате чего таблица, помещенная в рассматриваемой статье, находится в довольно резком противоречии с практикой электромашиностроения и некоторых других областей техники. Для нижних строчек таблицы использование частотно-энергетического критерия дает чрезвычайно заниженные, против практически применяемых, величины преобразующих мощностей. Для верхних строк той же таблицы получаются невероятно завышенные мощности. Приведем пример. Для трансформаторов на частоту 50 гц в таблице отводится область частотно-энергетических критериев от единицы до тысячи

$$Pf^2 = 1 \dots 10^3.$$

Принимая наибольшее допустимое значение частотно-энергетического критерия $Pf^2 = 10^3$, определим предусмотримую таблицей мощность 50-периодного трансформатора в ваттах. Эта мощность оказывается равной:

$$P = \frac{Pf^2}{f^2} = \frac{10^3}{50^2} = 0,4 \text{ вт!}$$

Даже если считать, как указано, в том же разделе таблицы, что реактивная мощность составляет 0,1 от активной, то соответствующая активная мощность 50-периодного трансформатора, вычисленная по частотно-энергетическому критерию, составит всего 4 вт! Такая мощность, разумеется, недостаточна даже для устройств слабого тока, не говоря уже о полной несовместимости такой мощности с понятием 50-периодного электрического трансформатора вообще.

Для оптических систем прожекторов средней величины значения частотно-энергетического критерия даны $Pf^2 = 10^{39} \div 10^{42}$. Если принять для определенности длину волны в среднем $0,6 \cdot 10^6$ м, то частота оказывается равной:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,6 \cdot 10^{-6}} = 0,5 \cdot 10^{15} \text{ гц.}$$

Тогда мощность устройства должна быть:

$$P = \frac{10^{42}}{(0,5 \cdot 10^{15})^2} = \frac{10^{42}}{0,25 \cdot 10^{30}} = 4 \cdot 10^{12} \text{ вт.}$$

Между тем фактическая мощность таких прожекторов не превышает во всяком случае десятка киловатт, т. е. 10^4 вт. Полученная из частотно-энергетического критерия величина мощности оказывается больше в $4 \cdot 10^8$ раз.

Приведенные примеры (число их может быть легко увеличено) показывают, насколько далеки приняты Г. И. Бабатом для построения шкалы величины мощностей отдельных устройств от практики.

Необходимо, таким образом, некоторые пояснения, которые придали бы высказанным автором предложениям соответствующую строгость и точность.

Инж. Г. П. АБРАМОВИЧ

Хабаровский институт железнодорожного транспорта

ОТВЕТ АВТОРА СТАТЬИ

1. Необходимо признать, что четкого определения понятия «трансформатор электромагнитной энергии» нет; этим недостатком страдает и мое определение, данное в статье, опубликованной в № 7, 1950 г. В определении, предлагаемом Г. П. Абрамовичем, требуется уточнить: каков именно содержание вкладывается в слово «структура». Быть может, лучше сказать: «Трансформатор электромагнитной энергии — это устройство, преобразующее поток электромагнитной энергии без изменения его частоты». Как частные случаи такого определения, надо рассматривать трансформаторы: изменяющие концентрацию, изменяющие направление электромагнитного потока, соотношение между током и напряжением и т. д.

Мне кажется, Г. П. Абрамович неудачно называет преобразователи токов и напряжений электрическими трансформаторами. Термин «электрический» в данном случае ничего не поясняет. Я считаю что термины должны более подробно описывать конструктивные разновидности трансформатора. Для трансформаторов, выполненных в виде спиралей, охваченных общим магнитным потоком, уместен термин «катушечные трансформаторы» (со стальным сердечником и без сердечника), для электромагнитных колебаний более высоких частот применяются «трансформаторы — четвертьволновые линии», «трансформаторы — волноводы», «трансформаторы — зеркала» и т. д. В настоящее время насущно необходимо иметь общую для всех областей частот единую терминологию, единый взгляд на вещи. Этими соображениями и была вызвана моя статья.

2. Для всех трансформаторов электромагнитной энергии отношение их размеров l к длине электромагнитной волны λ возрастает с увеличением колебательной мощности P и частоты тока f . Но чем больше допустима в трансформаторе напряженность электрического поля E и магнитного поля H , тем меньше могут быть отношения l/λ при заданных P и f . Из этих соображений следует, что величина l/λ любого трансформатора определяется величиной $\frac{Pf^2}{E^2}$ или $\frac{Pf^2}{H^2}$. Это совершенно общее и бесспорное положение.

3. Высчитывая мощности оптических систем, Г. П. Абрамович допустил ошибку. В выражении Pf^2 величина P — это не активная мощность, а колебательная, реактивная мощность, т. е. не «мощность потребляемая», а «мощность в пути». Г. П. Абрамович совершенно правильно напомнил, что в трансформаторах на низкую частоту реактивная мощность составляет 0,1 от активной. Но дальше он, видимо, забыл указать, что для более высокочастотных систем отношение реактивной мощности к активной становится большим единицы. Для оптических систем реактивная мощность во много тысяч и даже миллионов раз больше активной. В луче прожектора реактивная мощность — «мощность в пути» — во столько раз больше активной, во сколько длина луча больше длины электромагнитной волны. Так как длина волны света равна нескольким десяткам микрон, то, приняв длину луча, например, несколько сотен метров, получим, что реактивная мощность превышает

активную в 10^9 раз. Точно так же получится и для устройств типа телескопа, микроскопа и т. д. Если вычисления Г. П. Абрамовичем величины Pf^2 помножить на соотношение „активной“ и „реактивной“ мощностей, то получим уже не такие далекие от практики цифры. Кроме того, надо взять для каждого прибора соответствующие ему значения напряженности электромагнитных полей E и H . Тогда получится полное совпадение расчетных и практических данных.

4. Взятые мною напряженности: электрического поля $E=1000$ в/см и магнитного поля $H=8$ а/см, конечно, не являются универсальными. Они типичны для некоторых конструкций. Но дать значения E и H , которые были бы типичны для всех решительно конструкций трансформаторов электромагнитной энергии, никак невозможно. Применяются практически напряженности поля и во много раз больше, и во много раз меньше, чем $E=1000$ в/см и $H=8$ а/см. Каждый, кого интересует конкретные соотношения между: I , λ , P и f , должен подставлять в приведенные мною общие уравнения свои конкретные значения E и H . Цифры Pf^2 , приведенные на графике моей статьи, только иллюстрируют общую закономерность.

5. В прошлые десятилетия в электротехнике практически применялись конструкции, размеры которых были значительно меньше длины электромагнитной волны. В последние же годы благодаря интенсивному развитию техники сантиметровых волн появилось множество важных практических конструкций, размеры которых немногим меньше длины электромагнитной волны или даже превышают ее. В настоящее время электрикам и радиотехникам приходится работать с приборами и аппаратами самых разнообразных частот; в одних используются малые мощности и токи столь низких частот, что о волновой их природе и не вспоминают. Это приборы и аппараты, как я выражаюсь, „точной электротехники“. По сравнению с длиной электромагнитной волны прибор или аппарат является „геометрической точкой“. В других же приборах и аппаратах применяется столь большая колебательная мощность и столь высокая частота тока, что габариты этих приборов и аппаратов сравнимы с длиной электромагнитной волны. Рассчитывать их надо, пользуясь методами и приемами волновой оптики, а не теории переменных токов.

На современном самолете, например, работают и трансформаторы на частоту 50 гц, состоящие из многих тысяч витков проволоки на стальных сердечниках, а также и трансформаторы на частоты, в миллиарды раз более высокие (трансформаторы сантиметровых волн), выполненные в виде труб, полных резонаторов, зеркал.

В настоящее время электрику и радиотехнику необходимо часто представлять себе зависимости между P , f , λ и I

самых различных трансформаторов, самых различных частот и мощностей.

Те, кто работают в области низких частот, привыкли, например, что переменный ток можно пропустить в требуемую цепь через сосредоточенную емкость — конденсатор, а запереть при помощи индуктивности — дросселя. Но когда мы переходим к мощностям в сотни киловатт на волнах короче метра, то оказывается, что ни „запирающий дроссель“, ни „пропускающий конденсатор“ невозможно осуществить. Величина Pf^2 оказывается настолько большой, что габариты прибора составляют значительную долю длины волны (до 0,25 λ); в дросселе нельзя пренебрегать емкостью, в конденсаторе нельзя пренебрегать индуктивностью. И „дроссель“, и „конденсатор“ являются при данных Pf^2 не апериодическими, а колебательными системами. С увеличением Pf^2 неизбежен переход от апериодических конструкций к резонансным, т. е. от дросселей и конденсаторов к колебательным контурам.

При больших значениях Pf^2 невозможно осуществить „фильтры низких частот“, которые бы эффективно работали в широких пределах изменения частоты. Конструкции, работающие при больших значениях Pf^2 , как правило, имеют более узкий рабочий диапазон частот, чем конструкции с малым Pf^2 .

То обстоятельство, что с увеличением отношения I/λ конструкции увеличивается запас ее колебательной мощности, накладывает свой отпечаток на технику модуляции (в частности, включения — выключения) колебаний. При низких частотах можно прервать поток энергии за время, меньшее полпериода. С повышением частоты колебаний процессы включения и выключения растягиваются на сотни, тысячи и более периодов.

Можно еще много привести примеров влияния величин Pf^2 и I/λ на свойства, характеристики, особенности трансформаторов.

Приведенная в моей статье таблица — это только иллюстрация зависимостей между P , f , I и λ . Эта таблица не является непосредственным пособием к расчету и конструированию.

Внизу таблицы расположены устройства переменного тока. Верхняя же часть таблицы заполнена устройствами, предназначенными для световых волн. Есть закономерности, общие для электромагнитных колебаний всех частот, но вместе с тем существует глубокая принципиальная разница между непрерывными и затухающими колебаниями, получаемыми радиотехническими методами (когерентными колебаниями), и колебаниями, излучаемыми раскаленными телами (некогерентными колебаниями).

Доктор техн. наук Г. И. БАБАТ

О ПАРАМЕТРАХ ПЕРВОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ М. О. ДОЛИВО-ДОРОВОЛЬСКОГО

Как известно, выдающийся русский электротехник второй половины XIX в. Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862—1919 гг.) первый в мире осуществил передачу электрической энергии на большое расстояние высоким к. п. д. Приоритет Доливо-Добровольского, как создателя техники трехфазного переменного синусоидального тока, получил всеобщее признание.

Естественно поэтому, что во всех научных трудах и руководствах по электротехническим дисциплинам отмечается заслуги М. О. Доливо-Добровольского, при этом указывается осуществленная им в 1891 г. первая в мире крупная электропередача трехфазного тока Лауфен — Франкфурт на Майне. Однако, прозагравив ряд учебных руководств для институтов и техникумов, а также специальных трудов по вопросам передачи энергии на большие расстояния, можно обнаружить разноречивость данных в технических параметрах осуществленной Доливо-Добровольским в 1891 г. первой электропередачи. Продемонстрируем это некоторыми примерами.

Б. Г. Кузнецов в «Очерках истории электротехники» (1936 г.) на стр. 70—71 сообщает: «Лауфен — Франкфуртская передача состояла из трех медных проводов,

подвешенных на высоте 8 м. По этим проводам передавался ток в 8500 в».

Н. И. Сушкин на стр. 10 своего учебника «Электрическое оборудование центральных станций» (1938 г.) пишет: «Уже в 1891 г. на выставке во Франкфурте на Майне (Германия) была устроена показательная передача энергии из Лауфена во Франкфурт на Майне, куда передавалось 300 л. с. на расстояние 175 км при напряжении 20 000 в».

В. П. Степанов и Б. В. Кулешов в книге «Сооружение и эксплуатация кабельных сетей» (1940 г.), стр. 13 пишут: «...Доливо-Добровольский в 1891 г. для выставки во Франкфурте устроил передачу энергии в 200 л. с. на расстояние 175 км трехфазным током, который в трансформаторе повышался до 8500 в. Коэффициент полезного действия этой передачи был 75%».

В изданной в 1946 г. «Летописи электричества» на стр. 225 приведены такие параметры: длина линии 175 км, число проводов 3, диаметр проводов 4 мм, род тока переменный трехфазный, величина напряжения 8500 в, передаваемая мощность 300 л. с., к. п. д. передачи 75%.

Л. Н. Баптиданов и В. И. Тарасов в первом томе учебного пособия «Электрооборудование электрических станций и подстанций» (1947 г.) на стр. 12 указывают: «Первая высоковольтная трехфазная линия электропередачи длиной 175 км при напряжении 7 500 — 8 500 в была сооружена в 1891 г. для передачи электроэнергии от гидростанции мощностью 300 л. с. в Лауфене во Франкфурт на Майне».

А. А. Глазунов в курсе «Сети электрических систем» (1947 г.) на стр. 13 отмечает, что «Переломным моментом, определившим преимущества передачи переменным током, нужно считать осуществление русским ученым Доливо-Добровольским передачи Лауфен—Франкфурт на Майне длиной 175 км при напряжении 30 кв».

Я. М. Червоненкис в своей работе «Передача энергии постоянным током» (1948 г.) на стр. 7 пишет: «В 1891 г. Доливо-Добровольский приступил к осуществлению передачи мощностью в 300 л. с. от небольшой гидроустановки в городе Лауфен по трехфазной линии длиной 175 км до территории международной выставки во Франкфурте. Для передачи предполагалось использовать рекордное для того времени напряжение в 15 000 в трехфазного тока».

В. В. Данилевский в известной книге «Русская техника» (1949 г.) стр. 381 сообщает: «В городе Лауфен на реке Неккар, на расстоянии 175 км от Франкфурта, установили водяную турбину мощностью 300 л. с. Она приводила в движение генератор трехфазного тока, развивавший около 200 квт, ток которого поступил на трансформаторы, где его напряжение повышалось до 12 500 и 25 000 в. Затем по медным проводам в 4 мм диаметром ток проходил 175 км до Франкфурта».

А. Я. Рябков на стр. 16 своего учебника «Электрический расчет электрических сетей» (1950 г.) пишет по поводу этого события: «Энергия передавалась от гидростанции мощностью 300 л. с. в Лауфене на расстояние 175 км во Франкфурт на Майне при напряжении 30 000 в с к. п. д. 77%».

Наконец, в работе акад. А. В. Винтера «Итоги и перспективы развития советской энергетики» (1950 г.) на стр. 7—8 мы читаем: «В 1891 г. Доливо-Добровольский с помощью трехфазного тока осуществил передачу электрической энергии при напряжении в 22 тыс. в из Лауфена во Франкфурт на Майне на расстоянии 175 км».

Вот и возникает законный вопрос, при каком напряжении, какую мощность и на какое расстояние передавал в действительности М. О. Доливо-Добровольский в 1891 г. в своей электропередаче трехфазного тока?

Инж. В. Е. БОЧКОВ
г. Иваново

ОТ РЕДАКЦИИ

Инициатива В. Е. Бочкова, обратившего внимание на разноречивость и частичную ошибочность сведений, приведенных различными авторами об электропередаче 1891 М. О. Доливо-Добровольского, заслуживает одобрения. Ниже помещается справка, полученная по затронутому вопросу от Комиссии по истории техники ОТН АН СССР

СПРАВКА

В Лауфене был установлен трехфазный генератор на вода Эрликон мощностью 210 квт, 150 об/мин, 40 и 86—95 в (фазное напряжение 50—55 в), приводивший в действие специальной водяной турбиной. Там же был установлен трехфазный масляный трансформатор мощностью 150 квт с коэффициентом трансформации 160.

Электропередача имела линейное напряжение 13 760—15 200 в (фазное напряжение 8 000—8 600 в). На двух понизительных подстанциях во Франкфурте были установлены трехфазные трансформаторы с коэффициентом трансформации 123. После окончания выставки проф. Киттль и проф. Линдлей производили испытание работы этой установки при повышении напряжения в линии до 25 000 в, соединив для этой цели последовательно высоковольтные обмотки двух трансформаторов.

