

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



1956

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

3

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Задачи электротехнической промышленности . . .</i>	1	ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
В. И. Архангельский — Новая схема регулирования нагрузки электропривода блуминга	5	Г. П. Хализев — Новая схема электропривода эскалаторов московского метрополитена	73
Е. Л. Эттингер и Ю. Р. Рейнгольд — Экспериментальное исследование динамических свойств электромашиного усилителя и определение его параметров	13	ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Н. Н. Кречетович — Электропривод с импульсным управлением скоростью асинхронного двигателя	23	Зарубежное силовое конденсаторостроение. Мощные полупроводниковые выпрямители. Выбор поврежденной фазы на линиях электропередач. Вышние гармонические в энергосистеме и их воздействие на работу электрооборудования. Десять лет польской энергетики	75
Н. И. Бачурин и Л. К. Грейнер — Трансформаторы тока на особо высокие напряжения	29	ХРОНИКА	
А. И. Коченова и А. А. Юдина — Трансформаторы тока на 400 кВ для линии электропередачи Куйбышев — Москва	38	В Научно-техническом обществе энергетической промышленности. Научно-техническое совещание по энергетическим маслам. Юбилейные дни МЭИ. Инженер Н. А. Тищенко. Диссертации ЛЭТИ	87
Ф. В. Безруков — Трубчатые разрядники типа РТВ	45	БИБЛИОГРАФИЯ	
А. Е. Каплянский — Трансформаторы напряжения и трансформаторы тока	49	С. М. Брагин — Книга Н. Н. Белоруссова и В. Н. Красоткина „Силовые кабели“	93
В. А. Сатаров — Расчет короткого замыкания при продольной несимметрии	54	Г. К. Цверева — Книга Г. Блашке „Защита электродвигателей“	94
Н. В. Паутин и А. Ф. Яковлев — Автоматизация регулирования частоты и активной мощности	58	Б. З. Зильберман — Книга А. А. Климова „Электрификация производственных процессов в животноводстве“	95
Е. Д. Сапир — Влияние емкостной проводимости линий на работу высокочастотной дифференциально-фазной защиты	65	Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96
А. К. Герцик, Е. В. Калинин, А. В. Корсунцев и С. Д. Мерхалев — Защитная арматура гирлянд изоляторов воздушных линий	69		

К ЧИТАТЕЛЯМ

В ближайшее время редакция журнала «Электричество» совместно с Московским областным правлением Научно-технического общества энергетической промышленности проведут в Москве КОНФЕРЕНЦИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ журнала «Электричество» для обсуждения Тематического плана журнала на 1956—1957 гг. и вопросов дальнейшего улучшения издания журнала «Электричество».

Весьма желательно, чтобы в первичных организациях НТОЭП в Москве и Московской области — на предприятиях, в проектных и научно-исследовательских организациях, в вузах и др. были предварительно рассмотрены вопросы, поставленные на обсуждение читательской конференции.

Читатели, имеющие замечания и предложения по журналу, могут сообщить их заблаговременно редакции (Москва, почтамт, почт. ящ. 648) или Московскому областному правлению НТОЭП (Москва, К-12, ул. 25 Октября, 19) для учета в докладе на конференции.

О времени и месте работы КОНФЕРЕНЦИИ ЧИТАТЕЛЕЙ будет сообщено дополнительно.

Редакция журнала «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»
Московское областное правление НТОЭП

Адрес редакции: Москва К-12, Б. Черкасский пер., д. № 2. Телеф. К 4-24-80.
Адрес для телеграмм: МОСКВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

Задачи электротехнической промышленности

XX съезд КПСС в Директивах по шестому пятилетнему плану наметил исторический путь дальнейшего развития всего народного хозяйства нашей Родины. Для разрешения поставленных съездом хозяйственных задач электротехническая промышленность должна удовлетворить разнообразнейшие запросы на электрооборудование. Электротехнической промышленности предстоит огромная работа по обеспечению электрических станций, угольной, нефтяной, химической промышленности, черной и цветной металлургии, электрифицируемого транспорта, машиностроения, сельского хозяйства и других отраслей народного хозяйства высококачественным, технически совершенным электрооборудованием.

В сравнении с выпуском за годы четвертой пятилетки за период пятой пятилетки выпуск продукции электротехнической промышленности увеличился на 162,5%. Выпуск генераторов для паровых турбин увеличился в 5,7 раза, крупных индивидуальных машин в 3,2 раза, силовых трансформаторов в 2,4 раза, измерительных приборов в 5,7 раза, реле в 3,2 раза. Значительно была расширена номенклатура электротехнических изделий. Резко были увеличены мощности генераторов, двигателей, электрической аппаратуры. Производительность труда в электротехнической промышленности возросла в 1955 г. против 1950 г. на 60,6%. Себестоимость продукции снижена за пятилетку на 34,5%.

Успехи в развитии отечественной электропромышленности к концу пятой пятилетки могли быть еще большими, если бы не недостатки производства, с которыми годами мирились и на предприятиях и в Министерстве электротехниче-

ской промышленности. Июльский Пленум ЦК КПСС вскрыл в промышленности ряд факторов, мешавших достижению ею высокого технического прогресса и современного уровня передовой техники.

Выпускавшееся электропромышленностью электрооборудование по номенклатуре, параметрам и качеству в ряде случаев не удовлетворяло значительно возросшие требования промышленности, энергетики и других отраслей народного хозяйства СССР. Это приводило к удорожанию электроустановок и к усложнению эксплуатации. Недооценка важности разработки новых машин и аппаратов, организации лабораторий, оснащенных передовым исследовательским оборудованием и новейшей измерительной аппаратурой, недооценка темпов развития конструкторских бюро приводили постепенно к качественному отставанию многих видов изделий электропромышленности от лучших образцов мировой техники.

Можно напомнить об отставании в конструировании турбогенераторов с водородным охлаждением (работа турбогенераторов с водородным охлаждением при 0,05 *ати* вместо 1—2 *ати* и т. д.), трансформаторов (трансформатор МТЗ 400 *кв*, 123,5 *мгва* весил 320 *т* и имел масла 94 *т*, а шведский трансформатор 115 *мгва* весил 188 *т* и имел масла 37 *т* и т. д.), высоковольтной аппаратуры (недостаточная отключающая способность выключателей, недооценка простых пружинных, пневматических и гидравлических приводов в баковых и малообъемных выключателях, отсутствие разъединителей, пригодных для отключения ненагруженных линий и трансформаторов, и т. д.), низковольтной аппаратуры, комплектных

устройств, в том числе для автоматизированного электропривода, кабелей, кабельной арматуры и пр.

Объем электротехнической продукции в 1960 г. должен превысить уровень 1955 г. примерно в 2,1 раза; в том числе объем производства генераторов к паровым, газовым и гидравлическим турбинам в 2,5 раза, электровозов в 3 раза, силовых трансформаторов в 2,2 раза, электропечей в 3,2 раза, тепловозного электрооборудования в 12 раз, крупных электрических машин в 2 раза, ртутных выпрямителей в 3 раза, электродвигателей переменного тока в 2 раза, щелочных аккумуляторов в 2,7 раза, кабельных изделий в 2 раза и электроизмерительных приборов в 3,6 раза.

Помимо роста объема производства, в годы шестой пятилетки значительно расширятся и обновятся номенклатура и технические параметры изделий. Для снижения капитальных затрат на сооружение новых электростанций, снижения себестоимости одного киловатт-часа и увеличения к. п. д. энергоустановок должны быть созданы новые генераторы для паровых турбин мощностью 200 и 300 тыс. кВт, генераторы для Братской и Красноярской гидроэлектростанций мощностью 250 ... 300 тыс. кВт и др. Охлаждение обмоток этих генераторов будет отличаться от применяемой ныне системы. Давление охлаждающего водорода для турбогенераторов значительно повысится; при этом будут изысканы новые конструктивные решения для уплотнения подшипников и вала с целью снижения потерь водорода. Найдет применение более надежный и рациональный способ возбуждения этих крупнейших генераторов. Над разработкой конструкций этих машин и нахождением решений многих задач, возникающих в связи с проектированием мощных машин, интенсивно занимаются конструкторы заводов «Электросила», Харьковского завода тепловозного электрооборудования (ХЭТЗ) и «Уралэлектрораппарата» совместно с научно-исследовательскими институтами Министерства электротехнической промышленности и других министерств.

В ближайшее время реализуется решение о применении в ряде случаев автотрансформаторов для сетей высокого напряжения. Автотрансформаторы для этой цели будут освоены промышленностью уже в текущем году мощностью до 80 тыс. кВА. Применение автотрансформаторной схемы позволит снизить до 25% расход материалов и уменьшить на 20% потери. Начата ра-

бота по проектированию новых серий силовых трансформаторов с целью снижения расхода материалов и уменьшения потерь. Действующий ГОСТ 1516-42, которым предусмотрены излишне высокие уровни испытательных напряжений для высоковольтных мощных трансформаторов и другого электрооборудования, работающего с заземленной нейтралью, должен быть пересмотрен. Это позволит отказаться от неоправданно повышенного расхода конструктивных материалов и масла. Следует отметить, что в ряде стран (США, Англия и др.) регламентированные испытательные напряжения промышленной частоты для трансформаторов и выключателей ниже, чем в СССР.

Номенклатура высоковольтных выключателей как по напряжениям и отключаемым мощностям, так и по исполнениям (воздушные, малообъемные масляные и баковые масляные) должна быть окончательно определена и подготовлена к выпуску. При этом не следует повторять всю номенклатуру по напряжениям и токам воздушных, малообъемных и баковых выключателей. Все виды последних должны быть испытаны и изучены в условиях Сибири до постройки больших электростанций на Востоке. В решении стоящих перед электропромышленностью задач в области высоковольтного оборудования должны также участвовать соответствующие научные коллективы высшей технической школы.

В различных областях народного хозяйства найдут широкое применение ртутные выпрямители. Так, для линий передачи постоянного тока высокого напряжения потребуются высоковольтные вентили; для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог, для метро, для зарядки аккумуляторных батарей и других целей необходимы запаянные ртутные выпрямители; для электролиза алюминия — ртутные выпрямители; для электропривода шахтного подъема, реверсивных прокатных станков и других механизмов — ртутные выпрямители с регулированием.

Для больших токов (до 20 000 а) и низкого напряжения, например для электролиза магния, электропромышленностью будут разработаны механические выпрямители. Совместно с Академией наук СССР и кафедрами вузов интенсифицируется разработка и освоение полупроводниковых выпрямителей на основе германия, кремния и др. В ВЭИ уже изготовлены полупромышленные образцы до 200 а и 50 в постоянного тока.

Для обеспечения намеченной XX съездом КПСС электрификации железнодорожного транс-

порта электропромышленность должна не только увеличить выпуск электровозов и электрооборудования для тепловозов, подстанций и других служб, а также кабелей для связи, но и создать новые типы магистральных электровозов на переменном токе промышленной частоты.

В значительной степени будет обновлена номенклатура электротехнических изделий общепромышленного применения. Взамен существующих нескольких серий электродвигателей и генераторов постоянного и переменного тока, устаревших по своим технико-экономическим показателям и имеющих при одинаковой мощности и скорости вращения несовпадающие монтажные характеристики, электротехнической промышленностью проектируются и будут выпускаться новые единые всесоюзные серии машин в значительной степени унифицированные. Машины новых единых серий будут иметь меньшие веса и габариты и более высокий к. п. д. Предусмотрены для общепромышленного применения разработка и выпуск новых единых серий магнитных пускателей, новой серии взрывобезопасных пускателей магнитных и ручных, серии универсальных автоматов, предохранителей, контакторов, рубильников и переключателей, штепсельных взрывобезопасных разъединителей, кнопок управления, реостатов возбуждения, реле времени, электромагнитных и тепловых комплектных устройств для автоматизированного электропривода и других аппаратов.

В шестом пятилетии предстоит преодолеть отставание (по техническому уровню, количеству и номенклатуре) в области низковольтной аппаратуры.

Поскольку область применения электроизделий, в частности низковольтных аппаратов, все время расширяется и принимает часто специфические конструктивные формы и назначение, входя органически в конструктивный узел неэлектрических изделий, будет специализировано производство низковольтной аппаратуры между производящими электрические изделия отраслями промышленности.

Значительно будет усовершенствовано электросварочное оборудование; осваиваются новые сварочные генераторы облегченной конструкции, расширяется номенклатура сварочных, точечных, стыковых, шовных и других машин для сварки.

Для обеспечения, в соответствии с Директивами XX съезда партии, выплавки качественных и специальных сталей будет расширено в 4 раза производство электротехнического оборудования для заводов черной металлургии. Предстоит

освоить сталеплавильные печи емкостью 80 и 180 т с электромагнитным перемешиванием металла, высокочастотные, вакуумные, закалочные, конвейерные и другие типы печей, встраиваемые в технологические цепочки металлургического, термического и других производств.

Намечено значительное обновление номенклатуры, широкая унификация узлов и деталей в производстве электроизмерительных приборов.