Вольтметры в цепи генератора были включены между фазой и нулем и, таким образом, указывали фазное напряжение генератора. На высоковольтной стороне трансформаторов измерительных приборов не было установлено. Величина напряжения в линии определялась путем умножения показаний вольтметров на коэффициент трансформации, равный 160.

Ввиду того, что в первое время считали основным напряжением фазное напряжение, некоторые авторы и называли его как напряжение, действующее в отдельных фазах линии передачи. В настоящее время принято употреблять в качестве рабочего напряжения линейное напряжение, равное фазному, умноженному на $\sqrt{3}$.

Указанные в письме В. Е. Бочкова разногласия в параметрах Лауфенской установки, приводимых различными авторами, объясняются указанным выше обстоятельством. Длина линии передачи Лауфен—Франкфурт составляла 175 км, на что имеются указания в описании этой передачи, опубликованных в 1891 и 1892 гг. в журнале «Электричество».

ФАКТЫ ДОЛЖНЫ ОПИСЫВАТЬСЯ ТОЧНО

Авторы нескольких популярных книг и статей [Л. 1—3], посвященных жизни и творчеству изобретателя радио А. С. Попова, сообщают о «непонятных» сигналах — «звонках невтопад» устроенного А. С. Поповым в юношеские годы электрического будильника.

Г. И. Головин, немало потрудившийся над собиранием материалов к биографии А. С. Попова, пишет [Л. 1]:

«...Устройство получилось несложным. Под часами Саша укрепил небольшую линейку с отверстиями. В отверстия вставлялся металлический штырек... Цепочка ходиков соединялась с одним концом гальванической батареи. Другой конец батареи присоединялся к звонку. Все отверстия линейки не только соединялись проволочкой между собой, но и с одним из свободных концов электрического звонка. Когда гирька часов опускалась до штырька и соединялась с ним, происходило замыкание, и звонок резким сигналом будил своего хозяина».

Исправно действует «электрический будильник». Но бывают такие дни, когда он начинает вдруг звонить не-

впопад. Саша заметил, что странное явление происходит лишь во время грозы...».

Описание явно неточное. Из элементарных электрических технических соображений следует, что если ток к звонку был подведен через цепочку часов и подвижную на ней гирю, то звонок такого устройства мог звонить только при соприкосновении гири с неподвижным контактом (штырьком), установленным на заданное время срабатывания будильника. Если допустить вместе с автором возможность воздействия близких грозовых разрядов на контакты, то во время грозы проводимость системы должна была улучшаться, обеспечивая безотказное срабатывание будильника в заданное время.

В качестве же грозоотметчика («звонки невтопад») такая система могла бы работать только при замкнутом часовом контакте, т. е. при неподвижной гире и, следовательно, остановленных часах. Таким образом, совмещение функции действующего будильника и грозоотметчика могло иметь место только в воображении авторов упомянутых книг [Л. 1—3]. Факты из жизни великого ученого должны описываться вдумчиво и точно.

По свидетельству сверстника А. С. Попова, профессора Капустина [Л. 4] юный изобретатель, экспериментировавший с «электрическим будильником», заметил, что металлическая цепочка, соединяющая гирию часов с батареей, всегда одинаково проводит ток. Не находя в то время авторитетного объяснения таким изменениям электропроводности цепочки, А. С. Попов много думал о причине странного явления, которое позже было им использовано в когерере — первом техническом индикаторе электромагнитных волн, примененном в приемной аппаратуре С. Попова.

Литература

1. Г. И. Головин. Изобретатель радио. Под ред. В. П. Вологодина. Молотовское обл. издательство, стр. 33—35, 1948.
2. С. Кудрявцев-Скайф. Радио — детище русского флота. Военно-Морское издательство, 1939, 1951.
3. Ю. Вебер. Техника молодежи, стр. 20, № 9, 1945.
4. Телеграфия и телефония без проводов, № 30 июнь, стр. 281, 1925.

Инж. Б. Н. ПЕТРОВСКИЙ

Министерство промышленности средств связи

ЗАМЕЧАНИЯ К СТАТЬЕ „О ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЯХ НА МАНГАНИНОВЫЕ ПРОВОДА“

(Электричество, № 6, 1951)

Выдвигаемые авторами статьи предложения о пересмотре технических требований на манганиновые провода следует всецело поддержать.

Считаем необходимым сделать по поводу статьи некоторые замечания. Рассматривая влияние разброса в значениях температурного коэффициента манганиновых сопротивлений, входящих в цепь компенсатора постоянного тока, авторы на основании расчетов приходят к заключению, что в предельном случае в результате этого влияния сопротивление компенсатора с образцовым может дать погрешность до 0,2%.

К сожалению, авторы не приводят ни одного конкрет-

ного примера из практики, который мог бы подтвердить справедливость подобного вывода, хотя почему-то и пишут: «Покажем справедливость этого положения на простом примере, заимствованном из опыта нашей работы».

По нашему мнению, для того чтобы указанные выводы, ставящие под сомнение достоверность проверок компенсаторов, стали действительно убедительными и чтобы их можно было публиковать в журнале, необходимо поставить ряд экспериментов, производя проверки компенсаторов при разных температурах, насколько это возможно в лабораторных условиях.

Инж. Р. Г. АБЕЛЬС

Свердловский филиал ВНИИМ

О СТАНДАРТИЗАЦИИ МАРКИРОВКИ СХЕМ ВТОРИЧНОЙ КОММУТАЦИИ

Условные обозначения аппаратуры в схемах регламентированы ГОСТ. Но маркировка развернутых и монтажных схем, являющихся более сложной и ответственной частью схем вторичной коммутации, не стандартизована.

В практике применяются различные системы маркировки, иногда очень запутанные и не дающие возможности просто определить назначение проводников по маркировочному знаку. В связи с этим на местах зачастую приходится производить перемаркировку выполненных процессов вторичной коммутации, приводя их в соответствие с принятой в данной энергосистеме маркировкой. В результате — излишняя затрата труда и государственных средств. Работа монтажников, вынужденных выполнять

монтажи по проектам с разной маркировкой, также чрезвычайно затруднена.

Введение единой системы маркировки создаст значительные удобства в эксплуатации и монтаже, а также поможет в осуществлении поставленной партией и правительством задачи о снижении стоимости и ускорении проектирования и строительства.

Эти и многие другие соображения настоятельно диктуют необходимость введения ГОСТ на маркировку схем вторичной коммутации.

Инж. Т. Б. ЗАСЛАВСКАЯ

Кузбассгипрошахт

В ИНСТИТУТЕ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ АН СССР

Признавая правильность критики работы Института автоматики и телемеханики Академии наук СССР, содержащейся в передовых статьях газеты «Правда» (17 сентября 1951 г.) и журнала «Электричество» (№ 11, 1951 г.), дирекция ИАТ в письме в редакцию журнала «Электричество» сообщила о разработанных ею и проводимых

в жизнь мероприятиях по перестройке научно-исследовательской работы института с целью максимального приближения всей деятельности ИАТ к запросам практики и концентрации научных сил института на выполнении актуальных задач в области автоматизации и телемеханизации важнейших отраслей народного хозяйства Союза ССР.



ПРОЦЕСС КОММУТАЦИИ В ОДНОФАЗНОЙ МОСТОВОЙ СХЕМЕ С ВЕСЬМА БОЛЬШОЙ СГЛАЖИВАЮЩЕЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Процессы коммутации в трехфазных схемах выпрямления и инвертирования достаточно подробно разобраны и исследованы. Процессы коммутации в однофазных мостовых схемах исследованы менее детально, а между тем они обладают своей спецификой, которая не присуща многофазным схемам.

В реферируемой работе освещены некоторые особенности коммутации в однофазных мостовых схемах.

В статье доказывается, что угол полного перекрытия, т. е. время, выраженное в электрических градусах, необходимое для того, чтобы ток в обмотке трансформатора изменил свою величину от $+I$ до $-I$, не зависит от токораспределения между вентилями при условии, что внутренние падения напряжений в вентилях пренебрежимо малы сравнительно с э. д. с. и индуктивным падением напряжения.

Частичные углы перекрытия, т. е. продолжительность (выраженная в градусах) нарастания тока в том или ином вентиле, в большой степени зависят от токораспределения между вентилями и, следовательно, от их внутренних сопротивлений. Для различных типов вентилях частичные углы перекрытия будут различными.

В статье рассмотрены схемы с сухими выпрямителями и кенотронами; с ионными вентилями управляемыми и неуправляемыми, а также восстановление обратного зажигания.

Авторы приходят к следующим выводам.

В отличие от многофазных схем в однофазной мостовой схеме время одновременной работы соседних вентилях зависит от типа вентилях.

Для сухих выпрямителей и кенотронов во время коммутации имеет место одновременное горение четырех вентилях. Частичное перекрытие для таких вентилях равно полному перекрытию. Продолжительность горения каждого вентиля больше 180° на время полного перекрытия. Длительность полуволны тока в фазе трансформатора равна 180° .

Для ионных вентилях во время коммутации имеет место одновременное горение трех вентилях. Частичное время перекрытия меньше полного. Длительность горения вентилях больше 180° на время частичного перекрытия.

При ионных вентилях обратное напряжение на вентилях, загорающихся раньше, появляется с запаздыванием, что благоприятно отзывается на работе этих вентилях.

(Известия АН СССР. Отделение технических наук, № 7, 1951 г. Ю. Г. Толстов и Г. П. Мосткова).

НОВЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Изготавливающиеся в настоящее время люминесцентные лампы основаны на трансформации резонансного ультрафиолетового излучения ртутного разряда низкого давления в видимое излучение с помощью люминофоров, нанесенных на внутреннюю поверхность колбы.

Недавно описан принципиально новый люминесцентный источник света, в котором электрическая энергия непосредственно превращается в световую.

Гудден и Поль еще в 1921 г. обнаружили, что сильные электрические поля способны увеличивать яркость фосфоресценции люминофоров, которые были предвари-

тельно возбуждены ультрафиолетовым излучением. Дарио впервые показал возможность непосредственного возбуждения люминесценции некоторых веществ под действием сильных переменных электрических полей и в дальнейшем подробно исследовал это явление, названное электролюминесценцией.

Явление электролюминесценции наблюдается тогда в сильных переменных электрических полях при напряженностях порядка $10^5 \dots 10^6$ в/см и частотах от 10 10 000 гц.

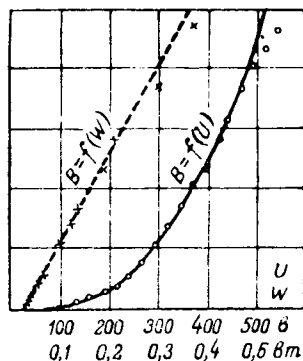
В качестве люминофоров были исследованы сульфиды, вольфраматы, силикаты, германаты и другие вещества. При больших напряженностях поля все исследованные люминофоры обнаруживают некоторое свечение, однако наилучший эффект был получен со специально подготовленными образцами сульфида цинка.

Исследования Дестрио производились преимущественно при частоте переменного тока в 50 гц. Предварительные результаты экспериментов показали значительное увеличение яркости люминесценции с ростом частоты, причем для ZnO изменение яркости связано с частотой поля линейной зависимостью. Исследования показали, что интенсивность свечения меняется периодически с частотой в два раза превосходящей частоту внешнего поля. Максимум свечения не совпадает по фазе с максимумом поля, причем сдвиг фаз зависит от примененного люминофора с содержанием активатора.

Интересно отметить, что аналогичное изменение величины сдвига фаз наблюдается также при увеличении напряженности поля, что может быть объяснено ростом проводимости люминофора, обусловленным увеличением количества электронов в полосе проводимости.

Спектр электролюминесценции заметно отличается соответствующего спектра для ультрафиолетового возбуждения. Так, полоса люминесценции сульфида цинка смещается в красную часть спектра при переходе от ультрафиолетового возбуждения к возбуждению переменным электрическим полем.

Для получения больших напряженностей поля при больших напряжениях в сети необходимо поместить между слоями люминофора между обкладками плоского конденсатора. В описанном Дестрио электролюминесцентном конденсаторе люминофор наносится в монокристаллическом слое на металлическую пластинку и закрепляется на ней с помощью канадского бальзама или очень тонкой резиновой пленки. Поверх этого слоя наносится пленка изолирующего масла, на которую накладываются



Гис. 1. Зависимость яркости B электролюминесценции от напряжения U и мощности W поля.

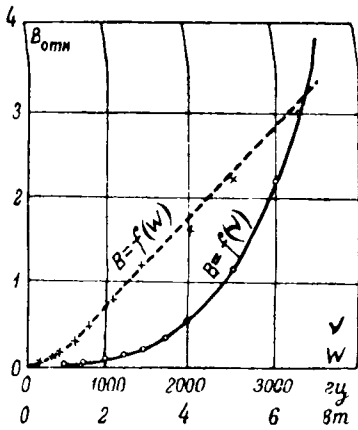


Рис. 2. Зависимость яркости B и выхода $\frac{B}{W}$ электролюминесценции от частоты ν и мощности W поля при постоянном напряжении.

ой слюды, нижняя часть которого делается проводящей помощью тонкой пленки морской соли с глицерином. Более совершенная конструкция светящегося конденсатора, пригодного для использования в качестве источника света, описана в недавно опубликованной статье Яна и др.

Светящийся конденсатор имеет слой люминофора, сублимированного в подходящем твердом диэлектрике и распыленного по поверхности специального «проводящего»

стекла. На одной из поверхностей этого стекла путем специального обжига создается обладающее хорошей электропроводностью покрытие толщиной порядка 5 мкм с коэффициентом пропускания света около 85%. Этот слой отличается большой твердостью и химической стойкостью.

Поверхность люминесцирующего слоя покрывается тонкой металлической пленкой, которая может быть, например, получена распылением алюминия. Порог видимой яркости свечения такого конденсатора соответствует напряжению в 25 в при частоте 60 гц.

Яркость значительно возрастает с увеличением напряжения и мощности, причем предельная ее величина обусловлена напряжением пробоя люминофора. При постоянном напряжении яркость быстро возрастает при повышении частоты. Яркость свечения при частоте 3 500...4 000 гц составляет около 25,5 мсб.

Авторы указывают, что новые источники света могут быть использованы в виде светящихся потолков, панелей, колонн и пр. Особый интерес представляет применение нового способа возбуждения люминесценции для самосветящихся объектов: приборных досок самолетов и автомобилей, деталей телевизоров и радиоприемников, часов и пр.

К числу преимуществ нового источника света должны быть отнесены: простота изготовления, связанная с отсутствием вакуумных колб, возможность регулирования яркости в широких пределах изменением мощности и практически мгновенное включение и выключение.

Интересно отметить, что, в то время как изменение напряжения практически не меняет спектра электролюминесценции, изменение частоты явно сказывается на спектральном распределении энергии излучения. Так, например, при переходе от частоты 60 гц к частоте 300 гц цвет свечения меняется соответственно от желто-зеленого до синне-зеленого.

(Успехи физических наук, т. 44, вып. 2, июнь 1951, Д. Ш.)

А РЪБЕЖОМ

ЭЛЕКТРОННЫЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ

(Обзор)

В последние годы наблюдается постепенно нарастающий интерес к вопросу использования электронных акселерометров для измерения и регистрации ускорений и вибраций в машинах и инженерных сооружениях, используемых в промышленности и на транспорте.

Наиболее ценными особенностями электронных акселерометров являются: высокая электрическая чувствительность, стабильность работы и довольно значительный сниженный ток.

Эти свойства электронных акселерометров позволяют осуществлять непосредственную запись ускорений электронным осциллографом без предварительного усиления сигнала, генерируемого датчиком.

Возможность использования датчиков, не требующих питания, оказывается особенно ценной в тех случаях, где приходится вести одновременную запись сигналов, поступающих от нескольких десятков акселерометров, установленных на отдельных узлах и деталях испытываемого устройства.

Действие электронных акселерометров основано на гудировании анодного тока электронной лампы в результате смещения подвижного электрода, находящегося у нее и подвергающегося воздействию внешнего поля.

Ранее этот принцип успешно использовался в электронных индикаторах ряда механических величин, действие которых сводилось к фиксации малых смещений, получаемых в результате действия контролируемых процессов.

В настоящее время используются два основных метода строения электронных акселерометров. Один из них сводится к размещению инертной массы вне датчика, который является электронным индикатором малых смещений.

Другой метод основан на эластичной подвеске подвижного электрода электронного датчика. Здесь электрод иг-

рает роль инертной массы, смещающейся в результате действия контролируемого ускорения.

Задача создания акселерометра первого типа сводится к выбору подходящего электронного датчика малых смещений и использованию подходящего способа скрепления инертной массы с чувствительным элементом датчика.

Простейшим электронным датчиком малых смещений является диодный термоэлектронный датчик, принципиальная схема которого приведена на рис. 1.

Дальнейшее развитие термоэлектронных датчиков шло, с одной стороны, в направлении использования разновидностей термоэлектронной лампы, в которой один из электродов делается подвижным, а с другой стороны, путем разработки специальных систем электродов.

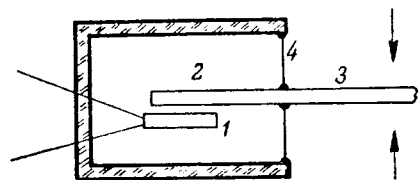


Рис. 1. Термоэлектронный датчик. 1 — неподвижный подогревный плоский катод; 2 — подвижный анод; 3 — жесткий стержень, служащий для передачи смещений; 4 — эластичная мембрана.

На рис. 2 показаны последовательно схемы термоэлектронных датчиков: где a — диодный датчик с подвижным анодом, b и $в$ — трехэлектродные датчики, у одного из которых подвижная управляющая сетка, а у второго подвижный анод, $г$ — пентодный датчик с подвижной управ-

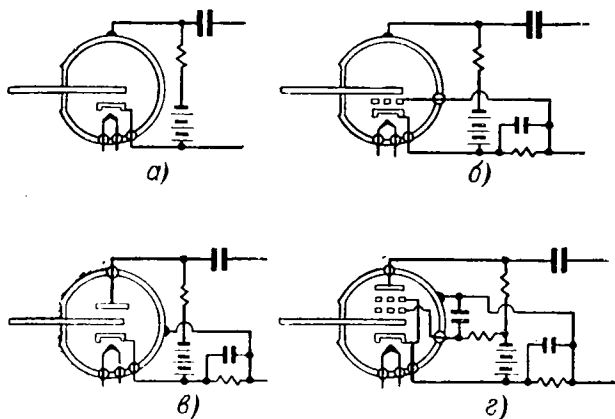


Рис. 2. Схемы термоэлектронных датчиков.

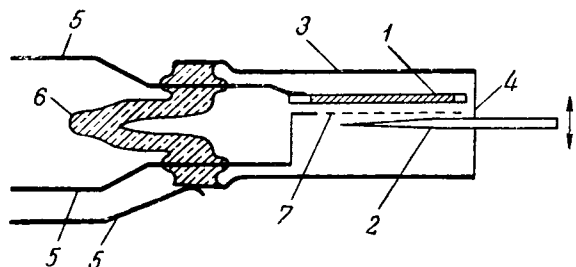


Рис. 3. Вибротрон RCA-5734.

1 — подогревный катод; 2 — анод; 3 — металлический резервуар; 4 — мембрана; 5 — вводы; 6 — отпайка откатной трубки; 7 — сетка.

ляющей сеткой. Эти типы датчиков представляют собой результат переноса принципов, положенных в основу действия обычных электронных ламп, в область конструирования электронных датчиков.

Из всех приведенных выше схем наиболее жизненными оказались типы *a* и *б*. Последний реализован, в частности, в так называемом вибротроне RCA-5734, принципиальная схема которого приведена на рис. 3.

Размеры этого датчика примерно следующие: длина 25 мм, а диаметр 6 мм. Имеются указания ряда авторов о благоприятных результатах использования этого датчика в акселерометрах, адаптерах, микрофонах и ряде других преобразователей механических величин в электрические сигналы.

Несколько более выгодный путь построения высокочувствительных электронных датчиков намечается в результате использования специальных систем электродов, открывающих возможности более эффективного управления анодным током датчиков. На рис. 4 дана принципиальная схема датчика с однородным полем. Термоэлектронный датчик с однородным полем состоит из двух плоских электродов 2 и 3, между которыми параллельно им натянут тонкий катод 1 непосредственного накала, покрытый веществом с малой работой выхода. На том же рисунке показано подключение источников питания. Электроды 2 и 3 подключаются к полюсам анодной батареи 4, а катод 1 к ее средней точке.

Действие термоэлектронного датчика с однородным полем сводится к следующему. Пока катод находится в области электрического поля, потенциал которой ниже всех участков катода, анодный ток датчика оказывается равным нулю. Перемещая катод по направлению к аноду, мы обнаружим появление анодного тока при достижении катодом эквипотенциальной поверхности электрического поля, потенциал которой равен потенциалу отрицательной части катода. Дальнейшее перемещение катода по направлению к аноду приводит к быстрому нарастанию анодного тока.

В датчиках этого типа, предназначенных для исследования быстрых динамических процессов, может оказаться

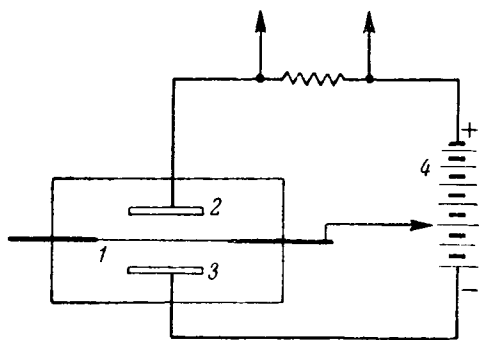


Рис. 4. Схема датчика с однородным полем.

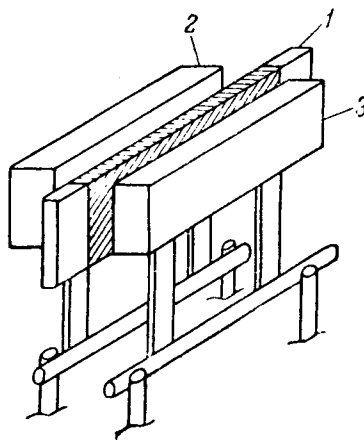


Рис. 5. Схема двуханодного диодного акселерометра.

1 — плоский подогревный катод; 2 и 3 — плоские аноды.

целесообразным осуществить перемещение электродов, дающих однородное поле относительно тонкого катода непосредственного накала. Такая замена позволяет, не меняя электрических параметров датчика, значительно улучшить его динамические характеристики в области высоких частот. Для совместного перемещения плоские электроды 2 и 3 соединяются жестко друг с другом при помощи изоляторов и вместе прикрепляются к рычагу, перемещению смещения внутрь датчика сквозь эластичную стенку прибора.

В наиболее малоинерционных приборах этого типа можно ограничиться перемещениями лишь одного отрицательного электрода. Существенным достоинством датчика с однородным полем является помимо высокой чувствительности также экономичность, обусловленная малым потреблением тока накала.

Использование подвижного электрода термоэлектронного датчика, упруго закрепляемого в приборе в качестве инертной массы, позволяет осуществить более простую конструкцию акселерометра, не нуждающегося в эластичной стенке для передачи смещений инертной массы, находящейся вне прибора.

Наиболее известным прибором этого типа является двуханодный диодный акселерометр Рамберга, принципиальная схема которого показана на рис. 5. Как видно из этой схемы, датчик представляет собой диод, в котором по обе стороны плоского подогревного катода 1 на упругих стойках укреплены плоские аноды 2 и 3. Под действием составляющей ускорения, нормальной к плоскости анодов, последние изменяют свое расстояние от катода, меняя соотношение токов на аноды.

Улучшенная модель дюдного акселерометра оказалась пригодной в работе и нашла применение для исследования промышленных механизмов и на транспорте.

Здесь следует отметить целесообразность использования в акселерометрах с внутренней инертной массой так и датчиков с более сложными многоэлектродными схемами, позволяющими получить за счет большей чувствительности к малым смещениям более высокие собственные частоты датчика в результате увеличения жесткости пружинного подвеса инертной массы. В частности, представляется интересным использование для этой цели мезоэлектронного датчика с однородным полем.

В этом датчике в качестве инертной массы могут быть использованы любые пружинящие электроды и в том числе катод непосредственного накала.

Литература

1. R. Gunn. Journ. of Applied Mechanics, т. 7, № 2, стр. 49, 1940.
2. H. F. Olson. Journ. of Acoust. Soc. of Am., т. 19, 2, стр. 307, 1947.
3. R. C. Lewis. Journ. of Acoust. Soc. of Am., т. 22, 3, стр. 357, 1950.
4. Mechanical Displacement input Electron Tube. Instruments, т. 9, июль, стр. 420, 1946.
5. Mechano-Electronic Transducer RCA — 5734. Rev. Scient. Instr., т. 19, № 12, стр. 926, 1948.
6. J. Rotstein. Electronics, т. 19, № 3, стр. 230, 1946.
7. W. Ramberg. Journ. of Research Nation. Bureau Standards, т. 37, стр. 391, 1946
8. W. Ramberg. AIEE Transactions, т. 66. стр. 735, 47.
9. Improved Ramberg Vacuum-Tube Acceleration Pickup. Electronics, т. 24. № 2, стр. 120, 1951.

Кандидат техн. наук, доц.
Л. А. ГОНЧАРСКИЙ

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

(Обзор)

На протяжении 1950 г. в зарубежной электротехнической литературе появился ряд сообщений, свидетельствующих о том, что механические выпрямители сильного тока продолжают привлекать внимание европейских и американских электротехнических фирм.

Значительные технико-экономические преимущества механических выпрямителей сильного тока при напряжениях от 100 до 400 в по сравнению с другими видами выпрямителей наряду со стремлением к дальнейшему повышению их эксплуатационной надежности, побуждают разработку новых схем и конструкций.

Фирма Броун-Бовери еще в 1945 г. сообщала, правда в каких-либо подробностей, что ею разработан механический выпрямитель на ток 8 500 а [1]. Декабрьский номер журнала этой фирмы за 1950 г. целиком посвящен работам в области механических выпрямителей [2-7]. Приводятся подробные данные о двух крупных аппаратах. Одна из них, изготовленная в 1944 г., состоит из одного контактного аппарата с двумя трехфазными параллельными системами на суммарный выпрямленный ток 800 а при регулируемом напряжении от 150 до 400 в. Выпрямитель работает параллельно с двигатель-генератором на общие шины 300...400 в, питающие алюминий в печи, и находится в эксплуатации свыше 28 000 час.

Вторая установка, выпущенная в 1950 г., состоит из двух механических выпрямителей на 5 000 а каждый при выпрямленном напряжении от 140 до 250 в и работает на трансформаторе.

Безыонная работа достигается, как обычно, в механических выпрямителях сильного тока, с помощью насы-

щающихся коммутующих дросселей с сердечниками из холоднокатанной кремнистой или никелевой стали. Коммутующие дроссели выполнены с масляным охлаждением, что дает выигрыш в весе активных материалов и позволяет применить для сердечников магнитную сталь более низкого качества, чем в случае воздушного охлаждения.

Схема выпрямления принята трехфазная Ларионова, однако в отличие от механических выпрямителей Сименса не с тремя, но с шестью коммутующими дросселями, по одному на каждый контакт. В шестидроссельной схеме устраняется так называемое «условие 60°», благодаря чему за счет увеличения общего веса дросселей могут быть понижены требования к качеству стали сердечников. Кроме того, в шестидроссельной схеме, фирме удалось обойтись без специальных дросселей включения. С этой целью коммутующие дроссели снабжены подмагничиванием переменным и постоянным токами. Такое комбинированное подмагничивание позволяет получить с помощью того же дросселя во время включения контакта ступеньку малого тока включения, требуемой продолжительности, а во время отключения контакта соответственно ступеньку отключения.

Как указывается, тот же контактный аппарат, который по схеме Ларионова дает 8 000 а при 400 в, при трехфазной однополупериодной схеме с отсасывающим дросселем может дать вдвое больший выпрямленный ток (16 000 а), но при более низком напряжении 50...150 в.

В механических выпрямителях Броун-Бовери применено автоматическое механическое регулирование контактного времени, имеющее целью поддерживать постоянный запас надежности при изменениях выпрямленного напряжения и нагрузки.

Схема устройства автоматического регулирования запаса надежности не содержит ничего принципиально нового, но отличается чрезмерной сложностью (ламповый усилитель, дополнительный контакт специально для измерительных целей).

Так называемая «параллельная ветвь», имеющая целью ограничить скорость восстановления напряжения на расходящихся контактах механического выпрямителя, а также, по возможности, разгрузить рабочие контакты от разрыва тока ступени, выполнена по схеме, показанной для одного контакта на рис. 1. Рабочий контакт шунтируется тиратроном T и полным сопротивлением Z , состоящим из последовательно соединенных активного сопротивления R , индуктивности L и емкости C . Отпирание тиратрона производится подачей на его сетку импульса напряжения от вспомогательной обмотки A , наложенной на коммутующий дроссель D .

Таким образом, тиратрон отпирается только на время перемагничивания дросселя, т. е. на время, когда дроссель образует ступень малого тока.

В описываемой схеме разрыв тока ступени в основном производится тиратроном, а рабочие контакты рвут лишь очень малый остаточный ток i_n , равный разности тока ступени дросселя i_{cm} и тока тиратрона i_m .

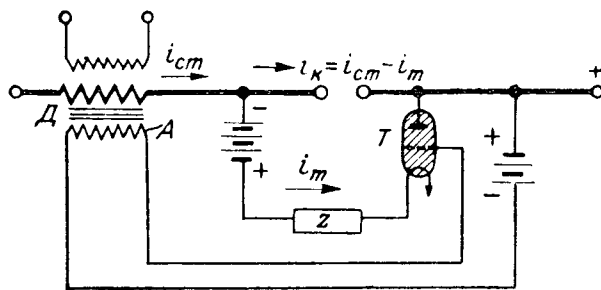


Рис. 1.

Следует отметить, что схемы параллельной ветви с вентилями не являются новыми и в различных модификациях давно известны. В частности, в выпрямителях ХЭТИ еще в 1946—1947 гг. с успехом применялась параллельная ветвь с сухими вентилями (селены). Существуют и другие схемы, в которых достигается практически полная разгрузка рабочих контактов механического выпрямителя без применения вентиляей.

Установка Броун-Бовери не содержит регулировочного трансформатора и регулирование выпрямленного напряжения производится изменением угла регулирования (отсечка). Однако вместо обычно применяемых для изменения отсечки схем (поворот статора синхронного приводного двигателя или поворот фазорегулятором трехфазной звезды напряжений, питающей статор) используется поворот вектора н. с. по отношению к телу ротора. Для этого обмотка возбуждения ротора приводного двигателя выполнена из трех ветвей, соединенных звездой. Предусмотрено автоматическое регулирование выпрямленного напряжения или тока. Регулятор воздействует на цепи возбуждения синхронного приводного двигателя, изменяя угол регулирования.

Защита контактного аппарата от дуги осуществлена, как обычно, с помощью короткозамыкателей, которые выпадают при аварии и замыкают накоротко шины переменного тока между коммутирующими дросселями и контактным аппаратом. Таким путем с контактного аппарата быстро снимается напряжение переменного тока и исключается возможность возникновения дуги на контактах. На отключающую катушку короткозамыкателя воздействуют насыщающиеся трансформаторы обратного тока. Полное время действия защиты от момента возникновения обратного тока до его прекращения после выпадения короткозамыкателя составляет по данным фирмы всего $2 \cdot 10^{-3}$ сек. Следует отметить, что существуют более простые и еще более быстродействующие схемы защиты контактного аппарата, непосредственно реагирующие на дугу на контактах.