Предстоит решить важные задачи в области кабельного производства: по освоению маслонаполненного кабеля на 400 кв, кабелей связи самых разнообразных назначений, силовых кабелей с алюминиевой оболочкой, кабелей для нужд нефтяной, угольной промышленности и для сельского хозяйства, новой кабельной арматуры и пр. К первоочередным задачам кабельной промышленности относится также применение для изоляции обмоточных проводов стеклянной нити и синтетических лаков вместо хлопчатобумажных ниток и масляных эмалей.

В Директивах XX съезда по плану развития народного хозяйства указано на важнейшее значение дальнейшего улучшения качества продукции. Большинство претензий потребителей в этом отношении к электротехнической промышленности вполне обосновано, и это обязывает всех работников электропромышленности уделять повседневно большое внимание вопросам подъема качества электротехнических изделий. Должна быть повышена культура производства и квалификация исполнителей, рационализирована технологическая подготовка производства, обеспечена ритмичная работа всех цехов и углубленная деятельность исследовательских и конструкторских отделов и лабораторий.

Особо важной задачей, в связи с качеством и техническим уровнем электротехнических изделий, является разработка новых и внедрение уже разработанных новых видов электрической изоляции. Решение этой задачи зависит в большей мере от своевременного выполнения своих обязательств Министерством химической промышленности по освоению и резкому расширению (по крайней мере в 20 раз) производства высококачественных кремнийорганических лаков и от увеличения Министерством легкой промышленности (не менее чем в 5 раз) производства стеклянного волокна и ткани. Применение стекла и кремнийорганических лаков в изоляции электротехнических изделий позволяет уменьшить вес и габариты их, увеличить в несколько раз долговечность и повысить надежность электрооборудования в эксплуатации. Особое значение это приобретает

в электрификации железнодорожного транспорта. Нужно отметить, что химическая и легкая промышленность не обеспечили намечавшихся объемов поставок кремнийорганических лаков и стеклохолста, из-за чего намеченная электротехнической промышленностью на 1956 г. программа выпуска машин на кремнийорганической изоляции в I полугодии срывается. Химическая промышленность должна быстро расширить производство полиамидных лаков для обмоточных проводов, эпоксидных смол, лавсана и других синтетических изоляционных материалов, без которых не может быть достигнут всесторонний прогресс в электромашиностроении.

Необходимо также освоить производство, в значительных масштабах, слюдинита; от этого зависит не только повышение надежности изоляции электрических машин, но и механизация производства электроизолирующих материалов, что должно значительно удешевить стоимость изоляции. В этом вопросе помощь должна быть обеспечена со стороны бумажной промышленности.

Не менее важна для электромашиностроения проблема получения высококачественной электротехнической стали.

Начатое за последнее время усиление заводских исследовательских лабораторий и конструкторских бюро должно быть как можно быстрее завершено. Исследовательская материальная база по высоковольтному оборудованию должна быть расширена путем постройки в первую оче-

редь двух стендов для испытания на разрывную мощность высоковольтного оборудования; наряду с окончанием начатого на заводах строительства лабораторий в течение ближайших двух лет следует построить лаборатории еще на нескольких заводах. Необходимо организовать научно-исследовательский институт технологии электромашиностроения и научно-исследовательскую базу электропромышленности на Востоке.

На электротехнических заводах должны быть усилены инструментальные цехи и цехи по изготовлению нестандартного технологического оборудования и по модернизации оборудования; кроме того, следует оснащать заводы новейшим высокопроизводительным оборудованием, а также регулярно снабжаться лучшими образцами зарубежных электротехнических изделий.

В электропромышленности необходимо организовать новые поточные конвейерные и автоматические линии по механической обработке деталей, по штамповке, литью, сварке, намотке обмоток и сборке узлов и изделий.

Серьезное внимание должно быть уделено дальнейшему воспитанию и обучению рабочих и инженерно-технических кадров и совершенствованию знаний в выбранной ими профессии.

Работники электротехнической промышленности приложат все силы для успешного выполнения решений XX съезда Коммунистической партии Советского Союза.



Новая схема регулирования нагрузки электропривода блуминга

Инж. В. И. АРХАНГЕЛЬСКИЙ

Центрометаллургавтоматика

Скорость реверсивного прокатного двигателя, управляемого по системе генератор — двигатель, регулируется, как известно, двумя способами: от нуля до основной — изменением напряжения генератора, выше основной — изменением поля двигателя. При этом разгон и замедление привода осуществляются под нагрузкой.

Исходя из уравнения движения электропривода

$$M = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} + M_c, \quad (1)$$

для тока в главной цепи двигателя можно записать:

$$I = I_{дин} + I_c,$$

где $I_{дин}$ — динамическая составляющая тока, определяемая моментом двигателя, расходуемым на ускорение инерционных масс привода;

I_c — статическая составляющая тока, обусловленная моментом нагрузки.

В режиме разгона ток I равен сумме статической и динамической составляющих; в режиме замедления — разности.

Величины форсировок при управлении напряжением генератора выбираются обычно такими, чтобы при максимальных статических нагрузках, соответствующих нормальным условиям работы, сумма статической и динамической составляющих тока при разгоне не превышала допустимой величины тока в якоре двигателя. При дальнейшем ускорении двигателя выше основной скорости за счет ослабления его поля начальная форсировка должна обеспечить поддержание прежней величины динамической составляющей тока $I_{дин}$ с последующим постепенным ее уменьшением [Л. 1].

В режиме замедления привода, когда ток якоря определяется разностью статической и динамической составляющих, наибольший ток имеет место при торможении двигателя, работающего вхолостую. Процесс замедления с максимальной скорости может осуществляться двояко: а) вначале производится усиление поля двигателя при постоянной величине напряжения генератора, а затем по достижении полем величины, близкой к номинальной, начинается снижение напряжения генератора; б) усиление поля и снижение напряжения генератора протекают одновременно. В первом случае, поскольку напряжение генератора снижается уже при полном поле двигателя, средний тормозной момент получается более высоким, что позволяет сократить время торможения.

Во всех режимах управления и на всех скоростях максимальные толчки тока в якоре двигателя не должны выходить за пределы допустимых. Для предотвращения возможных перегрузок прокатного двигателя в системах управления предусматривается регулятор нагрузки.

Требования к регулятору нагрузки. При разгоне двигателя до основной скорости регулятор

должен ограничивать степень форсирования возбуждения генератора в тех случаях, когда статические нагрузки превышают допустимые, например при прокатке недогретого металла, повышенных обжатиях металла валками и др. Снижение форсировки уменьшает динамическую составляющую тока $I_{дин}$, что приводит к уменьшению ускорения привода. В случае весьма значительных перегрузок регулятор должен вовсе прекратить разгон или даже остановить двигатель. Если схема управления напряжением генератора не обеспечивает оптимальных переходных режимов, то регулятор нагрузки может несколько приблизить характер разгона нагруженного двигателя к оптимальному закону.

При разгоне выше основной скорости регулятор должен, помимо ограничения форсировки ослабления поля двигателя при больших нагрузках, автоматически ограничивать величину максимальной скорости в соответствии с приложенной к валу двигателя нагрузкой. Это следует из характеристики предельно допустимых нагрузок двигателя [Л. 1], согласно которой вращающий момент уменьшается по мере ослабления поля.

При замедлении двигателя со скорости выше основной вхолостую или с малой нагрузкой регулятор должен: а) задержать снижение напряжения генератора во время усиления поля двигателя; б) при схеме управления полем, не обеспечивающей оптимального переходного режима [Л. 1], улучшить характер режима; в) при схеме управления, обеспечивающей оптимальный закон нарастания поля, воздействие регулятора на поле двигателя может потребоваться лишь в тех случаях, когда стремление увеличить ускорение в тормозном режиме с нагрузкой вызывает необходимость создавать при торможении вхолостую более высокие форсировки, чем это было бы допустимо при работе без регулятора нагрузки.

Здесь следует, однако, отметить, что получение оптимального режима усиления поля посредством регулятора нагрузки весьма нежелательно. Это объясняется тем, что регулятор, действующий одновременно на независимые друг от друга схемы: управления напряжением генератора и управления полем двигателя, может вызвать ложные режимы. Например, поддержание тока якоря на заданном уровне регулятор может обеспечить путем одновременного воздействия на оба регулируемых параметра (напряжение генератора и ток возбуждения двигателя), и в зависимости от его настройки он может не только допустить снижение напряжения генератора при одновременном усилении поля двигателя, но и вовсе прекратить усиление поля или даже начать его ослабление. Указанный недостаток может быть устранен искусственным разделением режимов усиления поля и снижения напряжения генератора, но это приводит к усложнению схемы управления и уменьшает ее надежность.

Из сказанного следует, что при замедлении со скорости выше основной целесообразно, чтобы регулятор нагрузки обеспечивал только поддержание постоянной величины напряжения генератора, а оптимальный закон усиления поля должен обеспечиваться самой схемой управления.

В режиме замедления от основной скорости до нуля, если это замедление протекает при полном поле двигателя, действие регулятора нагрузки не требуется, так как величины тормозных токов заранее определены выбранной форсировкой гашения поля генератора.

Существующая схема электромашиного регулятора нагрузки. Упрощенная схема электромашиного управления реверсивным прокатным двигателем приведена на рис. 1. Как генератор G , так и двигатель D возбуждаются по трехкаскадным схемам. Управление напряжением генератора и полем двигателя осуществляется путем воздействия на обмотки управления $yг-1$, $yг-2$ усилителя $УГ$ и $yд-1$, $yд-2$ усилителя $УД$ [Л. 2]. Управляющие обмотки $yг-3$ и $yд-3$ включены в схему регулятора нагрузки.

Регулятор нагрузки состоит из потенциометра сравнения $R_2 \dots R_5$, питаемого от вспомогательного генератора $ГРТ$, и управляющих обмоток $yг-3$ и $yд-3$, включенных на обмотку дополнительных полюсов $дп$ и компенсационную обмотку $ко$ двигателя через твердые выпрямители $1ТВ \dots 6ТВ$. Намагничивающие силы обмоток $yг-3$ и $yд-3$ определяются разностью падений напряжения на зажимах 1, 2 и напряжений сравнения. Вентили $1ТВ \dots 4ТВ$ обуславливают протекание тока в обмотке $yд-3$ всегда в одном направлении. Намагни-

чивающая сила этой обмотки увеличивает напряжение $УД$. Вентили $5ТВ$ и $6ТВ$ совместно с контактами реле направления $БВ$, $БН$ исключают действие обмотки $yг-3$ в режимах разгона. Ток через обмотку протекает только в режимах рекуперативного торможения, при этом ее н. с. стремится увеличить напряжение усилителя $УГ$.

Вспомогательный генератор $ГРТ$ имеет две согласно включенные обмотки возбуждения $ов-1$ и $ов-2$. Обмотка $ов-1$ питается от независимого источника; через обмотку $ов-2$ протекает ток, пропорциональный току возбуждения двигателя. Эта обмотка служит для снижения уставки регулятора путем уменьшения напряжения сравнения при ослабленном поле двигателя.

Рассмотрим действие регулятора в различных режимах управления.

В режиме разгона двигателя до основной скорости ток I имеет направление, показанное на рис. 1 стрелкой, и регулятор нагрузки при этом практически не действует. В этом режиме через обмотку $yг-3$ ток не может протекать, так как разомкнут контакт $БН$, а в контуре обмотки $yд-3$ слишком велико напряжение сравнения; поэтому в ней либо вовсе нет тока, либо протекает небольшой ток, несколько подвозбуждающий прокатный двигатель. Регулятор не может предотвратить возможную перегрузку двигателя.

При разгоне выше основной скорости уставка регулятора снижается вследствие уменьшения тока возбуждения двигателя, и вступает в действие обмотка $yд-3$. При превышении током якоря допускаемой величины регулятор замедляет темп ослабления поля и тем самым устраняет возможность перегрузки двигателя. При значительной статической нагрузке на валу двигателя регулятор может прекратить дальнейшее ускорение после достижения двигателем определенной величины скорости. При этом, как будет показано ниже, нагрузка может вовсе не достигать предельного значения.

При замедлении с максимальной скорости регулятор нагрузки, с одной стороны, задерживает снижение напряжения генератора, пока происходит усиление поля двигателя, с другой, — форсирует усиление поля двигателя. Последнее (положительная обратная связь) является нежелательным, так как регулятор, стремясь ограничить ток в якоре двигателя, может вызвать недопустимое повышение напряжения генератора.

Требуемый закон изменения н. с. токовых обмоток усилителей $УД$ и $УГ$. В предыдущей работе автора [Л. 1] было получено уравнение для цепи возбуждения двигателя в переходных режимах:

$$\sigma \theta \frac{d\varphi}{d\tau} + j = \beta f, \quad (2)$$

где $\theta = \frac{T_\sigma}{T_\theta}$ — отношение электромагнитной постоянной времени цепи возбуждения двигателя к электромеханической постоянной привода;

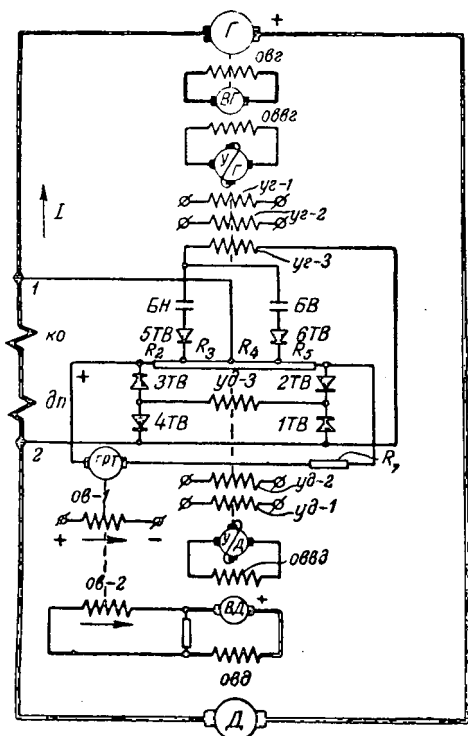


Рис. 1. Упрощенная схема главного электропривода реверсивного прокатного стана.