Данные об устройстве механизма контактного аппарата в журнале не сообщаются. Указано только, что контактное время отдельных контактов может корректироваться на ходу выпрямителя без снятия нагрузки.

Приведены примеры компоновок преобразовательных подстанций с механическими выпрямителями для двух вариантов:

а) подстанция общей мощностью 6 400 квт, содержащая два одинарных механических выпрямителя, каждый на ток 8 000 а при напряжении 400 в, с регулировкой вниз до 150 в. Объем здания, включая трансформаторное помещение и распределительную высокого и низкого напряжения, составляет $0,12$ м³/квт;

б) подстанция общей мощностью 12 800 квт, содержащая два двойных механических выпрямителя, каждый на ток 16 000 а при напряжении 400 в, с регулировкой вниз до 150 в. Объем здания менее $0,11$ м³/квт.

В соответствии со сказанным выше при переводе выпрямителей на работу по трехфазной однополупериодной схеме с отсасывающим дросселем, подстанция а при напряжении от 150 до 50 в может давать суммарный выпрямленный ток 32 000 а, подстанция б — соответственно 64 000 а.

Подробное обследование к. п. д. механических выпрямителей дало для установки 8 000 а, 400 в (выпуск 1944 г.), при номинальной нагрузке, 95,3% (включая силовые трансформаторы) [Л. 5].

Некоторое снижение к. п. д. (примерно на 1%) объясняется тем, что обмотки силовых трансформаторов и коммутирующих дросселей этого выпрямителя были изготовлены из алюминия, а сердечники дросселей — из кремнистой стали с повышенными потерями. Установка выпуска 1950 г. 250 в, 10 000 а с коммутирующими дросселями из никелевой стали, имела к. п. д. 96,2% (включая силовые трансформаторы).

Потери, отнесенные к номинальной мощности, распределялись в последней установке следующим образом: трансформаторы 1,68%, коммутирующие дроссели 1,23%, контактный аппарат и вспомогательные устройства 0,87%.

Срок службы рабочих контактов по данным фирмы в среднем 4 000 час, а в отдельных случаях достигал 7 800 час.

Установка, работавшая на общие шины с генераторами постоянного тока, что является наиболее неблагоприятным случаем в отношении аварийных отключений, давала в среднем 3,5 обратных зажигания в месяц (срок наблюдения 22 000 час). До 65% этих обратных зажиганий были вызваны посадками напряжения в сети переменного тока. Механический выпрямитель при обратных зажиганиях отключался селективно и мог быть немедленно снова включен. В более благоприятном случае, когда на

сборные шины работают только механические выпрямители или механические выпрямители параллельно с ртутными выпрямителями, число обратных зажиганий значительно снижается.

По данным автора [Л. 4] годовые расходы на содержание преобразовательной подстанции 10 000 а, 35 в случае ртутных выпрямителей примерно на 30% выше к. п. д. на 5,8% ниже, чем в случае механических выпрямителей.

По мнению фирмы, при напряжениях до 400 в и в тех же токах механические выпрямители имеют все основания вытеснить другие типы выпрямителей. Одновременно отмечается необходимость их дальнейшей разработки усовершенствования. В существующих конструкциях, известно, рабочие контакты замыкаются и размыкаются жесткой программой, задаваемой, например, кулачковым механизмом и синхронным приводным двигателем. Одно было предпринято ряд попыток построить механические выпрямители, в которых каждый контакт открывается и закрывается вручную (или достаточно малым). К этому последнему типу относятся аппарат, разработанный Дунканом [Л. 4]. Этот выпрямитель представляет собой комбинацию выключателей с синхронным приводом и индивидуальным магнитным управлением, осуществляемым через специальный датчик импульсов. Собственное время выключения 10^{-4} сек.

Для разрыва тока используется, как обычно, ступень малого тока, образуемая насыщающимся дросселем с сердечником из специальной стали. На этом принципе был построен выключатель на ток 600 а при 500 в и соответственно механический выпрямитель на 1 000 а при 1 000 в. Основное преимущество такого выпрямителя — возможность уменьшения времени работы ступени малого тока до $3 \cdot 10^{-4}$ сек против $7 \dots 8 \cdot 10^{-1}$ сек в механических выпрямителях с жесткой программой и автоматическим регулятором запаса надежности. Соответственно уменьшается вес коммутирующих дросселей, являющихся на более дорогой частью механического выпрямителя.

Одна американская фирма, используя немецкие данные, изготовила и в феврале 1949 г. ввела в эксплуатацию первую преобразовательную подстанцию с механическими выпрямителями сильного тока на заводе электрохимической компании в Буффало [Л. 3].

Установка состоит из двух единиц по 3 500 а, 280 в. Частота выпрямляемого тока 25 гц. Механические выпрямители работают параллельно с двумя ртутными выпрямителями.

Вторая преобразовательная подстанция состоит из двух механических выпрямителей 100 в, 5 000 а каждая и была введена в эксплуатацию на заводе канадской резиновой и химической компании в августе 1949 г.

По конструкции и устройству американские механические выпрямители мало отличаются от выпрямителей Сименса выпуска 1941 г.

Коммутирующие дроссели изготовлены из никелевой стали, контакты — серебряные. Защита с помощью короткозамыкателей. Имеется автоматический регулятор тока автоматическое регулирование возбуждения дросселей. Регулирование выпрямленного напряжения производится изменением отсечки.

В отличие от немецких установок коммутирующие дроссели и контактный аппарат установлены вплотную к силовому трансформатору, благодаря чему еще более повышается компактность установок.

По мнению фирмы, рациональная область применения механических выпрямителей находится в диапазоне напряжений от 50 до 400 в. Предлагается следующая шкала токов: 50, 200, 625, 1 250, 2 500, 5 000 и 10 000 а в единицу.

Срок службы контактов оценивается в 18 мес., срок службы контактного аппарата 50 000 час. Время, необходимое для смены всех подшипников в контактной аппаратуре, составляет 12 час.

В докладе отмечается, что опыт эксплуатации механических выпрямителей оказался благоприятным и при выданных сравнительные данные о к. п. д. для различных типов выпрямителей (рис. 2).

В прениях по докладу выступали представители фирм GE и Allis-Chalmers, которые, не оспаривая высокие

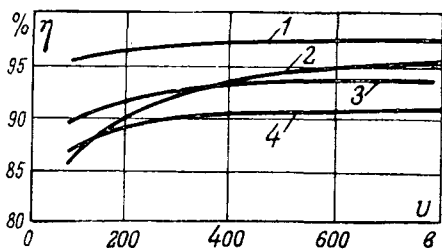


Рис. 2. Кривые к. п. д. различных выпрямителей.

1 — механический; 2 — ртутный; 3 — однофазный преобразователь; 4 — двигатель-генератор.

технико-экономических показателей механических выпрямителей, приведенных докладчиком, останавливались на трудностях, которые должны возникнуть при применении механических выпрямителей для питания сетей с толчкообразной нагрузкой (электрическая тяга).

Литература

1. Brown Boveri Mitt., стр. 32, № 1/2, 1945.
2. H. Blatter. Устройство и схемы включения механических выпрямителей. Их поведение в эксплуатации. BBC Mitt., стр. 468, № 12, 1950.
3. A. Goldstein. Проблема коммутации в механических выпрямителях. BBC Mitt., стр. 478, № 12, 1950.
4. C. Bruhildsen. Сравнение экономичности механических выпрямителей с другими преобразователями. BBC Mitt., стр. 489, № 12, 1950.
5. A. Goldstein, H. Blatter. Измерение к. п. д. механического выпрямителя. BBC Mitt., стр. 496, № 12, 1950.
6. E. Kern. Защита механических выпрямителей, стр. 496, № 12, 1950.
7. E. Gerber, E. Zantop. Компоновка подстанций с механическими выпрямителями. BBC Mitt., стр. 499, № 12, 1950.
8. Отчет о годовичном собрании Союза немецких электротехников. ETZ, стр. 499, Н. 17, 1950.
9. O. Jensen. Механический выпрямитель. Iron and Steel Engineer, стр. 69. № 4, 1950.

Инж. С. М. ФЕРТИК

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ НА МОДЕЛИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 380 кв

На длинных линиях электропередачи 380 кв возможно значительное повышение напряжения, возникающее в режиме одностороннего отключения линии со стороны приемной системы или генераторного конца, а также в случае включения линии толчком со стороны приемной системы. Это повышение напряжения может оказаться опасным для изоляции высоковольтных аппаратов и трансформаторов. При этом необходимо учитывать не только повышение напряжения рабочей частоты, но и возникновение в кВовой тока высших гармоник, обуславливающих дополнительное повышение напряжения.

В описываемой работе были экспериментально исследованы переходные процессы, которые возникают в трехфазной линии электропередачи 380 кв длиной 700 км. Исследования проводились на модели сети. Параметры модели были выбраны так, чтобы они максимально соответствовали характеристикам реальной сети. Потери на корону при этом не учитывались.

Одной из задач исследования был учет влияния промежуточных подстанций на амплитуду и характер изменения напряжения в течение времени порядка 0,1 сек, после выключения линии до момента начала работы регуляторов напряжения. В течение этого времени напряжение продолжает повышаться, так как реакторы, компенсирующие зарядный ток ненагруженной линии, еще не успевают включиться.

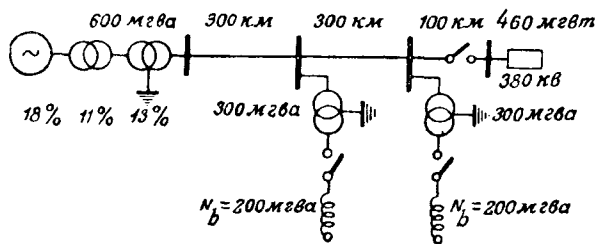


Рис. 1. Схема электропередачи 380 кв. Промежуточные подстанции не имеют связи с приемной системой.

На первом этапе исследований учет влияния приемной системы не производился. Предполагалось, что возможные повышения напряжения ограничиваются только намагничивающей мощностью трансформатора. Схема электропередачи и параметры сети показаны на рис. 1. Мощность генераторов принималась равной 600 тыс. квт. Провода линии электропередачи были выполнены расщепленными на четыре части.

В начале работы аналитическим путем были определены напряжения в различных точках электропередачи в установившемся режиме. Если принять, что по линии передается активная мощность, равная 90% от натуральной, то напряжение в начале линии оказывается на 3% выше напряжения в конце линии. Электродвижущая сила генератора при этом увеличивается незначительно (рис. 2, кривая с). Произведенные расчеты также показали, что в установившемся режиме напряжение на открытом конце линии при сбросе нагрузки увеличилось почти до 1,55U_н, в начале линии до 1,3U_н, а на первой промежуточной подстанции составило 1,47U_н (рис. 2, кривая b). После рас-

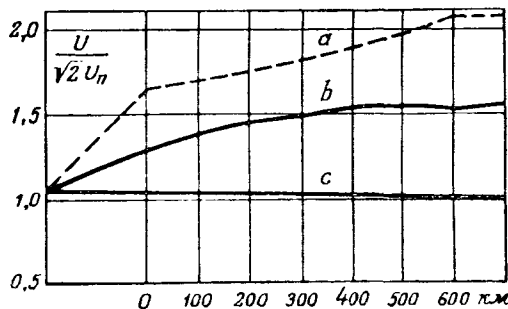


Рис. 2. Повышение напряжения в трехфазной линии электропередачи при сбросе нагрузки. a — максимальные значения переходных напряжений после сброса нагрузки; b — установившееся перенапряжения; c — напряжения до начала переходного процесса. По линии передается мощность, равная 90% от натуральной.

четов было произведено исследование переходных процессов на модели сети. На рис. 3 показаны осциллограммы переходных напряжений при сбросе нагрузки.

На рис. 2 (кривая a) показаны значения переходных напряжений, измеренные в различных точках сети. Как следует из рис. 2, кратковременное повышение напряжения в конце линии электропередачи достигло 2,1U_н. На первой подстанции, находящейся на расстоянии 300 км, максимальное повышение напряжения составляло 1,8U_н.

Осциллограммы показывают, что длительность перенапряжений достигает нескольких полупериодов. При этом повышение напряжения в конце линии в установившемся режиме будет составлять только 1,15U_н.

Второй этап исследований на модели заключался в учете влияния приемной системы. На рис. 4, a и б показана принятая для исследований схема сети. При этом предполагалось, что к электропередаче 380 кв присоединена одна приемная подстанция, которая включена постоянно.

Схемы рис. 4, a и б отличаются тем, что в схеме рис. 4, a приемная система находится на расстоянии 300 км от генерирующей станции, а в схеме рис. 4, б — на расстоянии 600 км. Параметры электропередачи те же, что и на схеме, показанной на рис. 1. Мощность короткого замыкания

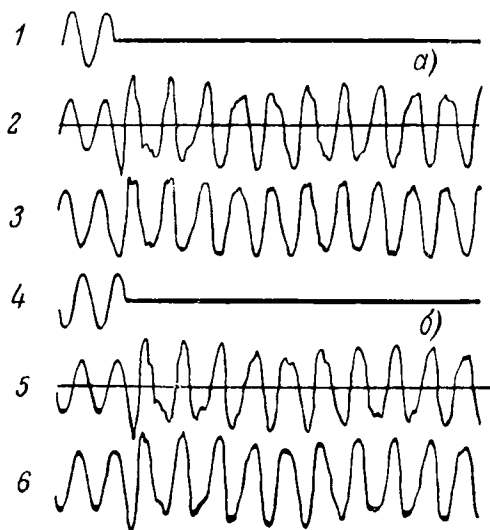


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов на линии электропередачи при сбросе нагрузки.

1 — ток в конце линии электропередачи; 2 — напряжение в конце линии электропередачи (700 км); 3 — напряжение в начале линии электропередачи (0 км); 4 — ток в конце линии электропередачи; 5 — напряжение на второй промежуточной подстанции (600 км); 6 — напряжение на первой промежуточной подстанции (300 км).

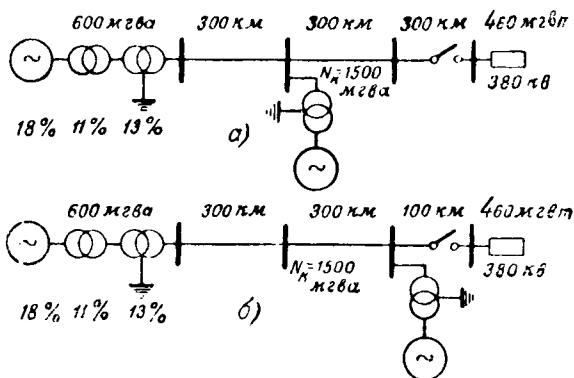


Рис. 4. Схема электропередачи 380 кВ. Промежуточные подстанции имеют связь с приемной системой.

приемной сети на стороне 380 кВ была принята равной 1 500 тыс. кВА. Электродвижущая сила эквивалентного генератора приемной сети была отрегулирована таким образом, чтобы промежуточная подстанция до начала переходного процесса мощности не потребляла. После сброса нагрузки э. д. с. эквивалентного генератора в течение 0,1 сек оставалась постоянной. Результаты произведенных измерений показаны на рис. 5. Как видно, при схеме работы по рис. 4 максимальное повышение напряжения в конце линии электропередачи достигало $1,9U_n$. После 0,1 сек напряжение уменьшается до $1,43U_n$.

В случае работы электропередачи по схеме, показанной на рис. 4, б, максимальное повышение напряжения было меньше, чем в предыдущем случае, и достигало $1,45U_n$ (рис. 6).