G — генератор; D — двигатель; $ВГ$ — возбудитель генератора; $ВД$ — возбудитель двигателя; $УГ$ — усилитель генератора; $УД$ — усилитель двигателя; $ГРТ$ — вспомогательный генератор.

$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_n}$ — поток возбуждения в относительных единицах;
 i — ток возбуждения;
 f — результирующая н. с. усилителя УД при работе без регулятора нагрузки;
 σ — коэффициент рассеяния;
 β — постоянный коэффициент при линейных характеристиках намагничивания УД и ВД;
 $\tau = \frac{t}{T_\partial}$.

Уравнение (2) в равной степени может быть использовано и для анализа схемы возбуждения генератора. При этом лишь изменятся коэффициенты θ и β .

Для цепи возбуждения двигателя

$$\sigma \theta_\partial \frac{d\varphi_\partial}{d\tau} + i_\partial = \beta_\partial f_\partial; \quad (3)$$

для цепи возбуждения генератора

$$\sigma \theta_z \frac{d\varphi_z}{d\tau} + j_z = \beta_z f_z, \quad (4)$$

где

$$\theta_z = \frac{T_{\partial z}}{T_\partial};$$

$T_{\partial z}$ — электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения генератора.

Для схемы управления главным электроприводом при наличии регулятора нагрузки, создающего н. с. $f_{мд}$ усилителя УД и н. с. $f_{мг}$ усилителя УГ, уравнения (3) и (4) примут вид:

$$\sigma \theta_\partial \frac{d\varphi_\partial}{d\tau} + j_\partial = \beta_\partial (f_\partial + f_{мд}); \quad (3a)$$

$$\sigma \theta_z \frac{d\varphi_z}{d\tau} + j_z = \beta_z (f_z + f_{мг}). \quad (4a)$$

В переходном режиме при достижении тока якоря двигателя предельно допустимой величины ускорение должно быть прекращено, т. е. производная $\frac{d\varphi}{d\tau}$ должна обратиться в нуль. Следовательно, при

$$f_{мд} = f_{мдм} \text{ и } f_{мг} = f_{мгм}$$

из уравнений (3a) и (4a) получим:

$$j_\partial = \beta_\partial (f_\partial + f_{мдм}); \quad (5)$$

$$j_z = \beta_z (f_z + f_{мгм}), \quad (6)$$

где $f_{мдм}$, $f_{мгм}$ — величины н. с. токовых обмоток соответственно усилителей УД и УГ при предельном токе в якоре двигателя.

Решая (5) и (6) относительно предельных н. с. токовых обмоток, найдем выражения для требуемых характеристик регулятора нагрузки:

$$\beta_\partial f_{мдм} = j_\partial - \beta_\partial f_\partial; \quad (5a)$$

$$\beta_z f_{мгм} = j_z - \beta_z f_z. \quad (6a)$$

Из (5a) и (6a) следует, что оптимальные характеристики регулятора нагрузки зависят от формы характеристик управления напряжением

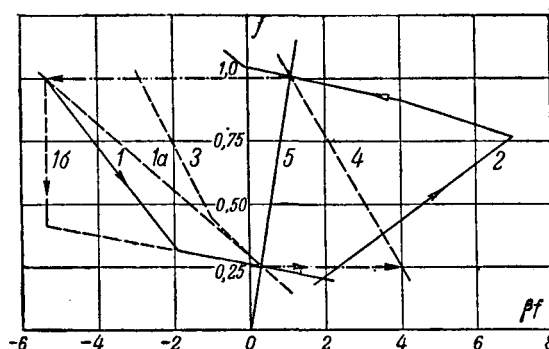


Рис. 2. Статические характеристики при управлении полем двигателя.

1, 1a, 1b и 2 — для новой схемы; 3 и 4 — для старой схемы; 5 — характеристика намагничивания двигателя.

генератора и полем двигателя. Кроме того, на них оказывает влияние степень нелинейности характеристик намагничивания усилителей и возбуждателей (непостоянство коэффициента β).

Для старой и новой схем управления полем двигателя [Л. 1] статические характеристики изображены на рис. 2. Пользуясь этими характеристиками, посредством уравнения (6a) можно определить статические характеристики регулятора нагрузки при его воздействии на поле двигателя (рис. 3). Из этих характеристик видно, что в режиме ослабления поля двигателя для обеих схем н. с. $f_{мдм}$, соответствующая предельному току якоря, должна по мере снижения тока возбуждения уменьшаться в значительных пределах.

Полагая, что схема управления напряжением генератора обладает статическими характеристиками, приведенными на рис. 4, и пользуясь уравнением (6a), можно получить характеристики регулятора нагрузки при его воздействии на напряжение генератора, представленные на рис. 4 сплошными линиями.

Если усиление поля при реверсе с максимальной скоростью вхолостую производится по новой схеме [Л. 1], то для поддержания неизменной величины тока в главной цепи $I_m = 1,9 I_n$ регулятор нагрузки должен лишь задерживать снижение напряжения генератора до момента достижения полем двигателя номинальной величины.

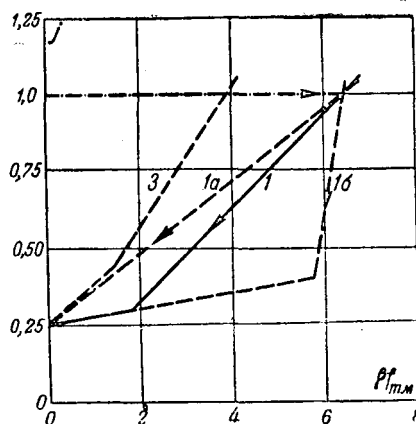


Рис. 3. Статические характеристики регулятора нагрузки при его воздействии на поле двигателя.

1, 1a и 1b — при управлении полем по новой схеме; 3 — при управлении полем по старой схеме.

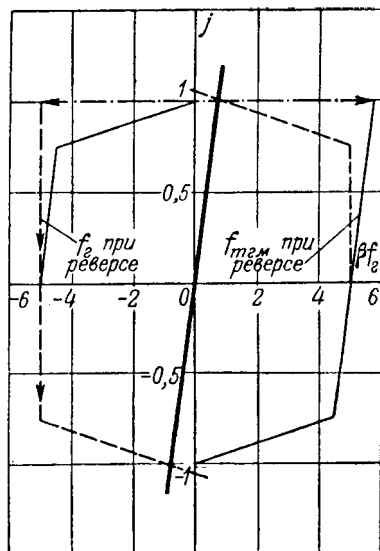


Рис. 4. Статические характеристики схемы управления напряжением генератора и регулятора нагрузки при воздействии на напряжение генератора.

Дальнейшее торможение двигателя протекает за счет снижения напряжения генератора без участия регулятора нагрузки.

Характеристики регулятора нагрузки. Намагничивающая сила токовой обмотки *уд-3* усилителя *УД* (рис. 1) определяется разностью двух напряжений: падения напряжения в компенсационной обмотке и обмотке дополнительных полюсов двигателя U_{κ} и напряжения сравнения U_c , равного падению напряжения на сопротивлениях R_4 , R_5 или R_2 , R_3 .

Напряжение сравнения при ослаблении поля уменьшается пропорционально току возбуждения двигателя по закону

$$U_c = U_{co} - k_c(1 - j), \quad (7)$$

где U_{co} — напряжение сравнения при полном поле;

k_c — коэффициент, характеризующий степень изменения U_c .

Падение напряжения в компенсационной обмотке и обмотке дополнительных полюсов состоит из трех основных слагаемых:

$$U_{\kappa} = Ir_{\kappa} + L_{\kappa} \frac{dI}{dt} + e_n, \quad (8)$$

где r_{κ} , L_{κ} — сопротивление и индуктивность компенсационной обмотки и обмотки дополнительных полюсов двигателя;

e_n — переменная э. д. с., обусловленная пазовыми пульсациями потока двигателя.

Соотношение между этими составляющими для разных машин различно. Оно зависит также от интенсивности переходных процессов, скорости вращения двигателя и величины его тока возбуждения. Для двигателей обжимных

станов напряжение $L_{\kappa} \frac{dI}{dt}$ может достигать 60...100% величины напряжения Ir_{κ} , соответствующей двукратному току якоря. При этом следует учитывать, что в режимах нарастания тока первые два слагаемых складываются, а при снижении тока — вычитаются. Электродвижущая сила e_n по амплитуде достигает величин, близких максимальному падению напряжения Ir_{κ} . Однако благодаря относительно высокой частоте пульсаций н. с. обмоток *у2-3* и *уд-3* от выпрямленной э. д. с. e_n , вследствие большого индуктивного сопротивления обмоток, получаются незначительными. Тем не менее за счет э. д. с. e_n происходит заметное снижение тока I_0 , при котором вступает в действие регулятор нагрузки. Электродвижущая сила e_n , снижая ток, соответствующий началу действия регулятора, не меняет, однако, его максимальной уставки, так как действие e_n прекращается с момента достижения первыми двумя слагаемыми в (8) амплитудного значения e_n . Таким образом, происходит смягчение характеристики регулятора при неизменной уставке.

При рассмотрении статических характеристик регулятора полагаем, что

$$u_{\kappa} = i, \quad (8a)$$

где

$$u_{\kappa} = \frac{U_{\kappa}}{U_{\kappa n}}; i = \frac{I}{I_n}; U_{\kappa n} = r_{\kappa} I_n.$$

Для режима ослабления поля (через обмотку *у2-3* ток не протекает) н. с. токовой обмотки *уд-3* может быть представлена в виде:

$$f_{m\partial} = \xi(i - \epsilon), \quad (9)$$

где $\xi = \frac{\omega_{m3}}{F_{уд\kappa}} \cdot \frac{U_{\kappa n}}{\rho(R_3 + R_4) + R_{m3}}$ — коэффициент усиления регулятора нагрузки;

$$\epsilon = \frac{R_3 + R_4}{I=5} \frac{U_c}{U_{\kappa n}} \text{ — напряжение сравнения (в от-}$$

носительных единицах);

$$\rho = \frac{R_1 + R_2 + R_5}{I=5},$$

$$\sum_{i=1}^5 r_i$$

ω_{m3} — число витков токовой обмотки *уд-3*;

$F_{уд\kappa}$ — результирующая н. с. усилителя *УД* при номинальном токе возбуждения двигателя.

Если максимальному току i_m соответствует н. с. токовой обмотки $f_{m\partial m}$, то из выражения

$$\xi = \frac{f_{m\partial m}}{i_m - \epsilon}$$

следует, что чем выше напряжение сравнения, тем более жесткой должна быть характеристика регулятора. Это положение подтверж-

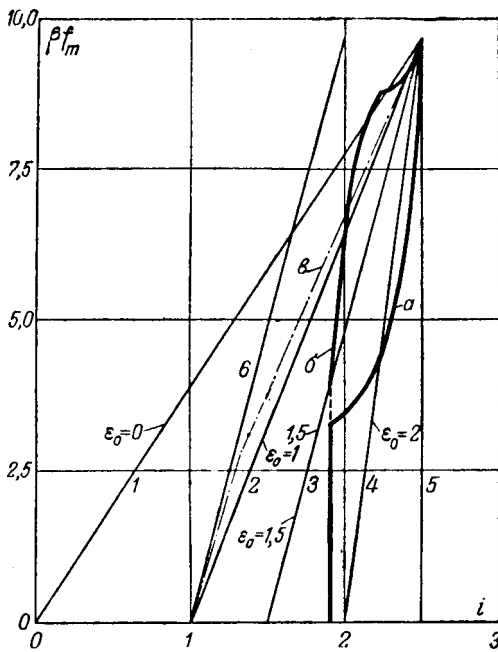


Рис. 5. Характеристики регулятора нагрузки.

1...5 — характеристики $i_m = \psi(i)$ для различных напряжений сравнения ϵ_0 при полном поле двигателя; 6 — смещенная характеристика 3 в результате ослабления поля; а — оптимальная кривая $i_{m\text{опт}} = \psi(i_m)$ для режима ослабления поля по характеристике 1 рис. 2; б — то же, но для характеристики 16 рис. 2; в — зависимость $i_{m\text{опт}} = \psi(i_m)$ в режиме ослабления поля, обеспечиваемая существующим регулятором нагрузки.

дается также рис. 5, где прямыми линиями представлены характеристики, рассчитанные по уравнению (9) для различных значений напряжения сравнения $\epsilon = \epsilon_0$ при полном поле двигателя.

На рис. 6 пунктирными прямыми представлены зависимости напряжения сравнения ϵ от тока возбуждения двигателя, рассчитанные по уравнению

$$\epsilon = \epsilon_0 - k_{c1}(1 - f),$$

для $k_{c1} = 0,68$ при различных величинах ϵ_0 .