В результате исследований автор приходит к выводу, что хотя влияние намагничивающей мощности трансформаторов и приемной системы заметно ограничивает величину перенапряжений, тем не менее простая экстраполяция применяемых в настоящее время уровней изоляции для напряжения 380 кВ недопустима, так как на длинных линиях 380 кВ возможны значительные повышения напряжения. Поэтому для схемы электропередачи, показанной на рис. 1, при наибольшем длительно допустимом напряжении 380 кВ, автор рекомендует принять испытательное напряжение для внешней изоляции равным 880 кВ.

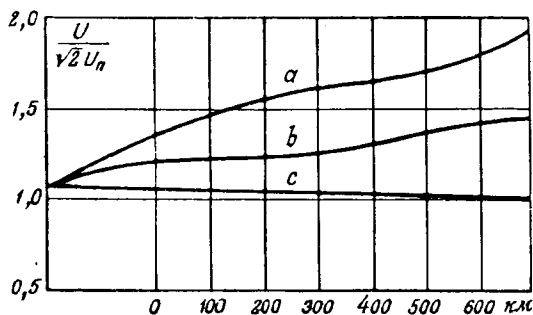


Рис. 5. Повышение напряжения при сбросе нагрузки на линии электропередачи 380 кВ, показанной на рис. 4, а (приемная система находится на расстоянии 300 км от генераторного конца).

а — максимальные значения переходных напряжений после сброса нагрузки; б — установившееся напряжение; в — напряжение до начала переходного процесса.

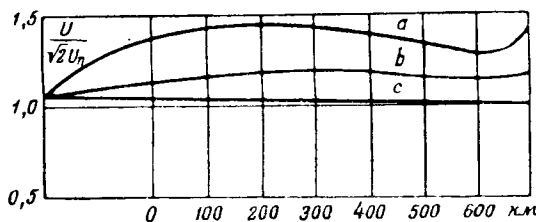


Рис. 6. Повышение напряжения при сбросе нагрузки на линии электропередачи 380 кВ, показанной на схеме рис. 4, б (приемная система находится на расстоянии 600 км от генераторного конца). Обозначения, как на рис. 5.

Как выяснилось во втором этапе исследований, учет влияния промежуточных подстанций дает возможность снизить величины испытательных напряжений.

Произведенные исследования показали, что различия возможных повышений напряжения на длинных линиях 380 кВ в сильной степени зависит от принятой схемы передачи электрической энергии.

Рекомендуемые автором уровни испытательных напряжений внешней изоляции порядка 880 кВ приведут к тому, что из-за удорожания стоимости электрооборудования передача энергии на большие расстояния может оказаться экономически неоправданной. Поэтому решение поставленного вопроса заключается не в увеличении уровней испытательных напряжений, а в создании такой схемы передачи энергии, которая исключает возможность появления значительных перенапряжений.

В заключение следует отметить, что учет влияния на роны на величину возможных перенапряжений может заметно изменить результаты, полученные Г. Доршем.

(ETZ, № 24, 1950. Н. Dorsch)

Инж. А. Н. ШЕРЕНЦ

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СРОК СЛУЖБЫ БУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Широкое применение бумажных конденсаторов во временной электротехнике делает вопрос об их сроке службы в различных условиях эксплуатации весьма актуальным и привлекает к нему большое внимание как отечественных, так и зарубежных исследователей. В связи с этим ознакомление с реферлируемой статьей представляет несомненный интерес.

Автор рассматривает следующие основные причины вызывающие пробой бумажного конденсатора: слабая ста, обусловленные проводящими включениями, термическая нестабильность (тепловой пробой), развитие внутренней низации, электрохимическое разрушение и медленная чисто химическое разрушение, которое может развиваться даже при отсутствии электрического поля. Ока

тельный пробой в конце срока службы конденсатора происходит как локализованный тепловой пробой или как чисто электрический пробой в термически или химически слабленных участках диэлектрика.

Проводящие частицы могут оказывать сильное влияние при небольшом числе слоев бумаги между обкладками. При толщине бумаги 5...20 мкм всегда имеются такие частицы, которые или пронизывают насквозь всю толщу бумаги, или, во всяком случае, резко снижают пробивное напряжение бумажного листа. Лучшие сорта бумаги содержат 50...200 проводящих частиц на 1 м². Автор считает, что проводящие частицы, в основном, представляют собой частицы угольной пыли. По нашим данным, это в основном частицы железа и меди или их соединения.

При рассмотрении теплового пробоя автор приводит расчетную формулу для вычисления пробивной напряженности, ссылаясь на работу Уайтхеда 1939 г. Известно, что значительно раньше расчет электрической прочности при тепловом пробое был выполнен советскими учеными.

Для небольших бумажных конденсаторов критическое значение постоянной времени, при котором возможен тепловой пробой, по мнению автора, составляет 100 мгом. мкф. В связи с этим он считает, что для конденсаторов, работающих в цепях постоянного тока, тепловой пробой может весть место только при рабочей температуре выше 100°С или при неудовлетворительном качестве технологии, дающей пониженные значения сопротивления изоляции.

Для конденсаторов, работающих при переменном напряжении, тепловой пробой становится вероятным при рабочей температуре больше 40...50°С, если конденсатор имеет повышенные потери. Для конденсаторов, имеющих обычную величину потерь, повышенная температура опасна не столько с точки зрения появления вероятности теплового пробоя, сколько по условиям ускорения процесса старения диэлектрика.

Ионизация диэлектрика бумажного конденсатора (внутренние частичные разряды) наступает в том случае, если значение рабочей напряженности поля $E_{раб}$ превышает некоторый предел E_u .

При увеличении разности $E_{раб} - E_u$ срок службы конденсатора резко сокращается даже при комнатной температуре, особенно при его работе в цепи переменного напряжения.

Напряжение начала разрядов, по мнению автора, лежит около 350...500 в (амплитудное значение) и имеет близкое значение как при постоянном, так и при переменном токе. При этом температура мало влияет на срок службы конденсатора. Разрушительное действие внутренней ионизации имеет кумулятивный характер. Постепенно происходит обуглероживание диэлектрика, сопровождающееся газовыделением, способствующим развитию ионизации.

При $E_{раб} < E_u$ срок службы конденсатора обычно превышает 10 000 час, и пробой обусловлен уже другим механизмом, для которого характерна резкая зависимость от температуры.

При пробое кратковременным воздействием напряжения, явление пробоя начинается разрядом в газовых включениях. Поэтому, обычно, кратковременная электрическая прочность не позволяет правильно судить о возможном сроке службы конденсаторов.

При работе бумажных конденсаторов в цепи постоянного тока процесс старения, приводящий в конце концов к пробую, обычно имеет электрохимический характер и связан с происходящими в диэлектрике электролитическими процессами. Скорость разрушительных процессов зависит от величины тока утечки, от природы выделяющихся при электролизе продуктов и от температуры. Посторонние, легко диссоциирующие примеси в диэлектрике бумажного конденсатора дают местное возрастание проводимости и могут сильно снижать срок службы, ускоряя развитие электрохимического разрушения диэлектрика. С этой точки зрения применение полярных пропитывающих масс, особенно хлорированных, дает худшие результаты, чем пропитка непolarными массами, так как повышенное значение ϵ способствует облегчению диссоциации посторонних примесей. Автор подробно иллюстрирует процесс электрохими-

ческого старения, обусловленный проникновением в пропитанную бумагу таких посторонних примесей, как канифоль (паяльный флюс), битум (заливочная масса), продукты окисления церезина и т. д.

Рассматривая вопрос о стабилизации хлорированных масс, автор дает новую теорию действия стабилизаторов, указывая, что их роль сводится к связыванию водорода, выделяющегося у катодной обкладки в процессе электролиза, и отвергает старые теории о наличии защитной пленки на электродах или об образовании стабилизатором координационных комплексов со свободным хлором.

При электрохимическом старении срок службы конденсатора резко зависит от температуры. Автор приводит данные об этой зависимости для конденсаторов из разных сортов бумаги с разной пропиткой, исследованных при постоянном напряжении ($E_{раб} = 18...20$ кв/мм). В полулогарифмической системе координат эта зависимость характеризуется системой параллельных прямых:

$$\lg \tau = \lg A - Bt, \text{ или } \tau = A \cdot 10^{-Bt},$$

где τ — в часах и t — в °С.

Анализируя данные автора, получаем следующие значения коэффициентов для обследованных им вариантов бумажных конденсаторов (таблица):

Сорт бумаги	Пропиточная масса	B	lg A
Тряпичная (льняная) . .	Хлорнафталин	0,04	5,3
Тряпичная	Хлордифенил	0,04	5,6
Крафт целлюлозная . .	Хлорнафталин	0,04	6,1
Крафт целлюлозная . .	Хлордифенил	0,04	6,3
Тряпичная	Церезин	0,04	6,8
Тряпичная	Вазелин	0,04	7,0

Примечание: Стабилизация не применялась.

Эта таблица наглядно показывает, что срок службы бумажного конденсатора может резко зависеть от типа бумаги и рода пропиточной массы.

При изучении процесса проникновения в толщу диэлектрика посторонних примесей автор успешно пользовался исследованием пропитанной бумаги при ее освещении ультрафиолетовыми лучами. Отметим также, что в качестве стабилизаторов при процессе старения, обусловленном воздействием ионизации, следует также применять вещества, присоединяющие водород, выделяющийся при разложении пропиточной массы под действием внутренних разрядов.

Автор полагает, что процесс электрохимического старения пропитанной бумаги может идти не только при постоянном напряжении, но и при переменном напряжении низкой частоты.

Химическая нестабильность компонентов диэлектрика может приводить к развитию процесса старения в бумажных конденсаторах даже при отсутствии электрического поля, особенно при воздействии повышенных температур. В этом случае прежде всего приходится сталкиваться с окислительными процессами. Углеводородные пропиточные массы (например, церезин) окисляются относительно легко; то же можно сказать и о целлюлозе, являющейся основой бумаги. При температурах выше 100°С бумага может выделять заметные количества газов; при 140°С идет процесс обуглероживания бумаги и наблюдается потеря механической прочности за 500...1 000 час, даже при отсутствии кислорода и влажности. Наличие кислорода, влаги, следов кислот или щелочей может сильно ускорить процесс.

(Р. I. E. E., ч. III, № 52, стр. 113, 1951. Н. Church)

Доктор техн. наук В. Т. РЕННЕ

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ В ЦЕЛЫХ ЛИСТАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Измерение потерь в электротехнической стали производится, как правило, с помощью ваттметра на аппарате Эшштейна. Несмотря на свое широкое распространение, этот метод имеет ряд недостатков: необходимость вырезания проб, связанный с этим непроизводительный расход материала и времени и др. Эти недостатки устраняются методикой измерения потерь не на пробах, а в целых листах стали. При этом лист стали намагничивается до определенного значения индукции с помощью плоской катушки с длиной, равной длине листа, и при этом измеряется активная составляющая потребляемого катушкой тока. Эта составляющая и является мерой активных потерь в данном листе стали. Непосредственное измерение потребляемой катушкой активной мощности представляет значительные трудности, так как величина этих потерь не превышает нескольких ватт.

Для измерений применяется магнитоэлектрический прибор в сочетании с механическим измерительным выпрямителем, состоящим, в основном, из синхронного двигателя (3000 об/мин при 50 гц), на оси которого расположен эксцентрик. При вращении он попеременно, в такт с напряжением, питающим двигатель, приподнимает и опускает плоскую пружинку на неподвижный контакт. На конце пружинки укреплен подвижный контакт, который, так же как и неподвижный, сделан из золота с целью обеспечения малого переходного сопротивления при длительной работе. По сравнению с полупроводниковым (электроизмерительные приборы детекторной системы) механический выпрямитель обеспечивает следующие преимущества: а) возможность регулирования длительности замыкания контактов в пределах примерно от 20 до 340°, что достигается путем некоторого смещения неподвижного контакта специальным винтом; б) возможность изменения фазы замыкания контактов относительно фазы приложенного к двигателю напряжения, т. е. относительно измеряемой величины; это достигается путем поворачивания на определенный угол корпуса выпрямителя со встроенными в него контактами относительно статора синхронного двигателя, остающегося неподвижным в пространстве.

Эти возможности значительно расширяют области применения механических измерительных выпрямителей в сочетании с магнитоэлектрическими измерителями по сравнению с приборами других систем, также использующих магнитоэлектрический измеритель. В частности, они могут быть использованы для измерения активных и реактивных составляющих тока или напряжения. Принципиальная схема измерения показана на рис. 1. Измерительные зажимы 1 через сопротивление r присоединены к добавочному сопротивлению r_n и служат для измерения тока. Зажимы 2 через последовательное сопротивление R_n присоединены к напряжению потребителя U . С помощью переключателя магнитоэлектрический прибор с последо-

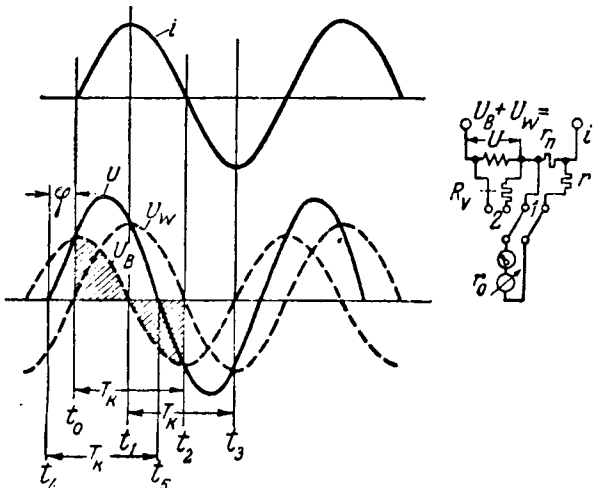


Рис. 1. Измерение активной и реактивной составляющих.

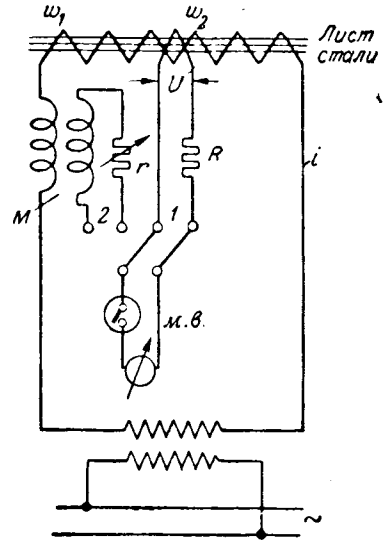


Рис. 2. Принципиальная схема для измерения удельных потерь в целых листах электротехнической стали. МВ — механический измерительный выпрямитель.

вательно с ним включенным механическим выпрямителем переключается с зажимов 1 на зажимы 2 для измерения соответственно тока или напряжения. Если напряжение сдвинуто по фазе относительно тока i , то его можно разложить на активную составляющую U_w и реактивную составляющую U_B . Если длительность и фаза замыкания контактов выпрямителя установлены таким образом, они замыкаются в момент t_0 и размыкаются в момент t_3 на прибор будут действовать заштрихованные площади реактивной составляющей напряжения U_B , среднее арифметическое значение которых равно нулю. Таким образом, показания прибора не будут зависеть от реактивной составляющей, и он покажет полное значение активной составляющей напряжения U_w . Для правильной установки фазы контактов прибор при положении переключателя устанавливается на нуль поворотом корпуса выпрямителя, т. е. он устанавливается на моменты включения и выключения t_1 и t_2 (рис. 1). Затем переключатель переводится в положение 2 и корпус выпрямителя по имеющейся на нем шкале, поворачивается на 90° из этого «нулевого» положения.

Для измерения потерь в листах стали описанная схема несколько видоизменена; вместо активного сопротивления применяется взаимная индуктивность M (рис. 2). Испытуемый лист стали вставляется в специальную стойку и при этом охватывается двумя обмотками — намагнивающей w_1 и измерительной w_2 . Напряжение последней

$$U = w_2 S \frac{dB}{dt},$$

где S — сечение листа. Среднее значение этого напряжения, измеряемое магнитоэлектрическим прибором в переключателе в положении 1, будет:

$$U_m = \frac{r_0}{\Sigma r} \int_{\varphi}^{\varphi+180} w_2 S \frac{dB}{dt} dt = \frac{r_0}{\Sigma r} w_2 S (B_{\varphi+180} - B_{\varphi}) = 2 \frac{r_0}{\Sigma r} w_2 S B_{\varphi},$$

где r_0 — сопротивление прибора; Σr — сумма сопротивлений цепи; $B_{\varphi} = -B_{(\varphi+180)}$ — мгновенные значения индукции в момент замыкания контактов выпрямителя φ в момент размыкания ($\varphi + 180$).

Если перевести переключатель в положение 2, то можно измерить ток в катушке w_1 . Вторичное напряжение на взаимной индуктивности

$$U = M \frac{di}{dt}$$

Его среднее значение

$$U_m = \frac{r_0}{\Sigma r} \int_{\varphi}^{\varphi+180} M \frac{di}{dt} dt = M \frac{r_0}{\Sigma r} (i_{\varphi+180} - i_{\varphi}) = 2M \frac{r_0}{\Sigma r} i_{\varphi}$$

Зная число витков w_1 и длину силовых линий l , можно, исходя из i_{φ} , определить соответствующее значение H_{φ} .

Таким образом, схема рис. 2 позволяет путем последовательных измерений с изменением угла φ (поворачивание корпуса выпрямителя) получить кривую изменения во времени индукции B и напряженности поля H , т. е. позволяет построить петлю гистерезиса для данного листа стали. При не слишком высоких значениях индукции, ширины петли, т. е. удвоенное значение коэрцитивной силы H_0 , является при данном значении B_{max} довольно точной мерой ее площади и, тем самым, — потерь в стали. Следовательно, если при положении переключателя 1 установить фазу замыкания контактов на значение $B=0$, т. е. на показание прибора $\alpha=0$, то после установки переключателя в положение 2 прибор непосредственно покажет значение коэрцитивной силы H_0 , или потерю в листе стали. Прибор можно непосредственно проградуировать в $вт/кг$.

Ввиду того, что в данном методе не применяется замкнутая магнитная цепь (силовые линии замыкаются через воздух), длину силовых линий l нельзя точно определить. Кроме того, индукция распределяется в листе неравномерно, уменьшаясь к его краям. Поэтому градуировку прибора необходимо производить путем сравнительных измерений. Для этого сначала производится измерение потерь в листах с помощью описанного устройства, затем эти листы разрезаются и исследуются в аппарате Эпштейна. (Путем изменения добавочного сопротивления r (рис. 2) обеспечиваются совпадения результатов измерений по обоим методам. Погрешность измерений удельных потерь предлагаемым методом составляет примерно 1%.

Данный метод измерения потерь в стали имеет ряд преимуществ перед аппаратом Эпштейна: ускоряется процесс измерения, устраняется непроизводительный расход стали, создается возможность рассортировать по удельным потерям большую партию стали и отобрать из нее листы минимальными потерями и др. Благодаря этому данный метод может в ряде случаев явиться полезным дополнением к применяемому в настоящее время стандартизованному методу определения удельных потерь электротехнической стали. По требующемуся оборудованию описанный метод применим не только в лабораторных, но и в производственных условиях.

(Е. и. М. № 2, стр. 27 и № 9, стр. 225, 1951. Ф. Koppelmann)

Инж. А. Г. КРАЙЗ

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛЬАЛЮМИНИЕВЫХ КОНТАКТНЫХ ПРОВОДОВ В ПОЛЬШЕ

Еще в 1949 г. электротехническими и металлургическими исследовательскими организациями в Польше был поставлен вопрос о возможности замены в тяговых сетях для материала менее дефицитным и отечественного производства. После подробной сравнительной оценки различных заменителей меди выбор остановился на сталь-алюминиевом проводе, состоящем из алюминиевой части и сваренной на стальной сердечник, обладающий высокой механической прочностью.

Такой провод обладает следующими преимуществами. На 1 км однопутной трамвайной линии требуется около 710 кг меди, при использовании же сталь-алюминие-

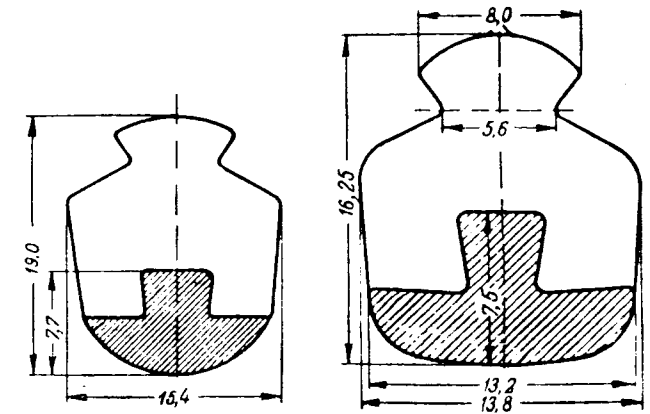


Рис. 1.

Рис. 2.

вого провода потребуется только около 320 кг алюминия, что даст примерно 55% экономии цветных металлов.

В сталь-алюминиевом проводе истирается только стальная часть, поэтому после износа провода можно почти полностью использовать вторично весь алюминий.

Для эксплуатационной проверки на польских заводах были изготовлены опытные образцы сталь-алюминиевого контактного провода длиной около 4,5 км. Кроме того, в распоряжении трамвайно-троллейбусных предприятий было некоторое количество сталь-алюминиевого провода немецкого производства.

Профиль и характеристики одного из типов немецкого провода представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики сталь-алюминиевого провода из г. Гожув

Показатель	Стальная часть	Алюминиевая часть	Провод в целом
Сечение, мм ²	60	163	223
Вес, кг/м	0,47	0,40	0,87
Разрушающая нагрузка, кг	2 880	—	4 300
Предел прочности, кг/мм ²	47	10	19,5
Удлинение, %	14	12,5	—
Твердость, кг/мм ²	135—165	27—31	—
Сопротивление, ом/м	—	—	~172·10 ⁻⁶

В период с середины 1949 г. до начала 1950 г. с этим проводом, демонтированным с троллейбусной сети в г. Гожув, были смонтированы опытные участки на трамвайной линии Рокитница — Столяжовицы и две трамвайные линии в Гожуве. Кроме того, под наблюдение была взята восстановленная в 1949 г. троллейбусная линия в Легнице длиной около 4 км.

На опытных участках контактной сети, где поставлен демонтированный провод, последний не был полностью выправлен, контактная поверхность его была покрыта ржавчиной, наблюдались выкручивания. Троллейбусная сеть в Легнице смонтирована неудовлетворительно, мало натяжение провода, провод местами погнут и выкручен. Вследствие этих причин износ провода получился относительно большим, причем в основном он вызван удалением слоя ржавчины.

Более интересны данные эксплуатации провода отечественного производства. Профиль этого провода марки Т-80/173 представлен на рис. 2, характеристики — сведены в табл. 2.

Во второй половине 1950 г. этим проводом были оборудованы три опытных участка: трамвайная линия Рокитница — Столяжовицы длиной 1 200 м, троллейбусная линия в Гдыне (участок с сильными ветрами) длиной 700 м (отрицательный провод) и троллейбусная линия в Варшаве длиной 500 м (длина проводов 1 000 м).

Монтаж провода был очень труден. Барабаны имели малый диаметр (90 см), что при раскатке вызвало обра-

Таблица 2

Характеристики стальнойюминиевого контактного провода Т-80/173

Показатель	Стальная часть	Алюминиевая часть	Провод в целом
Сечение, мм ²	54	114*	168*
Вес, кг/м	0,424	0,304—0,309	0,73*
Предел прочности, кг/мм ²	42	12,5	22 Около
Коэффициент линейного расширения, 1/°С	11—12·10 ⁻⁶	23·10 ⁻⁶	16,15·10 ⁻⁶
Твердость, кг/мм ²	122—123	34,3	—
Проводимость, м/ом, мм ²	7,5	34,7	26
Сопротивление, ом/м	2 450·10 ⁻⁶	253·10 ⁻⁶	229·10 ⁻⁶

* Средние цифры.

зование многочисленных перегибов и перекручиваний провода. Полное устранение всех недостатков монтажа, вследствие большой жесткости провода Т—80/173, сделать оказалось невозможным. В процессе монтажа имели место разрывы провода по местам заводской спайки стальной части. Стыкование оборвавшихся концов, а также соединение с медным проводом, производилось или нормальными латунными клиновыми зажимами (впоследствии во избежание электролитической коррозии замененными стальными) или стальными шестигранными зажимами троллейбусного типа, с введением концов проводов в паз зажима.

Система подвески в Варшаве и Гдыне на прямых — эластичная, на кривых — жесткая; арматура — стальная. На трамвайной сети Рокитница — Столяжовицы на кривых установлены специальные провододержатели, однако они недостаточно предохраняют провод от перекручивания при малых радиусах кривой и алюминиевая часть провода в этих местах подвергается истиранию.

Стоимость монтажа оказалась приблизительно на 100% выше стоимости монтажа при медном проводе.

На трамвайной линии Рокитница — Столяжовицы применяются угольные вставки и провод регулярно смазывается специальной графитовой смазкой. В Гдыне применяются чугунные вставки и провод смазывается смесью тавота с графитом. В Варшаве вначале около месяца эксплуатировались угольные вставки, затем вследствие малой механической прочности они были заменены стальными. Смазывание провода не применялось.

На первых двух участках износ провода после первого периода эксплуатации оказался неизмеримо малым, так как было невелико количество проходов токоприемника. Состояние провода хорошее. Контактная поверхность притерлась. В период после монтажа до начала нормальной эксплуатации наблюдалась коррозия стальной части, одна-

ко в процессе эксплуатации она исчезла. В Гдыне, вблизи моря, коррозии не наблюдается.

Износ стальнойюминиевого провода на опытных участках в Варшаве после 35 000 проходов токоприемника оказался приблизительно в 10 раз меньше медного провода работающего в тех же условиях. Износ медного провода чрезмерно высок на участке за стальнойюминиевым проводом. Здесь он почти в 2 раза больше, чем на участке перед этим проводом. Объясняется это применением стальных вставок без какой-либо смазки. В начальный период при эксплуатации, главным образом угольных вставок износ медного провода был значительно меньше.

Вследствие несовершенства конструкции головки токоприемника, алюминиевая часть провода подвергается в некотором истиранию. В нескольких точках замечено ее сильное оплавление. Вероятная причина этого — сход тока при эксплуатации, главным образом угольных вставок и неумелая его установка обратно.

Примененные зажимы соединяют только алюминиевые части отдельных проводов. Вследствие значительного напряжения в этих местах наблюдается сдвиг алюминиевой части относительно стальной (в среднем около 5 мм). Следует изменить конструкцию зажима, чтобы обеспечить надежность соединения.

Коррозии провода не наблюдается. Стальная часть в период между монтажом и сдачей провода в эксплуатацию заржавела, однако с течением времени ржавчина стерлась.

На основании опыта монтажа и первого периода эксплуатации стальнойюминиевого контактного провода автор делает следующие выводы.

1. Монтаж провода труднее и дороже, чем провода медного.

2. Работает провод при правильном монтаже и на лежащей эксплуатации — очень хорошо: искрение невелико, коррозия отсутствует, износ незначителен.

3. Эксплуатация провода труднее, нежели провода медного, особенно в начальный период. Стальнойюминиевый провод требует частого осмотра и немедленного устранения повреждений.

4. При производстве следует обращать особое внимание на точность напрессовки обеих частей провода и при сварке отрезков провода обеспечивать прочное стыка не меньшую, чем в целом месте. Провод должен правильно наматываться на барабаны, причем диаметр последних не должен быть менее 1,5 м.

5. Стальнойюминиевый подвоя может в тяговых сетях полностью заменить медный. Достоинствами его являются высокая механическая прочность, теплоустойчивость, высокая износоустойчивость. При допущении максимальной износа провода в 25% его номинального сечения, что для провода Т-80/173 при натяжении 1 000 кг дает двухкратный запас прочности, можно обеспечить, согласно данным опытов в Варшаве минимум 1 500 000 проходов токоприемника до смены провода, т. е. значительно больше, чем при медном проводе.

Przegląd Komunikacyjny, № 6, 7. 1951. Jerzy Ostaszewicz)

Инж. Л. А. ВИСЛОВ

Хроника

Присуждение первой премии имени П. Н. Яблочкова

21 декабря 1951 г. Президиум Академии наук СССР вынес постановление о присуждении премии имени П. Н. Яблочкова 1951 года в размере 20 000 рублей кандидату технических наук Валентину Андреевичу Веникову

за работу «Применение теории подобия и физического моделирования в электротехнике»¹.

¹ Рецензию о книге В. А. Веникова под этим названием см. «Электричество», № 3, 1951, стр. 92.

Профессор А. А. Глазунов

К 60-летию со дня рождения и 30-летию научно-педагогической, инженерной и общественной деятельности

Лауреат Сталинской премии, заслуженный деятель науки и техники, доктор технических наук, профессор Александр Александрович Глазунов—один из лучших преподавателей Московского технического института им. Молотова. Пять лет Александр Александрович в научно-педагогическую, инженерную и общественную работу, являясь одним из крупных ученых нашей страны в области электроэнергетики. Имя А. А. Глазунова тесно связано со всеми этапами развития советской электроэнергетики: он принимал участие в создании и в осуществлении плана ЕЛРО; им создан ряд основных курсов в области электрических станций и сетей; составлен ряд образцовых учебников, являющихся одновременно наглядными книгами инженеров-производственников. В статьях и монографиях А. А. Глазунова нашли отражение актуальные темы, связанные со строительством электростанций и сетей.



Александр Александрович родился в 1891 г.; в 1908 г. после окончания реального училища он поступил в МВТУ, которое окончил в 1917 г. Педагогическую деятельность Александр Александрович начал в 1920 г. в Московском высшем техническом училище, где принимал активное участие в создании Электротехнического факультета. Одновременно он вел большую производственную работу, руководя электротехническим отделом «Энергостроя», в котором в то время создавались проекты новых советских электростанций.

В 1930 г. после преобразования Электротехнического факультета МВТУ в Московский энергетический институт А. А. Глазунов перешел на работу в МЭИ, в котором активно участвовал в организации научно-педагогической и учебной работы. Являясь с 1928 г. заведующим кафедрой «Электрические сети», он перестроил отдельные небольшие и мало связанные между собой курсы этой специальности в единый стройный курс «Электрические сети и системы». Создание новой дисциплины сопровождалось крупнейшими научными исследованиями мало разработанных в то время вопросов по теории расчетов механической и электрической части электросетей и систем. Результаты этих работ опубликованы в статьях и монографиях и получили широкую известность. Большими тиражами издались книги «Линии электропередач» (1928 г.), «Расчет механической части воздушных линий сильного тока» (1934 г.), «Сети электрических систем» (1939 г. и 1947 г.), «Электрическая часть станций и подстанций» (1938 г. и 1951 г.), «Расчет замкнутых городских сетей» (1937 г.), «Расчет электрических сетей энергетических систем» (1935 г.).

С 1938 г. А. А. Глазунов перешел на кафедру «Электрические станции», которой он руководил на протяжении 12 лет. Здесь им были созданы основные курсы, написаны учебники, организованы уникальные лаборатории. Под руководством Александра Александровича и по его инициативе создана электрическая часть учебной тэц МЭИ, являющаяся первой установкой такого рода.

Возвратившись в 1950 г. к заведыванию кафедрой «Электрические сети и системы», А. А. Глазунов развил вопросы передачи энергии на большие расстояния. Одновременно он занимается вопросами рационального проектирования городских сетей, имеющими в настоящее время большое практическое значение. Активное участие принимает профессор Глазунов в научно-исследовательских и экспертных работах, относящихся к великим сталинским стройкам (экспертиза в Министрстве электростанций СССР, консультация в проектных организациях, публичные доклады и т. д.).