Предельный ток в якоре, который будет поддерживать регулятор нагрузки при ослаблении поля по характеристике 1 рис. 2, может быть рассчитан по уравнению (9). Кривые изменения предельного тока в функции скорости (рис. 7) получаются различными для разных величин ϵ_0 . При этом чем меньше напряжение сравнения, т. е. чем более пологи характеристики регулятора (рис. 5), тем ниже проходит кривая предельного тока, поддерживаемого регулятором, и, следовательно, хуже использование двигателя по допускаемой нагрузке. Самая верхняя прямолинейная характеристика 1 является оптимальной; она соответствует наибольшему току, который допускает двигатель при управлении его полем.

Оптимальный закон изменения напряжения сравнения ϵ , удовлетворяющий характеристике 1 рис. 7, может быть найден, если в (9) вместо $f_{m\text{опт}}$ подставить его максимальные

значения из характеристики 1 рис. 3, а из рис. 7 — соответствующие величины предельно допускаемого тока в главной цепи.

Семейство оптимальных кривых $\epsilon = \psi(f)$ приведено на рис. 6. Из рассмотрения этих кривых видно, что применяемый в существующем регуляторе закон изменения напряжения сравнения в функции скорости прямо противоположен требованиям оптимального протекания переходных режимов: напряжение ϵ по мере ослабления поля должно увеличиваться и лишь при значительном ослаблении поля несколько уменьшаться. При этом характер изменения $\epsilon = \psi(f)$ весьма далек от прямолинейного.

Характеристикам $\epsilon = \psi(f)$ соответствует характеристика регулятора $f_{m\text{опт}} = \psi(i_m)$, приведенная на рис. 5 (кривая а). Существующий регулятор при $\epsilon_0 = 1,5$ имеет характеристику в. Сравнивая характеристику в, соответствующую уменьшающемуся напряжению сравнения при ослаблении поля, с характеристикой 3 при $\epsilon = \epsilon_0 = \text{const}$, легко заметить, что последняя проходит ближе к оптимальной кривой а и, следовательно, является более благоприятной по сравнению с характеристикой в. Таким образом, в данном случае снижение величины ϵ при

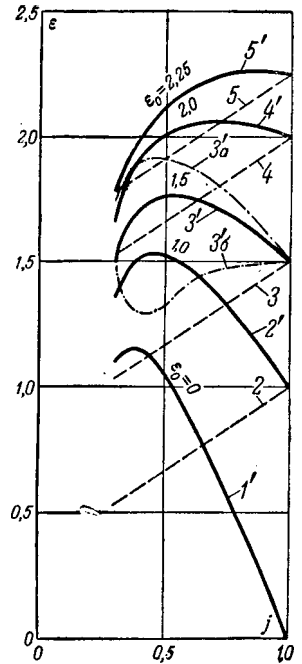


Рис. 6. Зависимость напряжения сравнения от тока возбуждения двигателя.

2...5 — для существующего регулятора; 1'...5' — оптимальные кривые при ослаблении поля по характеристике 1 рис. 2; 3'а, 3'б — оптимальные кривые при ослаблении поля соответственно по характеристикам 1а и 16 рис. 2.

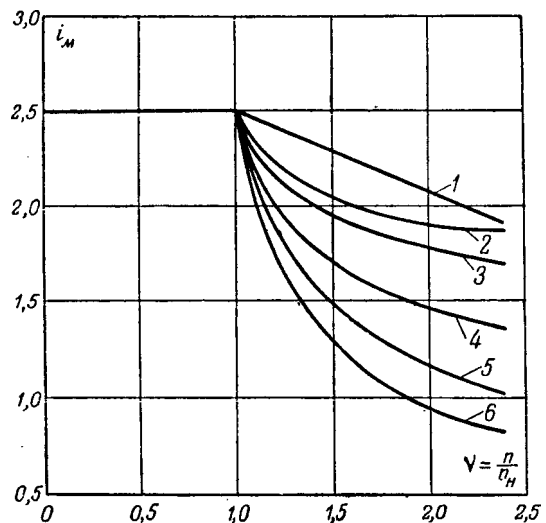


Рис. 7. Зависимость предельного тока якоря от скорости двигателя.

1 — оптимальная характеристика; 2...6 — характеристики, обеспечиваемые существующим регулятором.

ослаблении поля двигателя лишь ухудшает режим.

Поскольку характеристики регулятора нагрузки тесно связаны с характеристиками схемы управления полем двигателя, путем соответствующего изменения параметров последней можно воздействовать на форму оптимальных кривых $\epsilon = \psi(i)$ и $f_{\text{т.д.м.}} = \psi(i_{\text{м.}})$. Действительно, если ослабление поля производится по характеристике $1a$ рис. 2, то ϵ изменяется по кривой $3'a$ рис. 6, лежащей выше $3'$. Наоборот, изменению поля двигателя по $1b$ рис. 2 будут соответствовать кривая $3'b$ рис. 6 и кривая b рис. 5. Отсюда следует, что выбор параметров схемы управления полем двигателя должен увязываться с возможностями регулятора нагрузки с точки зрения обеспечения оптимальных режимов управления. Кроме того, схема управления возбуждением вспомогательного генератора ГРТ должна обеспечивать возможность получения оптимальных характеристик рис. 6.

Из сравнения функций, выполняемых регулятором нагрузки в схеме рис. 1, с требованиями, которым он должен удовлетворять, следует, что регулятор: а) вовсе не контролирует режим разгона двигателя до основной скорости; б) неправильно воздействует на поле двигателя в режиме замедления с максимальной скорости; в) не имеет оптимального закона изменения напряжения сравнения в функции тока возбуждения двигателя, что исключает возможность полного использования двигателя по допускаемой нагрузке.

Новая схема электромашинного регулятора нагрузки. Разработанная Центрометаллургавтоматикой новая схема регулирования нагрузки прокатного двигателя¹ приведена на рис. 8. Здесь, так же как и в старой схеме (рис. 1), нагрузка контролируется по величине падения напряжения в компенсационной обмотке и обмотке дополнительных полюсов двигателя. Напряжение сравнения создается вспомогательным генератором ГРТ. Сопротивления R_3 , R_4 , вентили $5TB$, $6TB$ и контакты реле $БВ$, $БН$ входят в контур, участвующий, как и в прежней схеме, в режиме рекуперативного торможения.

Отличительными особенностями этой схемы по сравнению со схемой рис. 1 являются:

а) наличие вентиля $7TB$ и $8TB$, включенных на повышенное напряжение сравнения (падения напряжения на сопротивлениях R_2 , R_3 или R_4 , R_5) и присоединяемых к токовой обмотке y_2-3 усилителя УГ через контакт контактора ускорения $1У$, который замкнут при управлении ниже основной скорости и размыкается при скорости выше основной;

б) переключение токовой обмотки y_2-3 усилителя УД посредством нормально закрытых контактов реле $БВ$, $БН$ и реле напряжения $РН$;

в) применение специальной схемы возбуждения вспомогательного генератора ГРТ.

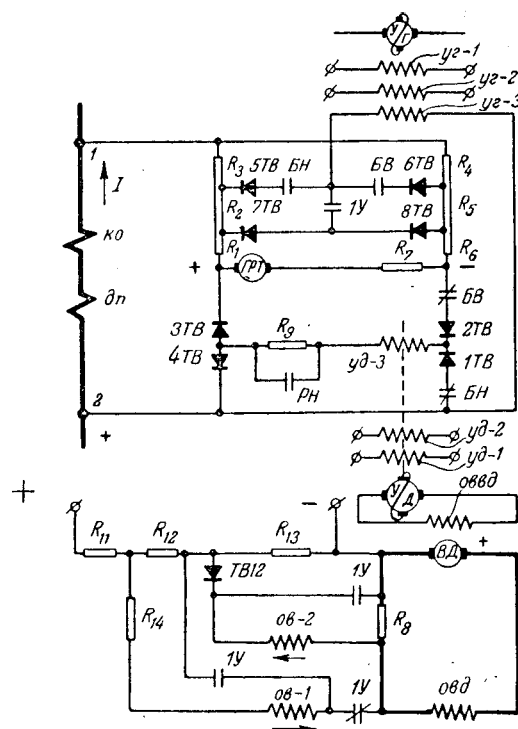


Рис. 8. Новая схема электромашинного регулятора нагрузки.

$1У$ — контактор ослабления поля двигателя. При полном поле и в режиме усиления поля двигателя нормально открытые контакты $1У$ замкнуты.

Новая схема обеспечивает непрерывный контроль нагрузки электропривода во всех режимах управления.

При разгоне двигателя с большой нагрузкой от нуля до основной скорости регулятор ограничивает величину ускорения, воздействуя через токовую обмотку y_2-3 на интенсивность роста напряжения генератора. При этом обмотка y_2-3 включена на разность между падением напряжения в обмотках $ко$ и $дп$ и повышенным напряжением сравнения (вентили $7TB$ или $8TB$). Пока нагрузка двигателя находится ниже допустимых пределов, н. с. обмотки y_2-3 относительно мала и не оказывает заметного влияния на ускорение привода. Приближение нагрузки к предельному значению вызывает резкое увеличение н. с. токовой обмотки, форсировка возбуждения генератора уменьшается, замедляя разгон двигателя. Если статическая нагрузка продолжает далее расти, ускорение вовсе прекращается, и двигатель останавливается.

Полное снятие возбуждения генератора в случае остановки двигателя от перегрузки осуществляется в функции времени (рис. 9). Для повторного пуска педаль comando-контроллера должна быть возвращена в нулевое положение и затем нажата вновь.

Следует отметить, что ранее применявшаяся релейно-контакторная схема управления обжимными реверсивными прокатными станами, детально исследованная Д. П. Морозовым [Л. 3], имела регулятор нагрузки, эффективно контролировавший режим ускорения нагруженного двигателя

¹ Схема предложена автором.

во всем диапазоне разгона, от нуля до максимальной скорости.

Для обеспечения оптимального протекания режимов управления нагруженным двигателем напряжение сравнения, а следовательно, и э. д. с. генератора *ГРТ* должны изменяться по нелинейным характеристикам $I' \dots 5'$ рис. 6 при ослаблении поля и несколько возрастать при усилении поля двигателя. Новая схема возбуждения генератора *ГРТ* (рис. 8) в значительной степени удовлетворяет указанным требованиям.

Достигается это следующим образом.

Обмотки возбуждения *ов-1* и *ов-2* генератора *ГРТ* включены по дифференциальной схеме и их н. с. направлены навстречу друг другу. В начале ослабления поля двигателя контакт *1У* в цепи обмотки *ов-1* замыкается, падение напряжения на сопротивлениях R_{12} и R_{13} превышает падение напряжения U_8 на сопротивлении R_8 и через обмотку *ов-1* протекает ток, создающий н. с., который соответствует напряжению сравнения на регуляторе нагрузки ϵ , возрастающее по мере снижения тока возбуждения двигателя. При этом ток через дифференциальную обмотку *ов-2* не протекает, так как $U_8 > U_{13}$.

После уменьшения тока возбуждения j до некоторой определенной величины появляется ток в обмотке *ов-2*, который при дальнейшем снижении тока j растет быстрее по сравнению с ростом тока в обмотке *ов-1*. Благодаря этому результирующая н. с. *ГРТ* начинает уменьшаться. Описанные характеристики приведены на рис. 10.

Надлежащим выбором параметров схемы можно получить характеристики различной формы в зависимости от требований, обусловленных параметрами регулятора нагрузки и характеристиками схемы управления полем двигателя.

При усилении поля в период уменьшения скорости до основной регулятор должен лишь задерживать падение напряжения на якоре двигателя. Поскольку предельный ток якоря двигателя при этом увеличивается, целесообразно уставку регулятора несколько повышать, т. е. увеличивать напряжение сравнения ϵ (рис. 10). Для этой цели в момент начала усиления поля при включении контактора *1У* обмотка *ов-1* включается на

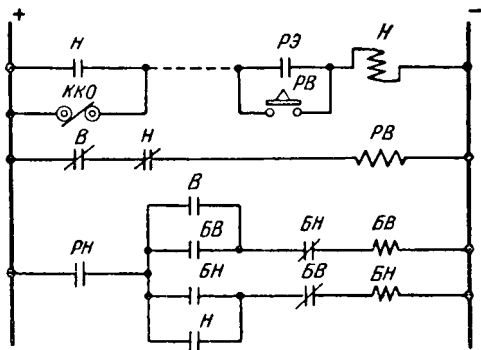


Рис. 9. Узел релейной схемы, участвующий в работе регулятора нагрузки.

Н — нулевой контактор; *РЗ* — реле э. д. с. генератора (отключается при остановке перегруженного двигателя под действием регулятора нагрузки); *РН* — реле напряжения (включается при напряжении генератора около 85% номинального); *БВ* и *БН* — блокировочные реле направления вращения двигателя; *В* и *Н* — реверсивные контакторы.

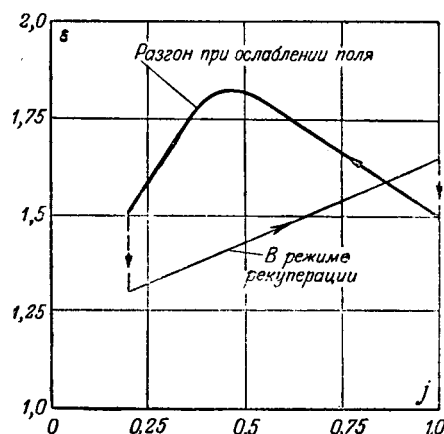


Рис. 10. Характеристики напряжения сравнения при работе по схеме рис. 8.

независимое напряжение, а обмотка *ов-2* подключается непосредственно на сопротивление R_8 . Теперь н. с. возбуждения *ГРТ* нарастает пропорционально величине j , а диапазон ее увеличения определяется соотношением согласно действующих н. с. обмоток *ов-1* и *ов-2*.

Примененное в схеме рис. 8 переключение обмотки *уд-3* позволяет исключить ее действие в режиме рекуперативного торможения (разомкнут один из контактов *БВ*, *БН*) и ослабить ее влияние на поле двигателя при разгоне от нуля до основной скорости (контакт реле напряжения *РН* шунтирует сопротивление R_9 лишь по достижении скорости, близкой к основной). Введение в регулятор нагрузки узла, состоящего из сопротивления R_9 и контакта реле *РН*, исходит из той предпосылки, что новый регулятор будет применяться с новой схемой управления полем двигателя [Л. 1].

Новая схема управления полем создает значительно большие форсировки в переходных режимах, а это требует и более эффективного действия регулятора нагрузки при тех же величинах тока в якоре двигателя. Отсутствие сопротивления R_9 в цепи обмотки *уд-3* при ускорении с полным полем и большой статической нагрузкой привело бы к увеличению тока возбуждения двигателя выше номинального.

Экспериментальное исследование. Исследование новой схемы регулятора нагрузки проводилось на электроприводах блумингов 1150 и 950, управляемых по системе генератор — двигатель с электромашиной автоматикой. Технические данные электрических машин блуминга 1150:

прокатный двигатель МП-24-7000 7 000 л. с., 750 в, 7 500 а, 50/120 об/мин;
генераторы (два) — по 3 600 квт, 750 в, 375 об/мин.

На осциллограммах рис. 11 и 12 представлена часть цикла прокатки слитка на блуминге 1150, причем обе осциллограммы сняты при одной и той же программе обжатия. Рис. 11 соответствует работе со старым регулятором нагрузки, рис. 12 — с новым регулятором.

Работа со старым регулятором, не дающим ограничения нагрузки при разгоне до основной

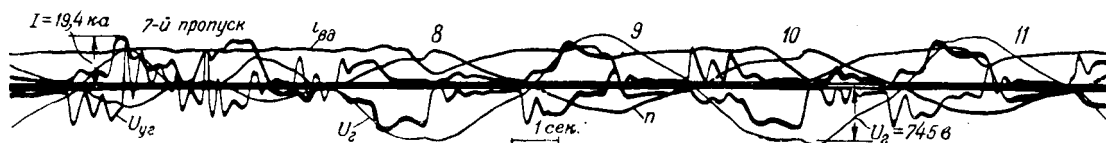


Рис. 11. Осциллограмма прокатки при работе блуминга 1150 со старым регулятором нагрузки.
 $i_{вд}$ — ток возбуждения двигателя; $U_{уг}$ — напряжение усилителя генератора УГ; U_g — напряжение генератора;
 n — скорость вращения прокатного двигателя.

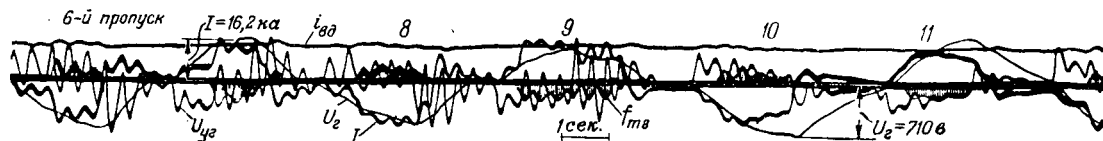


Рис. 12. Осциллограмма прокатки при работе блуминга 1150 с новым регулятором нагрузки.

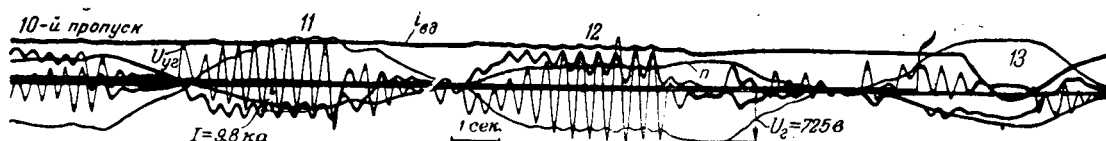


Рис. 13. Осциллограмма прокатки при работе блуминга 1150 с новым регулятором нагрузки, имеющим пониженную уставку и работающим с последовательным трансформатором (рис. 14).

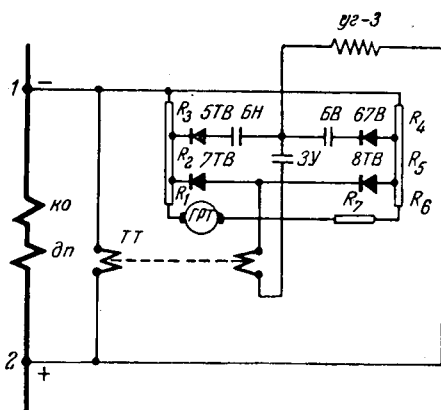
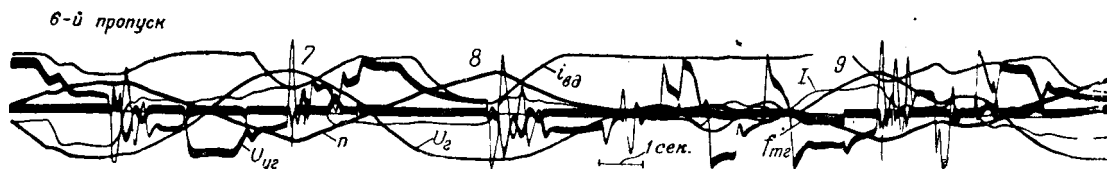


Рис. 14. Узел регулятора нагрузки с последовательным трансформатором ТТ.

Рис. 15. Осциллограмма прокатки при работе блуминга 950 с новым регулятором нагрузки.



скорости, сопряжена с большими толчками тока в главной цепи, достигающими 19...20 кА. При этих токах срабатывает реле предварительной защиты, снимающее возбуждение генератора, что приводит к остановке двигателя (7-й пропуск на осциллограмме рис. 11) и вызывает потерю времени. Новый регулятор в случае больших нагрузок ограничивает форсировку возбуждения генератора и тем самым поддерживает токи якоря на более низком уровне. В течение цикла прокатки максимальные толчки тока находятся примерно на одинаковом уровне (15...16,5 кА).

Проведенное сравнение продолжительности циклов прокатки при работе со старым и новым регуляторами показало, что, несмотря на снижение величин ускорений в отдельных тяжелых пропусках, а следовательно, и некоторого увеличения машинного времени при работе по схеме рис. 8, продолжительность всего цикла прокатки

получается все же меньше, чем при работе по схеме рис. 1. Это объясняется более уверенной работой операторов, не опасаящихся в этом случае недопустимых перегрузок двигателя, а также отсутствием дополнительных потерь времени на остановки стана со слитком в валках, обусловленные отключениями предварительной защиты.

На осциллограмме рис. 13 представлен процесс прокатки слитка на блуминге 1150 для случая весьма низкой уставки регулятора (9,5...10 кА). При этом для ограничения интенсивности изменений тока якоря, что иногда бывает весьма желательным, в схему регулятора был введен последовательный трансформатор ТТ (рис. 14).

В этом случае произошло уменьшение тока и скорости его изменения.

На рассмотренных осциллограммах имеет место довольно значительное колебание тока при действии регулятора нагрузки, что объясняется неблагоприятным выбором параметров схемы возбуждения генератора: большая постоянная времени цепи возбуждения возбудителя, сильное действие стабилизирующих трансформаторов, а также большая величина коэффициента усиления регулятора нагрузки. Возможность устранения пульсаций главного тока иллюстрирует осциллограмма рис. 15, записанная при прокатке слитка на блуминге 950, работающем с аналогичным регулятором, но имеющим другие параметры схемы возбуждения генератора.

Выводы. 1. Для предотвращения возможных перегрузок прокатного двигателя в системах управления электроприводами применяется регу-

Экспериментальное исследование динамических свойств электромашинного усилителя и определение его параметров

Кандидат техн. наук Е. Л. ЭТТИНГЕР и инж. Ю. Р. РЕЙНГОЛЬД

ЦКБ «Электропривод» МЭП

На динамические свойства электромашинного усилителя как при нагрузке, так и холостом ходе большое влияние оказывают внутренние обратные связи, которые, по существу, определяют характер протекания переходных процессов. Теоретическое исследование этого вопроса выполнено Н. М. Якименко [Л. 1].

В настоящей статье излагаются методика и результаты экспериментального исследования динамических свойств усилителя, проведенного в основном методом частотных характеристик. Частотные характеристики усилителя были получены при помощи аппаратуры, описанной в [Л. 2].

Исследование выполнено для случая работы усилителя на линейном участке кривой намагничивания в качестве возбудителя генератора. Гистерезис учитывается только в части влияния его на величину коэффициента усиления, который всюду определяется по амплитудной частотной характеристике при частоте, близкой к нулю.

Было принято, что частотные характеристики не зависят от амплитуды входного сигнала. Эксперимент показывает, что такое допущение не вносит существенных ошибок, но значительно упрощает исследование основных факторов, определяющих динамические характеристики усилителя: взаимной индукции обмоток управления, внутренних и внешних обратных связей и т. п.

Форма поля, магнитные потоки и индуктивности обмоток усилителя. Для составления дифференциальных уравнений усилителя необходимо знать магнитные потоки, индуктивности и взаимной индуктивности компенсационной обмотки, обмоток якоря и управления. Для этого должны быть известны формы полей этих обмоток.

Обмотки управления являются сосредоточенными. При равномерном воздушном зазоре теоретическая кривая поля такой обмотки представляет прямоугольник. Теоретический магнитный поток

$$\Phi_{im} = 0,4\pi\lambda\omega_1 i_1 \cdot 10^{-8} \text{ [всек]}, \quad (1)$$

где $\lambda = \frac{a\tau}{\Delta}$ — магнитная проводимость по продольной оси;

a — рабочая длина якоря;

τ — полюсное деление;

Δ — воздушный зазор;

ω_1 — число витков обмотки управления;

i_1 — ток в обмотке управления;

Теоретическая индуктивность сосредоточенной обмотки

$$L_{im} = 0,4\pi\lambda\omega_1^2 \cdot 10^{-8} \text{ [гн]}. \quad (2)$$

Обмотки якоря и компенсационная являются распределенными.

Теоретические кривые полей этих обмоток имеют треугольную форму.

Теоретический магнитный поток распределенной обмотки (например, обмотки якоря)

$$\Phi_{am} = 0,4\pi\lambda \frac{\omega_a}{2} i_a \cdot 10^{-8} \text{ [всек]}, \quad (3)$$

где ω_a — число витков в каждой параллельной цепи обмотки якоря;

i_a — ток в обмотке.

Теоретическая индуктивность распределенной обмотки

$$L_{am} = 0,4\pi\lambda \frac{\omega_a^2}{3} \cdot 10^{-8} \text{ [гн]}. \quad (4)$$

Действительная форма поля отличается от теоретической из-за неравномерности воздушного зазора

лятор нагрузки, который должен контролировать величину тока в якоре двигателя во всех режимах и на всех скоростях.

Применяемые в настоящее время электромашинные регуляторы нагрузки не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям по следующим причинам:

а) совершенно отсутствует непрерывный контроль величины ускорения нагруженного двигателя при разгоне от нуля до основной скорости;

б) регулятор неправильно воздействует на поле двигателя в режимах замедления с максимальной скорости — при больших токах в якоре процесс усиления поля не только не замедляется, но, наоборот, за счет действия регулятора еще более форсируется;

в) регулятор имеет неудовлетворительный закон изменения напряжения сравнения в функции тока возбуждения двигателя, что исключает возможность полного использования двигателя по допускаемой нагрузке.

2. В разработанной Центрометаллургавтоматикой новой схеме электромашинного регулятора нагрузки отсутствуют перечисленные выше недостатки. Благодаря этому обеспечена возможность управления нагруженным прокатным двигателем по оптимальным характеристикам с полным использованием его перегрузочной способности, а также обеспечена более надежная защита электропривода.

3. Проведенные экспериментальные исследования новой схемы регулятора нагрузки на действующих блумингах подтверждают целесообразность ее распространения.

Литература

1. В. И. Архангельский. Новая схема управления полем двигателя блуминга. Электричество, № 9, 1955.
2. А. Б. Челюсткин и Е. А. Розенман. Автоматическое управление прокатными станами. Госэнергоиздат, 1950.
3. Д. П. Морозов. Теория электропривода и автоматика реверсивных станов. Госэнергоиздат, 1949.