В течение ряда лет (с 1935 г. по 1947 г.) Александр Александрович Глазунов являлся деканом Электроэнергетического факультета МЭИ, для которого под его руководством был разработан учебный план, предусматривающий не только теоретическую, но и широкую инженерную подготовку молодых специалистов.

Профессор Глазунов принимает активное участие в общественной жизни, являясь членом ряда комиссий, докладчиком в различных организациях. Он руководит секцией электроэнергетики НТО МЭИ и в течение ряда лет принимает участие в деятельности старейшего отечественного электротехнического журнала «Электричество», являясь членом редколлегии, рецензентом и автором журнала.

О значении деятельности Александра Александровича Глазунова можно судить по тому, как высоко оценило ее наше правительство, поручая А. А. Глазунову представлять СССР в научных международных конференциях по электрическим сетям и системам. А. А. Глазунову присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники; за многолетние выдающиеся работы в области науки и техники А. А. Глазунов удостоен в 1943 г. Сталинской премии; правительство наградило его орденом Ленина, орденом Трудового Красного Знамени, орденом «Знак почта» и медалями.

Научная эрудиция, громадная трудоспособность, страстность в работе, строгая принципиальность и простое товарищеское обращение с сотрудниками заслуженно создали Александру Александровичу огромный авторитет и любовь.

М. Г. Чалкин, А. С. Сукомел, И. И. Соловьев, Л. И. Сиротинский, Л. Д. Белькинд, А. М. Федосеев, П. Г. Грудичский, С. А. Ульянов, В. А. Веников, Б. П. Медведев, Л. А. Солдаткина, А. А. Васильев, Г. М. Розанов, Н. Д. Анисимова

Редакционная коллегия журнала «Электричество» горячо поздравляет члена редколлегии журнала профессора А. А. Глазунова с юбилеем и желает ему на многие годы здоровья для дальнейшего творческого служения энергетике нашей великой социалистической Родины.

Г. Н. Петров, М. А. Шателен, М. П. Костенко, Ю. В. Буткевич, И. А. Сыромятников, Н. А. Сазонов



Профессор Н. Н. Щедрин

К 60-летию со дня рождения и 30-летию научно-педагогической деятельности

Николай Николаевич Щедрин родился 4 октября 1891 г. в городе Порхове. Высшее образование он получил в Ленинградском политехническом институте.

Окончив в 1922 г. институт, Н. Н. Щедрин приступил к научно-педагогической работе, не порывая в то же время связи с практической инженерной деятельностью, которую он начал ранее. С 1927 до 1934 г. он работал в системе Объединения электрических станций Ленинграда, выполняя большей частью работы исследовательского и расчетного характера.

Научно-педагогическая деятельность проф. Щедрина связана главным образом с Ленинградским политехническим институтом, куда он был приглашен в 1924 г. в качестве ассистента кафедры общей электротехники. С 1930 до 1940 г. Н. Н. Щедрин выполнял должность доцента в ряде отраслевых вузов, вышедших из ЛПИ. В 1940 г. Н. Н. Щедрин защитил диссертацию и был утвержден в ученой степени доктора технических наук и в звании профессора по кафедре электрических станций.

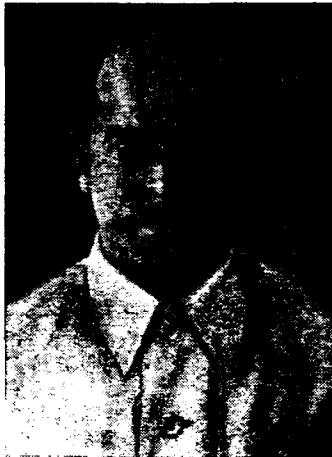
Н. Н. Щедриным написано более 30 научно-технических работ, посвященных актуальным проблемам современной электроэнергетики (исследованию переходных процессов в электрических системах и др.). Большое количество работ Николая Николаевича посвящено расчетам токов короткого замыкания. Его монография «Токи короткого замыкания высоковольтных сетей», изданная в 1935 г., до сих пор остается настольной книгой инженеров и исследователей. Многие плодотворные идеи Николая Николаевича в этой области опередили зарубежную мысль. Работы Н. Н. Щедрина дали приоритет отечественной науке в таких вопросах, как методика анализа двойных коротких замыканий, учет поведения нагрузок при коротких замыканиях, анализ поведения дистанционной защиты при переходных процессах и др.

В работах, посвященных исследованию переходных процессов в цепях, содержащих электрические машины и последовательно включенную емкость, Н. Н. Щедрин дал глубокий теоретический анализ вопросов, приобретающих сейчас огромное практическое значение в связи с передачей энергии на большие расстояния.

Н. Н. Щедрин является одним из пионеров научной разработки проблемы параллельной работы электрических систем, рассматриваемых им впервые, как единая динамическая система, устойчивость которой может быть исследована на базе классического наследия выдающегося русского ученого А. М. Ляпунова.

Работы Н. Н. Щедрина в последнее время посвящены вопросам передачи электроэнергии постоянным током.

Н. Н. Щедрин является инициатором и участником разработки первой в СССР установки для моделирования переходных процессов в электрических сетях с применением серьезных возбудителей. Николай Николаевич



принимал участие в разработке вопросов устойчивости и схем приема энергии в составлении проекта Куйбышевской (1939 г.), участвовал в то время в Правительственной комиссии по оценке проекта передачи энергии этой ГЭС и был председателем секции, рассматривавшей проблему устойчивости.

Н. Н. Щедрин является членом постоянной комиссии по токам короткого замыкания при МЭС СССР, членом миссии Отделения технических наук Академии наук СССР по передаче электроэнергии на большие расстояния, членом ученого совета Научно-исследовательского института постоянного тока.

Крупные заслуги имеет Николай Николаевич как педагог высшей школы. Его лекции отличаются оригинальностью и неизменно возбуждают интерес у слушателей. В течение многих лет Николай Николаевич читал цикл лекций «Всесоюзных курсах по повышению квали-

фикации инженерно-технических работников в Ленинграде».

Николай Николаевич Щедрин неоднократно удостоивался избрания на общегосударственные посты. Он был депутатом Петроградского районного совета города Ленинграда.

В 1943—1944 гг. Н. Н. Щедрин работал в Ташкенте в составе филиала ЛПИ и вел интенсивную научно-исследовательскую работу в Энергетическом институте Узбекского филиала Академии наук СССР.

В 1947 г. Н. Н. Щедрин возглавлял кафедру электрических станций Средне-Азиатского политехнического института и одновременно был избран членом-корр. Академии наук УзССР. Под его руководством в Энергетическом институте Академии наук УзССР получили развитие исследования по передаче электрической энергии на большие расстояния постоянным и переменным токами.

Н. Н. Щедриным в короткое время создан в Узбекстане растущий научный коллектив. Много сил и энергии он отдает подготовке научных кадров.

За научную и творческую деятельность в Узбекской ССР Н. Н. Щедрину присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники УзССР; дважды он награжден почетной грамотой Верховного Совета УзССР.

Вся деятельность Николая Николаевича Щедрина направлена на развитие отечественной энергетики и воспитание научно-технических кадров. 60-летие Н. Н. Щедрина застаёт его в рядах передовых советских ученых — полного творческих замыслов и отдающего весь свой опыт и знания на благо нашей великой Родины.

*А. А. Горев, В. А. Толвинский, М. А. Шателен,
Р. А. Алимов, Н. И. Топерверх, Х. Ф. Фазылов,
Г. Р. Рахимов, М. Е. Сыркин, Б. И. Шабдаш*



Памяти В. М. Хрущова

К 10-летию со дня смерти

19 декабря 1951 г. исполнилось 10 лет со дня смерти крупного советского электрика, действительного члена Академии наук Украинской ССР — Василия Михайловича Хрущова.

В. М. Хрущов родился 15 мая 1882 г. После окончания Томского технологического института В. М. Хрущов был назначен при институте ассистентом электрической лаборатории. В 1915 г. защитил диссертацию на право занятия кафедры и в 1923 г. был избран профессором в Харьковский технологический институт (затем Харьковский электротехнический институт).

В 1933 г. Василий Михайлович получил звание заслуженного профессора, в 1937 г. был утвержден в ученой степени доктора технических наук, а в 1939 г. избран действительным членом Академии наук УССР и возглавил созданный по его инициативе Институт энергетики Академии наук УССР, разделенный в 1947 г. на существующие ныне институты электротехники и теплоэнергетики.

Много сил и энергии В. М. Хрущов посвятил научным исследованиям. За 33 года научной и педагогической деятельности им опубликовано 5 печатных трудов, из них 70 написаны после Октябрьской революции.

Василий Михайлович понял величие разработанного первые годы существования советского государства план ГОЭЛРО и направил свою творческую мысль на разработку одной из важнейших задач, связанных с реализацией ГОЭЛРО, — на разработку комплекса вопросов, относящихся к электрическим сетям. В. М. Хрущов был автором постановки и исследования многих основных вопросов электрических сетей.

В 1917 г. в журнале «Электричество» появилась первая работа Василия Михайловича, посвященная изложению нового оригинального метода расчета городских электрических сетей — метода уравнивательных токов.

К достоинствам работ В. М. Хрущова относятся главным образом разработка им метода расчета, учитывающая не только технические, но и экономические показатели — стоимость сооружения и стоимость эксплуатации.

Работы В. М. Хрущова в области городских электрических сетей развивались в применении к районным электрическим сетям. Он предложил метод расчета районных сетей, рекомендованный в действующих руководящих указаниях Министерства электростанций (метод уравнивательных мощностей применим для сетей любой сложности по конфигурации и при нескольких напряжениях в сети). Следует еще упомянуть о большом и весьма интересном анализе, который В. М. Хрущов провел для установления наиболее выгодного напряжения в низковольтных распределительных городских сетях. Данные Василием Михайловичем конкретные обоснования наиболее выгодного напряжения представляли значительный практический интерес. Изложенная им методика и постановка вопроса имели глубокий смысл. Не удивительно поэтому, что по предложению им пути пошли и другие советские исследова-



тели при решении иных аналогичных вопросов. Примером может служить развернувшаяся в 1947—1949 гг. на страницах журнала «Электричество» дискуссия о расходе цветного металла в энергетике СССР.

Не ограничиваясь электрическими сетями, Василий Михайлович разработал оригинальный метод расчета сверхтоков — метод спрямленной внешней характеристики, основанный на использовании генератора. Ряд работ В. М. Хрущова в этой области опубликован в журнале «Электричество».

Занимаясь вопросами передачи больших мощностей на большие расстояния, Василий Михайлович уже в 1935—1936 гг. правильно оценивал перспективы применения постоянного тока для таких передач и разрабатывал для этой цели дуговой выпрямитель высокого напряжения; им была развита теория дугового выпрямителя и создан экспериментальный образец, на котором был проведен ряд исследований.

В. М. Хрущов работал также над новым типом механического выпрямителя (при напряжении 20—400 в и токах 15...10 000 а). Одновременно он разрабатывал оригинальную схему компаундирования синхронных генераторов с теплозависимым сопротивлением в качестве нелинейного элемента. Преждевременная смерть Василия Михайловича помешала ему довести до практического применения все эти работы; в настоящее время его ученики успешно осуществляют эту задачу.

Большую научную деятельность В. М. Хрущов успешно совмещал с педагогической и общественной деятельностью. В годы формирования советских высших технических учебных заведений В. М. Хрущов сыграл большую роль в создании молодой советской высшей школы на Украине. Руководя много лет кафедрой «Передача электрической энергии» в Харьковском электротехническом институте и будучи значительное время заместителем директора института по учебной и научной работе, Василий Михайлович воспитал сотни советских специалистов, им были подготовлены и читались многие учебные курсы в ХЭТИ, в частности курс «Переходные явления в электрических цепях», ставший затем обязательной дисциплиной в специальных электротехнических вузах.

Учебники и монографии В. М. Хрущова неоднократно переиздавались.

Большое участие Василий Михайлович принимал в пропаганде новых передовых знаний, выступал с докладами, консультациями для инженерной общественности.

В. М. Хрущов был депутатом Киевского областного совета трудящихся, членом ВКП(б).

В памяти всех, кто знал Василия Михайловича, сохранился его образ — советского ученого, активного участника социалистического строительства великой Родины.

Директор Института электротехники Академии наук УССР, действительный член АН УССР
С. А. ЛЕБЕДЕВ



В доме инженера и техника им. Дзержинского

На расширенном заседании подсекции диэлектрического нагрева ВНИТОЭ в июне 1950 г. состоялась обсуждение статьи В. В. Устинова и М. Г. Когана «Высокочастотная установка с колебательным контуром полого типа», опубликованной в журнале *Электричество*, № 7, 1950 г. В заседании приняло участие около 100 специалистов—представителей промышленных предприятий, научно-исследовательских учреждений и высших технических учебных заведений.

С докладом, развивающим положения опубликованной статьи, выступил инж. В. В. Устинов, сообщивший, что для целей нагрева диэлектриков построено несколько установок, в основу конструирования которых был положен торроидальный эндовибратор (полый контур). В целях удобства конструктивного оформления генератора было осуществлено заземление анодов ламп. Вследствие этого особое внимание было уделено созданию трансформатора накала, находящегося под высоким напряжением относительно земли. Наиболее удачным оказался трансформатор с применением электромагнитного экрана для высокочастотного поля и емкостной блокировкой вторичной обмотки, в качестве изоляции которого был применен высокочастотный фарфор. Установки работали на частотах 60, 50, 35 мГц; использовались лампы типа Г-880, Г-889, а также Г-450. Элементами настройки в первой из установок служили плунжеры, а в последней конструкции—поршневые кольца и катодные дроссели. Эти устройства позволяли менять частоту в пределах до 10%. Такая подстройка требовалась при загрузке конденсатора материалом. Применение данного метода нагрева дает значительный практический эффект. Время нагрева материала сокращается в 15—20 раз; обеспечивается высокое качество продукции.

Выступивший затем доктор техн. наук Г. И. Бабаев остановился на некоторых вопросах, которые следует иметь в виду при конструировании подобных установок для нагрева. Важным является выбор наиболее выгодных конструктивных соотношений, обеспечивающих получение

наилучших результатов при наименьших габаритах установки и наименьшей затрате металла. Для того чтобы правильно решить эту задачу, следует правильно выбрать геометрические размеры колебательного контура. Как известно, колебательный контур характеризуется резонансной частотой, добротностью и эквивалентным сопротивлением. При правильном конструировании установки следует выбирать конструкцию, при которой эквивалентное сопротивление будет наибольшим. Если за основу конструкции взять два коаксиальных цилиндра, то оказывается, что наибольшее эквивалентное сопротивление будет иметь место при отношении наружного диаметра к внутреннему $\frac{R}{r} = 9$. Другим вопросом, важным при конструировании

установок высокой частоты, является вопрос о применении нескольких ламп. Известно, что колебательный контур имеет не одну резонансную частоту. При малом отношении $\frac{l}{\lambda}$ различные резонансные частоты значительно от-

носятся друг от друга. При приближении отношения

к 1 резонансные частоты оказываются весьма близкими по величине. Поэтому в многорезонанторных системах (например, в магнитроне) применяются специальные приспособления (кольца связи). Таким образом, не следует применять несколько ламп в установках и высокочастотного нагрева. Наконец, заслуживает внимания вопрос о термической и электрической неустойчивости. Как показывает опыт, при нагреве тепловой пробой материала происходит в ряде случаев раньше, чем пробой воздушного зазора.

На совещании прошла оживленная дискуссия, в результате которой работа, выполненная подсекцией диэлектрического нагрева, была одобрена.

Кандидат техн. наук И. Г. ДЕМИДОВ



Библиография

В. Г. ХОЛМСКИЙ. ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ.

152 стр., ц. 7 руб. Госэнергоиздат, 1950.

Рецензируемая книга посвящена достаточно актуальному и сравнительно слабо освещенному в существующей литературе вопросу, и поэтому заслуживает большого внимания.