[20. 6. 1955]

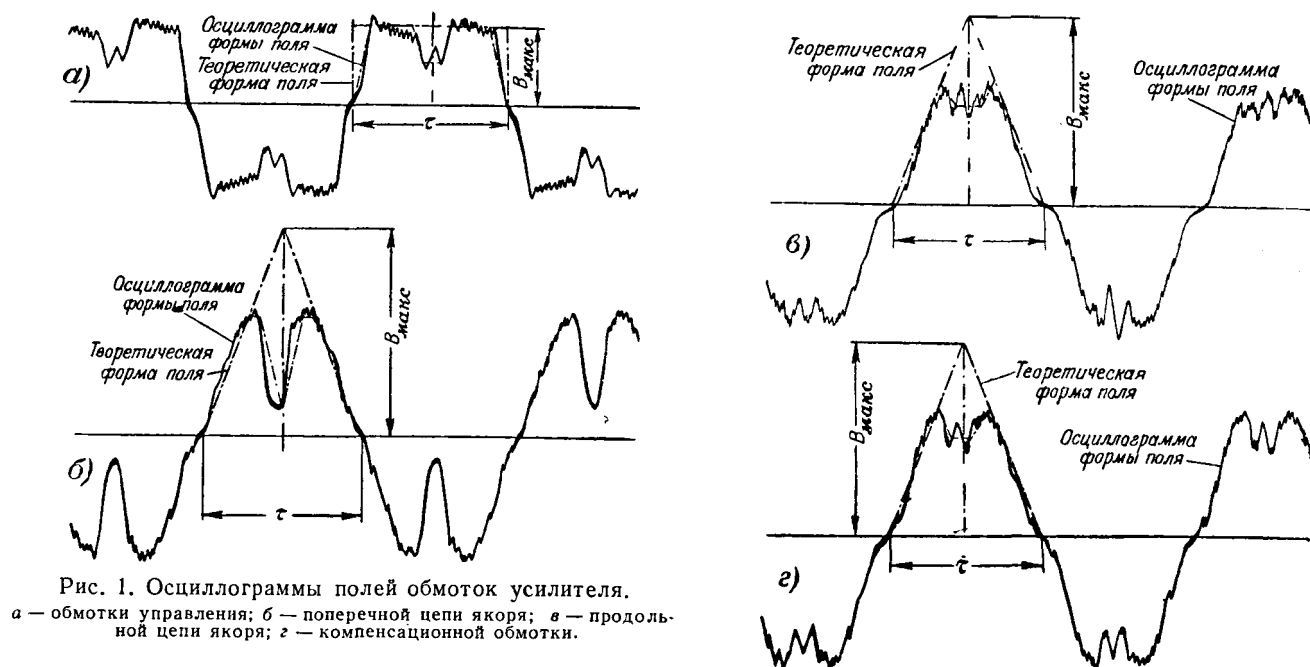


Рис. 1. Осциллограммы полей обмоток усилителя.
а — обмотки управления; б — поперечной цепи якоря; в — продольной цепи якоря; τ — компенсационной обмотки.

зора и неидеального распределения обмотки. Для учета этих факторов в указанные выше формулы должны быть введены поправочные коэффициенты.

На рис. 1 приведены осциллограммы полей обмоток усилителя мощностью 2,5 кВт. Для снятия осциллограмм в диаметрально противоположные пазы якоря усилителя была заложена обмотка, состоящая из нескольких витков тонкой проволоки, концы которой были выведены к двум контактным кольцам. При вращении якоря в этой обмотке наводилась э. д. с., пропорциональная индукции магнитного поля в воздушном зазоре, которая записывалась при помощи осциллографа.

На основе приведенных осциллограмм были определены поправочные коэффициенты: γ — для магнитных потоков; ξ — для индуктивностей (табл. 1).

Для других типов усилителя с двухполюсной магнитной системой приведенные коэффициенты могут быть приняты как некоторые средние величины.

Взаимоиндуктивность между двумя обмотками управления, если пренебречь рассеянием,

$$M_{12} = M_{21} = \sqrt{L_1 L_2},$$

где L_1 и L_2 — индуктивности обмоток управления, определенные с учетом действительных полей этих обмоток.

Эксперимент показывает достаточную точность приведенной формулы.

При определении взаимной индуктивности между обмоткой управления и компенсационной обмоткой необходимо учитывать форму поля и геометрию обмоток. В результате получаем:

$$M_{1\kappa} = M_{\kappa 1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\gamma_a}{\xi_a} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_\kappa} L_\kappa = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_a}{\gamma_1} \cdot \frac{\omega_a}{\omega_1} L_1, \quad (5)$$

где $L_\kappa = L_a$ — действительная индуктивность компенсационной обмотки.

Первое звено усилителя. Первым звеном является цепь управления усилителя, причем входной величиной звена служит напряжение, приложенное к цепи обмотки управления, а выходной — э. д. с. вращения поперечной цепи E_q .

При составлении дифференциальных уравнений первого звена необходимо учитывать влияние замкнутых контуров компенсационной обмотки и обмоток управления.

Дифференциальные уравнения первого звена усилителя (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + M_{1\kappa} \frac{di_\kappa}{dt} &= U_1(t); \\ L_\kappa \frac{di_\kappa}{dt} + (R_\kappa + R_w) i_\kappa + M_{\kappa 1} \frac{di_1}{dt} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Таблица 1

Поле обмотки	Действительный магнитный поток	Действительная индуктивность	Поправочные коэффициенты	
Управления	$\Phi_1 = \gamma_1 \Phi_{1m}$	$L_1 = \xi_1 L_{1m}$	$\gamma_1 = 0,8$	$\xi_1 \approx \gamma_1 = 0,8$
Якоря (продольное)	$\Phi_a = \gamma_a \Phi_{am}$	$L_a = \xi_a L_{am}$	$\gamma_a = 0,81$	$\xi_a = 0,7$
Якоря (поперечное)	$\Phi_q = \gamma_q \Phi_{qm}$	$L_q = \xi_q L_{qm}$	$\gamma_q = 0,65$	$\xi_q = 0,56$
Компенсационной (продольное)	$\Phi_\kappa = \gamma_\kappa \Phi_{\kappa m}$	$L_\kappa = \xi_\kappa L_{\kappa m}$	$\gamma_\kappa = 0,81$	$\xi_\kappa = 0,7$

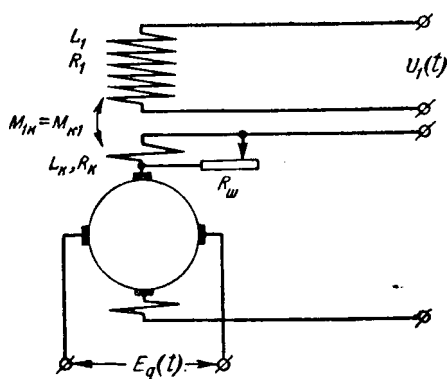


Рис. 2. Первое звено электромашинного усилителя.

Электродвижущая сила поперечной цепи

$$E_q = 4n_s \omega_a (k_1 i_1 + k_\kappa i_\kappa), \quad (7)$$

где

$$k_1 = \frac{L_1}{\omega_1}; \quad k_\kappa = \frac{M_{\kappa 1}}{\omega_1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\gamma_a}{\xi_a} \cdot \frac{L_\kappa}{\omega_a}; \quad (8)$$

n_s — скорость вращения якоря, об/сек.

Переходя к преобразованию Лапласа и решая уравнения (6) и (7) относительно E_q , получаем:

$$E_q(p) = m_1 \frac{T_\kappa \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\gamma_a^2}{\gamma_1 \xi_a}\right) p + 1}{T_1 T_\kappa \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\gamma_a^2}{\gamma_1 \xi_a}\right) p^2 + (T_1 + T_\kappa) p + 1} U_1(p), \quad (9)$$

где $m_1 = 4n_s \frac{\omega_a}{\omega_1} T_1$ — коэффициент усиления по напряжению первого звена усилителя;

$T_\kappa = \frac{L_\kappa}{R_\kappa + R_\text{ш}}$ — постоянная времени замкнутого контура компенсационной обмотки;

$T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ — постоянная времени обмотки управления.

Из уравнения (9) можно найти значение $E'_q(t)$ при $t=0$. Для случая, когда $U_1(t)$ представляет собой скачкообразную функцию, пользуясь известными теоремами [Л. 3], получаем:

$$E_{q t=0} = 0; \quad \left(\frac{dE_q}{dt}\right)_{t=0} = \frac{m_1}{T_1} U_1,$$

т. е. в первый момент времени после включения в цепь обмотки управления постоянного напряжения U_1 э. д. с. поперечной цепи усилителя нарастает с постоянной времени потока рассеяния обмотки управления, сцепленного с обмоткой якоря усилителя и не сцепленного с витками компенсационной обмотки. Приближенно величину E_{qs} , соответствующую потоку рассеяния, можно определить из уравнения (9).

Если пренебречь в знаменателе членом второго порядка, получим:

$$E_q(p) = m_1 \frac{T_\kappa \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\gamma_a^2}{\gamma_1 \xi_a}\right) p + 1}{(T_1 + T_\kappa) p + 1} U_1(p), \quad (10)$$

откуда при $t=0$

$$E_{qs} = m_1 \frac{T_\kappa \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\gamma_a^2}{\gamma_1 \xi_a}\right)}{T_1 + T_\kappa} U_1. \quad (11)$$

Характерный скачок э. д. с. поперечной цепи в начале переходного процесса хорошо виден на осциллограмме рис. 3, полученной при замкнутой накоротко компенсационной обмотке усилителя мощностью 5 кВт. По этой осциллограмме согласно (10) можно приближенно определить постоянную времени короткозамкнутого контура компенсационной обмотки $T_{\kappa 0}$, если постоянная времени обмотки управления T_1 известна (в данном случае $T_1 = 0,03$ сек). Нетрудно убедиться, что величина E_{qs} , вычисленная по формуле (11), близка к экспериментальной.

Обычно на практике $R_\text{ш} \gg R_\kappa$ и постоянная времени короткозамкнутого контура компенсационной обмотки оказывается в несколько раз меньше постоянной времени обмотки управления. Для этого случая величиной E_{qs} можно пренебречь и передаточную функцию первого звена усилителя с учетом влияния замкнутого контура компенсационной обмотки приближенно представить в виде:

$$\frac{E_q(p)}{U_1(p)} = \frac{m_1}{(T_1 + T_\kappa) p + 1}. \quad (12)$$

Коэффициент усиления первого звена усилителя с учетом влияния гистерезиса определяется по амплитудной частотной характеристике при $\omega \rightarrow 0$. Передаточная функция первого звена при наличии нескольких обмоток управления, замкнутых на активные сопротивления, и контура компенсационной обмотки будет:

$$\frac{E_q(p)}{U_1(p)} = \frac{m_1}{(\Sigma T_i + T_\kappa) p + 1},$$

где ΣT_i — сумма постоянных времени отдельных магнитно связанных контуров обмоток управления.

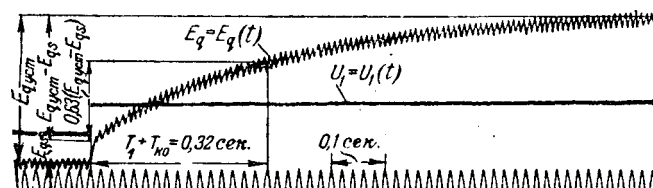


Рис. 3. Осциллограмма переходного процесса в первом звене усилителя мощностью 5 кВт при закороченной компенсационной обмотке.
 $T_1 = 0,003$ сек — постоянная времени обмотки управления; $T_{\kappa 0} \sim 0,29$ сек — постоянная времени контура закороченной компенсационной обмотки.

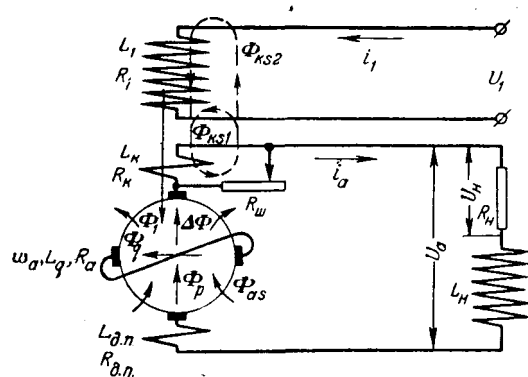


Рис. 4.

Холостой ход усилителя. Передаточная функция. На динамические характеристики усилителя при холостом ходе большое влияние оказывают три фактора: замедленная коммутация, сдвиг щеток (обычно по направлению вращения якоря) и потери в стали от перемагничивания якоря в поле поперечной цепи [Л. 1]. Действие всех этих факторов вызывает один и тот же эффект — появление размагничивающего потока, направленного по продольной оси навстречу потоку управления (рис. 4). Можно считать, что суммарный размагничивающий поток пропорционален потоку поперечной цепи, т. е. составляет некоторую часть χ от поперечного потока Φ_q . С учетом влияния потока Φ_p передаточная функция усилителя при холостом ходе (приложение I) запишется в следующем виде:

$$K_o(p) = \frac{E_a(p)}{U_1(p)} = \frac{m_1 m_q}{1 + \chi m_q} \times \frac{1}{\frac{T_y T_q}{1 + \chi m_q} p^2 + \frac{T_y + T_q}{1 + \chi m_q} p + 1}, \quad (13)$$

где $m_q = 6n_s T_q \frac{\gamma_q}{\xi_q}$ — коэффициент усиления по напряжению второго звена¹ усилителя;

$T_q = \frac{L_q}{R_a}$ — постоянная времени второго звена;

T_y — суммарная постоянная времени цепи управления (с учетом взаимной индукции между обмотками).