Книга в большей своей части является обобщением ранее опубликованных оригинальных работ самого автора и содержит, кроме введения, семь глав: 1. Принципы устройства трансформаторов для регулирования напряжения в электрических сетях. 2. Применение регулируемых трансформаторов в разомкнутых сетях высокого напряжения. 3. Применение регулируемых трансформаторов в городских и сельскохозяйственных сетях. 4. Применение регулируемых трансформаторов для связи систем. 5. Естественное распределение мощности в замкнутых сетях и влияние на него бустеров. 6. Экономическое распределение мощностей в замкнутых сетях одного напряжения и его создание с помощью бустеров. 7. Экономическое распределение мощностей в замкнутой сети с ветвями двух напряжений.

Начиная с технико-экономической постановки задачи (во введении) и описания конструктивного выполнения

выпускаемых регулирующих устройств (в главе 1), автор далее подробно рассматривает различные случаи применения регулируемых трансформаторов в электрических сетях и излагает рекомендуемую методику выполнения соответствующих практических расчетов.

Книга написана сравнительно просто и снабжена достаточным количеством наглядных числовых примеров и поэтому является легко применимой для практических целей при инженерном проектировании электрических сетей.

Автор книги отходит от устаревших традиций, согласно которым сети разных напряжений рассматривались ранее независимо одна от другой и рассчитывались по отдельным нормированным величинам потерь напряжения. Исходя из общего технико-экономического принципа, автор дает более совершенное с точки зрения народнохозяйственной экономики решение задачи проектирования электрических сетей различных типов.

Автор правильно указывает, что существующие нормы потерь напряжения экономически не обоснованы и взаимно не согласованы, а следовательно, могут приво-

ты к перерасходам цветного металла и средств, или неприемлемым значениям эксплуатационных напряжений сети. Предлагаемое в книге решение проблемы представляется принципиально правильным: только широкое внедрение новой техники — регулирующих устройств — позволит разрешить противоречие между требованиями повышения качества доставляемой потребителям электрической энергии и снижения стоимости ее передачи. Некоторое сомнение, однако, может вызвать правильность исходных технико-экономических предпосылок: автор применяет рекомендуемые величины экономических плотностей тока независимо от номинального напряжения сети и наличия тех или иных регулирующих устройств в сети.

Наиболее интересен материал, изложенный в главе 2, а также в отчасти в главе 4 книги. Здесь наглядно показаны технико-экономические преимущества применения регулируемых трансформаторов (т. е. устройств, регулирующих напряжение в сети), а также даны необходимые указания по выбору места установки и типа этих устройств по определению пределов регулирования.

Несколько менее удачным приходится считать материал, приведенный в трех последних главах книги (главы 6 и 7); этот материал имеет, правда, значительно менее широкое применение. Теоретический анализ проведен здесь в основном на примере простейшей одноконтурной схемы, без особого труда во многих случаях мог быть вынесен и в более общем виде. Многие рассуждения автораложены весьма упрощенно, с большими допущениями, так как наибольшая неоднородность скорее всего может встретиться в сетях, содержащих линии с номинальными напряжениями $220 \div 400$ кВ. Такие линии ранее рассмотрены автором в § IV, 1, однако, методика их исследования же в § VII, 3 последней главы 7, при анализе сетей, содержащих линии разных напряжений, принята резко отличная от методики, примененной в указанном выше § IV, 1 и вряд ли может быть рекомендована при наличии линий с номинальными напряжениями выше 110 кВ. Словяно, почему автор связал решение принципиальных вопросов с определенной методикой нахождения распределения нагрузок в замкнутых сетях (с помощью коэффициентов распределения), так как, по существу, эта методика может выбираться произвольно.

При исследовании аварийных режимов работы сетей предлагается считать нагрузки неизменными, несмотря на значительные изменения напряжений в отдельных местах (во многих случаях увеличенные в связи с наличием регулируемых устройств); в ряде мест книги, без особых оснований, с величинами мощностей допускаются операции, того говоря, справедливые лишь для токов и т. д. Впрочем, указанные недостатки скорее нужно отнести к деталям существующей общей теории электрических сетей.

Во многих местах книги обращает на себя внимание неудачная терминология. Термины «бустер», «сервисный» и т. д. в настоящее время не применяются; в книге нет единообразия в наименовании устройств, позволяющих производить сразу с продольным и поперечным регулированием (стр. 14, 104, 127); многие выражения являются неудачными, например: «передача момента нагрузки» (стр. 28, 30), «максимальный режим» и «минимальный режим» (пример в дальнейшем), «условия точки» (стр. 42), «соображения режима» (стр. 74), «множители потерь» (стр. 80) и т. д.

Ряд указаний автора в приведенном в книге виде вызывает недоуменные вопросы. Почему при рассмотрении вопросов экономического распределения нагрузок в электрических сетях номинальное напряжение мощных сетей реальных энергетических систем ограничено ступенью 10 кВ, когда строящиеся в СССР крупнейшие в мире гидроэлектрические станции, повидимому, будут присоединяться к существующим системам на более высоких напряжениях (стр. 4)? Об уменьшении каких токов короткого замыкания говорится на стр. 18—19 и почему это желательно только в ряде случаев? Почему в примере 2 (стр. 39) потеря напряжения в трансформаторе получилась такой большой (7,5%)? Почему в примере 10 (стр. 83) предполагается работающей при несколько пониженном эксплуатационном напряжении? Как можно при-

менить «практические выводы», приведенные на стр. 98? Что понимается под основными выражениями метода «преобразования сети» (стр. 100)? и т. д.

Целесообразно было бы во введении указать, что при выборе сечений проводов по экономической плотности тока в осветительных сетях потеря напряжения получается пропорциональной протяженности сети, от которой и зависит, следовательно, надобность в регулирующих устройствах и экономичность применения той или иной ступени напряжения. Не лишним здесь же было бы и указание о том, что применение регулируемых трансформаторов связано с дополнительными расходами металла и средств, что должно учитываться при решении практических задач. Полезно было бы дать оценку роли автоматического регулирования напряжения в электрических сетях. На стр. 26—27 стоило указать, что и при «нулевом положении» описанного устройства потери энергии в нем имеют место. В главе 2 следовало уделить еще большее внимание экономическому анализу преимуществ рекомендуемой методики проектирования электрических сетей — с широким применением регулирующих напряжение устройств, так как это в корне изменяет существующие привычные представления. Следовало более подробно остановиться и на применении каскадного соединения двух и более регулируемых трансформаторов (стр. 67, 76, 89), определив экономическую целесообразность такого решения в сравнении, например, с переходом на более высокую ступень напряжения и т. д.

Кое-где материал можно было изложить удачнее. Так, более целесообразно закрепление понятий начала и конца линии независимо от направления мощности (стр. 75) — при обычных условиях изменения, в случае надобности, знака у исходной величины мощности; количество применяемых формул сократилось бы при этом почти вдвое. Следовало избежать применения одинаковых обозначений для величин, выражаемых в именованных и в относительных единицах; принятые обозначения затрудняют пользование материалом (стр. 30 и далее). Название § III, 3 следовало изменить, направив мысль читателя на выбор наиболее рационального решения. Изменить нужно было и названия § IV, 1 и IV, 2, являющихся содержанием всей гл. 4, так как эти названия не соответствуют общему заголовку. В примере 6 стоило избежать записей вроде: $6 - 5 + 2 \leq 3$. Следовало согласовать обозначения на фиг. 37 и в последующем выводе (стр. 75 и далее). Обозначения, встречающиеся на фиг. 55 и 56, также надо было согласовать с указаниями текста (стр. 128). Лучше было бы сразу указать на незначительный экономический эффект, получаемый от перераспределения нагрузок в рассматриваемой сети в результате перестановки нерегулируемых ответвлений (стр. 130). Указание о коэффициенте ψ (стр. 148) следовало уточнить и т. д.

Можно было бы произвести и небольшие сокращения текста книги. Так, вряд ли необходимо было помещать формулы (II,12) и (II,13), не имеющие практического значения и выведенные приближенно, без учета поперечной составляющей падения напряжения (стр. 32). Лишнее место в книге занято элементарными рассуждениями, например, на стр. 95 и 100—101. Как правильно указано самим автором, продольная э. д. с. не дает требуемого результата в рассматриваемом в § V, 4 случае, а поэтому рассуждения, приведенные на стр. 111, следует считать излишними и т. д.

В книге встречаются опечатки и редакторские недочеты.

В целом книгу следует считать очень полезной и рекомендовать для изучения всем инженерам, занимающимся вопросами проектирования и эксплуатации электрических сетей.

Большинство перечисленных выше недостатков легко может быть устранено при повторном издании книги, каковое представляется вполне целесообразным.

Настоящая рецензия обсуждена на заседании кафедр электрических сетей и систем ВЭЭИ.

Кандидат техн. наук, доц. Н. А. МЕЛЬНИКОВ
Всесоюзный заочный энергетический институт



А. Я. ЛЕРНЕР и В. И. ФЕЙГИН. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ.

Под редакцией В. С. Кулебакина. 124 стр., Госэнергоиздат, 1951.

Рецензируемая книга написана по заказу общественного университета Всесоюзного совета научных и инженерно-технических обществ (ВСНИТО) и имеет своей целью ознакомить инженеров-электриков с современными системами автоматического управления электроприводами. В книге рассмотрены системы электромашиного управления электроприводами; системы, предусматривающие применение магнитных усилителей, электронное управление и, наконец, системы импульсного управления.

Как видно из перечня рассмотренных в книге вопросов, в ней сравнительно полно охвачены новейшие методы и средства автоматического управления приводами.

Книга написана с использованием современного материала, причем в ее основу положены труды отечественных ученых и инженеров, намного опередившие достижения зарубежной науки и техники в области автоматического управления и регулирования электроприводами.

В книге впервые публикуются полученные авторами результаты теоретических и экспериментальных исследований различных систем, и особенно систем импульсного управления электроприводами.

Основное внимание в книге уделено разъяснению физической сущности процессов, протекающих в системах автоматического управления, с чем можно вполне согласиться.

Книга написана простым и ясным языком и будет способствовать популяризации современных методов автоматического управления среди той части инженеров-электриков, которая впервые соприкасается с подобного рода вопросами. Вместе с тем книга не свободна от ряда недостатков.

Неправильно поступили авторы книги, исключив из нее рассмотрение наиболее распространенных в промышленности релейно-контакторных систем автоматического управления. Ссылка на то, что такие системы сравнительно полно изложены в отечественной литературе, неубедительна. Отсутствие описания этих систем в книге обедняет ее и лишает возможности читателей производить необходимые сопоставления. Совершенно не затронуты в книге вопросы динамики систем, тогда как изложение их даже в самом сжатом виде было бы весьма полезным. Не освещены такие вопросы, как управление реверсивными электроприводами, питаемыми от ртутных выпрямителей, и следящие системы. Свойства электропривода как объекта автоматического управления в книге также не рассмотрены.

Изложение разделов, касающихся вопросов автоматического управления посредством магнитных усилителей импульсного управления, дано чрезмерно кратко. Та же глава, посвященная применению магнитных усилителей в схемах управления электроприводами, сказано, что могут применяться «...для автоматического пуска и торможения, а также для регулирования скорости асинхронных двигателей» (стр. 75). Однако в дальнейшем о регулировании скорости этих двигателей больше ничего не говорится. Такие указания могут только ввести в заблуждение читателя, так как он не будет осведомлен о трудностях, с которыми сопряжен этот способ регулирования скорости промышленных приводов переменного тока, и при небольшом диапазоне регулирования. Подобного рода примеры можно было бы привести и в отношении систем импульсного управления.

Книга построена на основании классификации систем автоматического управления электроприводами по применяемым средствам (электромашиное управление, электронное и т. д.). Было бы значительно рациональнее построить книгу не по этому признаку, а по признаку функций системы (автоматическое регулирование скорости и т. д.). Эти недостатки следует учесть авторам в случае переиздания книги. В целом книгу следует считать полезной.

В заключение хочется отметить, что промышленные предприятия, научно-исследовательские и проектные организации, а также высшие технические учебные заведения ждут от ученых нашей страны создания такого труда, в котором был бы систематизирован и обобщен весь существующий опыт в области автоматического управления и регулирования электроприводами. До сих пор такого труда нет, а между тем нужда в нем огромна. Весьма сложные теоретические вопросы построения, анализа и расчета различных систем автоматического управления регулированием электроприводами решаются в настоящее время различными организациями по-разному, а именно и недостаточно квалифицированно. Инициативу по созданию такого труда, по нашему мнению, должен проявить Институт автоматизации и телемеханики Академии наук СССР, в задачи которого, в частности, входят подобного рода научные обобщения.

Кандидат техн. наук, доц. И. И. ПЕТРОВ,
Всесоюзный заочный энергетический институт



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(издания 1951 г.)

АНОТИРОВАННЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОЙ И КАБЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ. Январь—июль 1951 г. (104 названия). 19 стр., беспл. (Всесоюзный заочный энергетический институт, Кафедра электротехнических материалов и кабельной техники).

БАТУСОВ С. В., ГРИГОРЬЕВ С. Н., СИМОНОВ А. Ф., ШАДРИН И. А. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ЗНАКОВ РЕЧНОЙ СУДОХОДНОЙ ОБСТАНОВКИ. 112 стр., ц. 5 руб. 75 коп. Издательство Министерства речного флота СССР.

В ПОМОЩЬ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Аннотация научно-исследовательских работ 1950 г. (выпуск 3). 82 стр., беспл. (Московский энергетический институт. Отдел научно-исследовательских работ).

* ГОВОРКОВ В. А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ. Ц. 26 руб. 75 коп. Связьиздат.

ГОРЕЛИК А. Л. ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА. 383 стр., ц. 18 руб. 60 коп. Госэнергоиздат.

ГРАЧЕВ К. Я. ШЕЛОЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ. 102 стр., ц. 10 руб. 30 коп. Госэнергоиздат.

КРАТКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИИ. Под редакцией А. Я. Брейтбарта. Издательство «Советское радио».

* Звездочкой обозначены книги, по которым предполагается помещение рецензий.

ЛЕБЕДЕВ М. В. ГОРОДСКИЕ ТЕЛЕФОННЫЕ СЕТИ. Утверждено Главным управлением учебных заведений МХК РСФСР в качестве учебного пособия по техникуму электромонтеров. 224 стр., ц. 9 руб. Издательство МХК РСФСР.

МАЗЕЛ К. В. ВЫПРЯМИТЕЛИ И СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ. 122 стр., ц. 3 руб. 55 коп. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 111). Госэнергоиздат.

НЕЙМАН М. С. ТРИОДНЫЕ И ТЕТРОДНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ. 283 стр., ц. 15 руб. Издательство «Советское радио».

ОСНОВЫ ТЕХНИКИ САНТИМЕТРОВЫХ ВОЛН В РАДИОЛОКАЦИИ. Перевод под редакцией А. Я. Брейтбарта. 374 стр., ц. 16 руб. Издательство «Советское радио».

ПЕКАР С. И. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ КРИСТАЛЛОВ. 256 стр., ц. 10 руб. 50 коп. Гостехтеориздат.

РЕННЕ В. Т., КАРПОВА М. С., ПЕСКОВ Г. Д. БОРЫ ЗА СНИЖЕНИЕ БРАКА В ПРОИЗВОДСТВЕ БУМАЖНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ. (Из опыта сотрудничества деятелей науки и работников промышленности). 48 стр., ц. 1 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.

ФРОЛОВ А. Д. СПРАВОЧНИК КОНСТРУКТОРА РАДИОПРИЕМНЫХ ПРИБОРОВ. 424 стр., ц. 25 руб. 55 коп. Госэнергоиздат.

* ЭЛЕКТРОНИКА. Под общей редакцией А. А. Жигарев. 795 стр. + вкладка, ц. 41 руб. 20 коп. Госэнергоиздат.