Из (13) следует, что действие размагничивающего потока Φ_p аналогично действию внутренней отрицательной жесткой обратной связи: коэффициент усиления и коэффициенты при первой и второй производных уменьшаются в $1 + \chi m_q$ раз.

Передаточную функцию (13) удобно привести к виду:

¹ Вторым звеном электромашиного усилителя, в котором э. д. с. поперечной цепи служит входом, а э. д. с. вращения продольной цепи выходом, является короткозамкнутая поперечная цепь якоря.

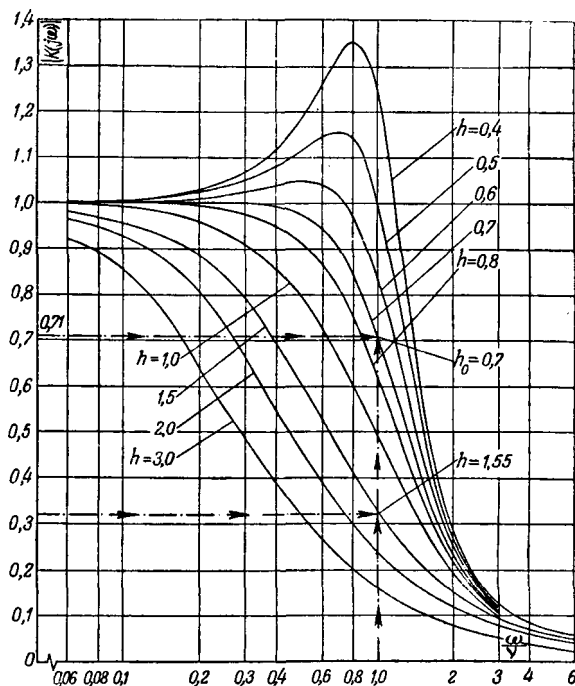


Рис. 5. Расчетные амплитудные частотные характеристики идеального колебательного звена.

$$K_o(p) = \frac{K_o \nu_o^2}{p^2 + 2h_o \nu_o p + \nu_o^2}; \quad (14)$$

$$K_o = \frac{m_1 m_q}{1 + \chi m_q}; \quad \nu_o^2 = \frac{1 + \chi m_q}{T_y + T_q}; \quad 2h_o \nu_o = \frac{T_y + T_q}{T_y T_q}, \quad (15)$$

где ν_o — собственная частота усилителя;

h_o — коэффициент затухания.

Полагая $p = j\omega$ после некоторых преобразований, получаем для модуля и аргумента частотной функции усилителя следующие выражения:

$$|K_o(j\omega)| = \frac{K_o}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\nu_o}\right)^2\right]^2 + 4h_o^2 \left(\frac{\omega}{\nu_o}\right)^2}}; \quad (16)$$

$$\arg K_o(j\omega) = \arctg \left[-\frac{2h_o \frac{\omega}{\nu_o}}{1 - \left(\frac{\omega}{\nu_o}\right)^2} \right]. \quad (17)$$

Расчетная амплитудная частотная характеристика, построенная по формуле (16) для разных значений h_o и $K_o = 1$, приведена на рис. 5.

Отметим, что согласно (17) при $\frac{\omega}{\nu_o} = 1$ аргумент частотной функции независимо от величины h_o равен -90° .

Определение параметров. На рис. 6 представлены экспериментальные амплитудная² и фазовая частотные характеристики усилителя мощностью 2,5 квт. Там же указаны некоторые обмоточные данные машины и параметры пер-

² Для удобства сравнения амплитудные частотные характеристики усилителя здесь и в дальнейшем приведены к коэффициенту усиления, равному единице.

вого звена: постоянные времени и коэффициент усиления по напряжению обмотки управления. По этим характеристикам, пользуясь расчетными кривыми (рис. 5), легко определить коэффициенты передаточной функции ν_o и h_o . Для определения ν_o проводим через точку $\arg K_o(j\omega) = -90^\circ$ прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с фазовой характеристикой. Тогда согласно (17)

$$\nu_o = 2\pi f_o = 6,28 \cdot 3,33 = 21 \frac{1}{\text{сек}},$$

где f_o — частота, соответствующая точке пересечения.

При помощи простого построения, сущность которого ясна из рис. 5 и 6, по расчетным амплитудным частотным характеристикам теперь легко определить h_o . Из графика рис. 5 получаем $h_o = 0,7$.

Коэффициент усиления по напряжению K_o с учетом влияния гистерезиса определяется по амплитудной частотной характеристике. У рассматриваемого усилителя $K_o = 10$ (при включенном в обмотку управления дополнительном сопротивлении $R_{\partial 1} = 760 \text{ ом}$).

Зная коэффициенты K_o , ν_o и h_o из уравнений (15), можно определить неизвестные параметры усилителя: коэффициент усиления второго звена m_q , постоянную времени второго звена T_q и коэффициент внутренней жесткой обратной связи χ .

Для m_q , T_q и χ получаем:

$$T_q = \frac{T_y}{2h_o\nu_o T_y - 1};$$

$$m_q = K_o \frac{\nu_o^2 T_y T_q}{m_1};$$

$$\chi = \frac{\nu_o^2 T_y T_q - 1}{m_q}.$$

Подставив значения коэффициентов K_o , ν_o и h_o , получим $m_q = 32$, $\chi = 0,041$, $T_q = 0,105 \text{ сек}$.

Для линейного участка кривой намагничивания и данного положения щеток эти параметры усилителя являются постоянными. Из полученных числовых данных следует, что внутренняя жесткая обратная связь уменьшает коэффициент усиления усилителя в режиме холостого хода в 2,3 раза.

На рис. 6 пунктиром изображены расчетные частотные характеристики, соответствующие най-

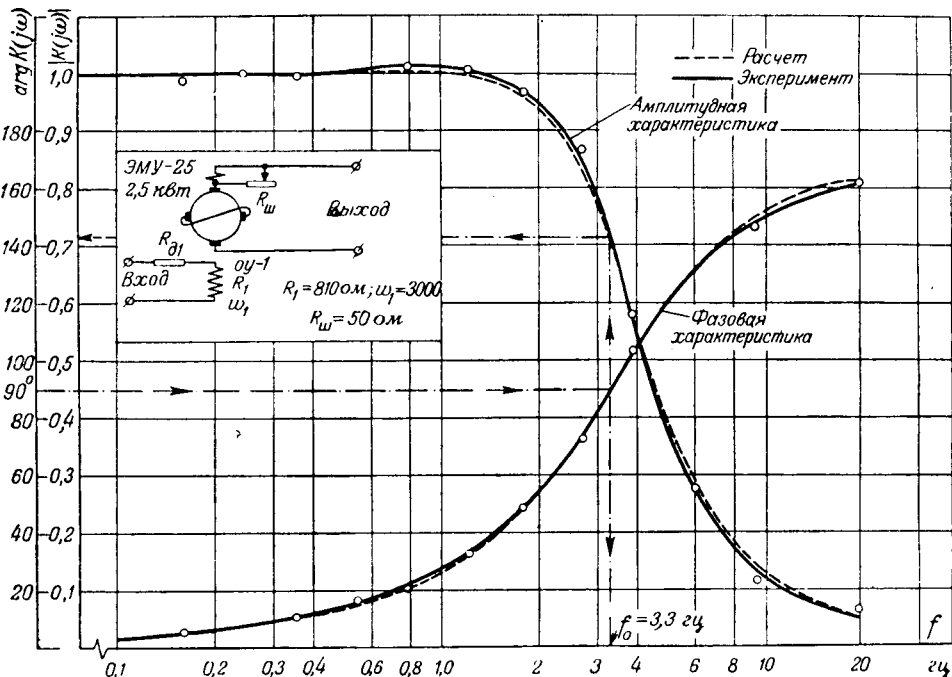


Рис. 6. Частотные характеристики усилителя мощностью 2,5 кВт при холостом ходе.

$$R_{\partial 1} = 760 \text{ ом}; T_y = T_1 + T_k = 0,047 + 0,003 = 0,05 \text{ сек}; m_1 = 0,72.$$

денным коэффициентам передаточной функции. Хорошее совпадение экспериментальных и расчетных кривых показывает, что электромашинный усилитель в режиме холостого хода можно считать идеальным колебательным звеном.

Работа усилителя при активной нагрузке. Исследование динамических свойств усилителя при активной нагрузке дает возможность выяснить влияние и определить величину внутренних обратных связей, обусловливаемых током нагрузки, протекающим в его продольной цепи.

Передаточная функция. На динамические характеристики нагруженного усилителя оказывают большое влияние следующие факторы: поток недокомпенсации $\Delta\Phi$, потоки рассеяния компенсационной обмотки $\Phi_{\kappa S_1}$ и $\Phi_{\kappa S_2}$ (рис. 4, приложение II) и поток рассеяния лобовых частей якорной обмотки Φ_{as} , которые составляют некоторую часть от продольного потока якоря Φ_a .

Перечисленные потоки пропорциональны току нагрузки i_a и создают в усилителе внутренние гибкие и жесткие обратные связи [Л. 1]. Поток недокомпенсации $\Delta\Phi$ создает отрицательную жесткую обратную связь; потоки $\Phi_{\kappa S_1}$ и $\Phi_{\kappa S_2}$, действие которых можно заменить одним эквивалентным потоком Φ_{κ} , создают отрицательную гибкую обратную связь, и, наконец, поток рассеяния лобовых частей якоря создает как жесткую, так и гибкую отрицательные обратные связи. Поскольку коэффициенты передаточной функции усилителя определяются по экспериментальным частотным характеристикам, то можно считать, что в нагруженном усилителе действуют только два потока обратных связей: поток недокомпенсации $\Delta\Phi = \eta_1 \Phi_a$ и поток рас-

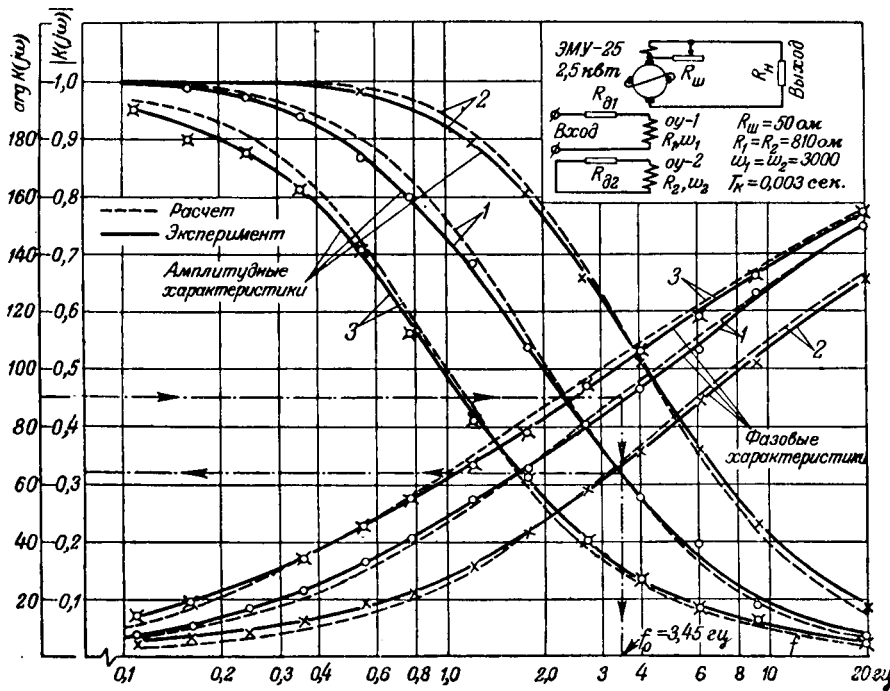


Рис. 7. Частотные характеристики усилителя мощностью 2,5 кВт при активной нагрузке ($R_n = 21 \text{ ом}$).

1 — при $R_{\delta 1} = 760 \text{ ом}$, $R_{\delta 2} > R_2$ (обмотка оу-2 разомкнута), $T_y = T_1 + T_k = 0,047 + 0,003 = 0,05 \text{ сек}$; 2 — при $R_{\delta 1} = 4400 \text{ ом}$ (обмотка оу-2 разомкнута), $T_y = T_1 + T_k = 0,014 + 0,003 = 0,017 \text{ сек}$; 3 — при $R_{\delta 1} = 760 \text{ ом}$ (обмотка оу-2 замкнута), $T_y = T_1 + T_2 + T_k = 0,047 + 0,09 + 0,003 = 0,14 \text{ сек}$.

сеяния компенсационной обмотки $\Phi_{ks} = \eta_2 \Phi_a$, где η_1, η_2 — коэффициенты, учитывающие также и влияние потока рассеяния лобовых частей якоря Φ_{as} .

Передаточная функция электромашинного усилителя при активной нагрузке (приложение II) имеет вид:

$$K(p) = \frac{U_a(p)}{U_1(p)} = \frac{Kv^2}{p^2 + 2hvp + v^2}, \quad (18)$$

причем ее коэффициенты выражаются через соответствующие коэффициенты передаточной функции холостого хода и дополнительные слабые, являющиеся следствием действия перечисленных внутренних обратных связей от тока нагрузки:

$$2hv = \frac{T_y + T_q}{T_y T_q} + \chi_2 \frac{am_q^2}{T_q} = 2h_o v_o + \chi_2 \frac{am_q^2}{T_q}; \quad (19)$$

$$v^2 = \frac{1 + \chi m_q}{T_y T_q} + \chi_1 \frac{am_q^2}{T_y T_q} = v_o^2 + \chi_1 \frac{am_q^2}{T_y T_q}; \quad (20)$$

$$K = \frac{m_1 m_q m_n}{1 + \chi m_q + \chi_1 am_q^2}. \quad (21)$$

Здесь

$$\chi_1 = \eta_1 \frac{\gamma_a}{\gamma_q}; \quad \chi_2 = \eta_2 \frac{\gamma_a}{\gamma_q};$$

$$\alpha = \frac{R_a}{R_a + R_k + R_{\delta n} + R_n}; \quad (22)$$

$$m_n = \frac{R_n}{R_a + R_k + R_{\delta n} + R_n}, \quad (23)$$

где R_a, R_k и $R_{\delta n}$ — сопротивления соответственно обмотки якоря (вместе со щетками), компенсационной обмотки и обмотки дополнительных полюсов; R_n — сопротивление нагрузки.

Коэффициент при p передаточной функции нагруженного усилителя увеличивается, как показывает эксперимент, значительно больше, чем его собственная частота v , вследствие чего переходные процессы в нагруженном усилителе даже при сильной недокомпенсации протекают медленнее, чем при холостом ходе.

Определение параметров. Коэффициенты передаточной функции (18) для данной активной нагрузки определяются таким же путем, как и при холостом ходе по соответствующим частотным характеристикам. Коэффициенты передаточной функции усилителя мощностью 2,5 кВт при активной нагрузке $R_n = 21 \text{ ом}$ и недокомпен-

сации³ 0,24%, вычисленные по экспериментальным частотным характеристикам, приведенным на рис. 7 (кривые 1), имеют следующие значения: $2hv = 68$; $v^2 = 460$; $K = 8,6$.

Коэффициенты передаточной функции усилителя для других сопротивлений нагрузки и степени компенсации, если при этом известны значения коэффициентов внутренних обратных связей χ_1 и χ_2 , определяются по формулам (19)...(21).

Как показывает эксперимент, коэффициент χ_2 , характеризующий в основном рассеяние компенсационной обмотки, можно считать (если магнитная цепь усилителя не насыщена) постоянным и независимым от сопротивления нагрузки и степени компенсации. Из уравнения (19) получаем:

$$\chi_2 = \frac{T_q}{am_q^2} (2hv - 2h_o v_o), \quad (24)$$

где коэффициент α для данного сопротивления нагрузки подсчитывается по формуле (22). Для рассматриваемого случая ($R_a = 1,63 \text{ ом}$, $R_k = 1,1 \text{ ом}$, $R_{\delta n} = 0,3 \text{ ом}$) $\alpha = 0,068$ и $\chi_2 = 0,056$.

Коэффициент χ_1 , характеризующий главным образом влияние некомпенсированного про-

³ Степень компенсации усилителя определяется по формуле $\delta = \left(1 - \frac{R_{ш}}{R_{ш0}} \frac{R_k + R_{ш0}}{R_k + R_{ш}}\right) 100\%$, где $R_{ш0} = 56 \text{ ом}$ — шунтирующее сопротивление, соответствующее полной компенсации при номинальном режиме.

дольного потока якоря, напротив, зависит и от степени компенсации усилителя и от величины сопротивления нагрузки. При данной нагрузке и степени компенсации для его определения можно воспользоваться выражением (20) или (21). Из (20), например, получаем:

$$\chi_1 = \frac{T_y T_q (v^2 - v_0^2)}{a m_q^2} \quad (25)$$

Для сопротивления нагрузки $R_n = 21 \text{ ом}$ и недокомпенсации 0,24% получаем $\chi_1 = 0,003$. Расчетные кривые, вычисленные по данным эксперимента, приведены на рис. 7 пунктиром.

Влияние постоянных времени и взаимоиндукции обмоток управления. На рис. 7 представлены частотные характеристики усилителя при включенном в обмотку управления дополнительном сопротивлении, равном 4 400 ом (кривые 1). Кривые 3 получены для $R_{\partial 1} = 760 \text{ ом}$ при замкнутой накоротко обмотке управления $ou-2$.

Кривые 1 и 3 показывают, что динамические свойства усилителя при увеличении постоянной времени цепи управления существенно ухудшаются.

Для обоих случаев коэффициенты передаточной функции усилителя вычисляются по формулам (19) и (20). Соответствующие расчетные кривые приведены на рис. 7 пунктиром.

Влияние сопротивления нагрузки и степени компенсации. Влияние сопротивления нагрузки и степени компенсации на динамические свойства усилителя иллюстрируется экспериментальными частотными характеристиками, приведенными на рис. 8 и 9.

По этим графикам можно для каждого сопротивления нагрузки и степени компенсации по формуле (25) определить коэффициент χ_1 .

Такая экспериментальная зависимость $\chi_1 = f\left(\frac{R_n}{R_{n \text{ ном}}}, R_{\partial 1}\right)$ для усилителя мощностью 2,5 кВт приведена на рис. 10. Величина коэффициента χ_2 , как уже указывалось, при изменении сопротивления нагрузки и степени компенсации

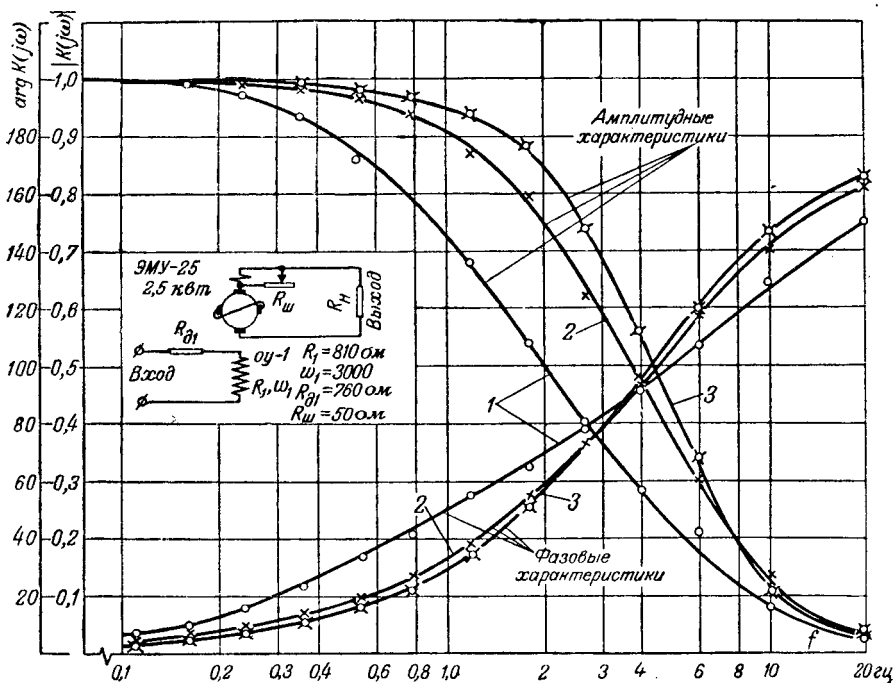


Рис. 8. Частотные характеристики усилителя мощностью 2,5 кВт при различных активных нагрузках и степени недокомпенсации 0,24%.
1 — при $R_n = 21 \text{ ом}$; 2 — при $R_n = 60 \text{ ом}$; 3 — при $R_n = 135 \text{ ом}$.

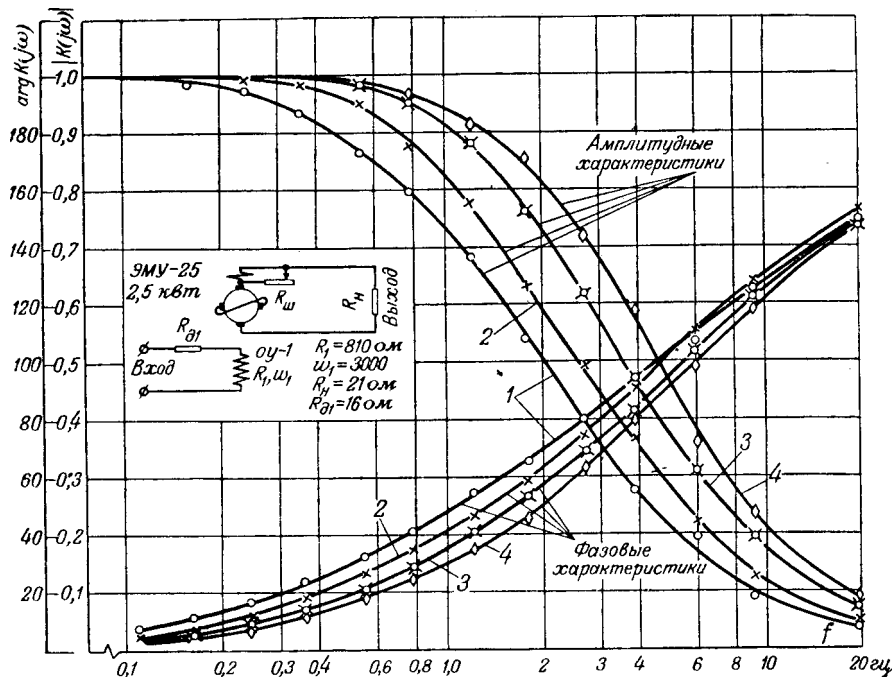


Рис. 9. Частотные характеристики усилителя мощностью 2,5 кВт при различной степени компенсации и $R_n = 21 \text{ ом}$.

1 — при $R_{\partial 1} = 50 \text{ ом}$ и недокомпенсации 0,24%; 2 — при $R_{\partial 1} = 40 \text{ ом}$ и недокомпенсации 0,77%; 3 — при $R_{\partial 1} = 30 \text{ ом}$ и недокомпенсации 1,65%; 4 — при $R_{\partial 1} = 20 \text{ ом}$ и недокомпенсации 3,3%.

пенсации примерно остается постоянной, в чем можно убедиться, если вычислить его, пользуясь формулой (24), для ряда случаев по графикам рис. 8 и 9.

На рис. 8 и 9, чтобы не затемнять чертежи, расчетные частотные характеристики усилителя не показаны, однако они хорошо совпадают с экспериментальными.

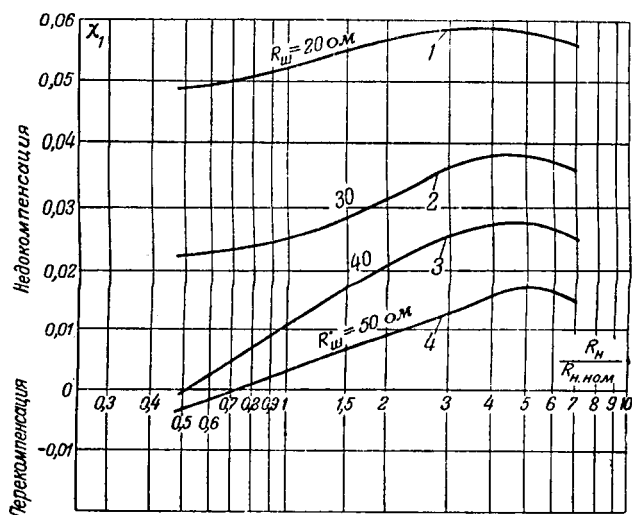


Рис. 10. Зависимость коэффициента внутренней жесткой обратной связи χ_1 от степени компенсации и сопротивления нагрузки.

1 — при недокомпенсации 3,3%; 2 — при недокомпенсации 1,65%; 3 — при недокомпенсации 0,77%; 4 — при недокомпенсации 0,24%.

Параметры усилителя. Параметры усилителя мощностью 2,5 кВт, необходимые для вычисления коэффициентов его передаточной функции, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические данные	Обозначение	Величина
Общие технические данные:		
номинальная мощность, кВт	$P_{ном}$	2,5
номинальное напряжение, в	$U_{ном}$	230
номинальный ток, а	$I_{ном}$	10,9
номинальная скорость вращения, об/мин	$n_{ном}$	2850
количество обмоток управления		2
число витков обмоток управления оу-1 и оу-2	$w_1; w_2$	3 000
сопротивление обмоток управления оу-1 и оу-2, ом	$R_1; R_2$	810
Сопротивление обмотки якоря вместе со щетками *, ом	R_a	1,63
Сопротивление компенсационной обмотки, ом	R_k	1,1
Сопротивление обмотки дополнительных полюсов, ом	$R_{дп}$	0,3
Постоянная времени контура компенсационной обмотки (для $R_{ш} = 0$), сек	$T_{ко}$	0,135
Постоянные времени обмоток управления оу-1 и оу-2, сек	$T_1; T_2$	0,09
Коэффициент усиления по напряжению первого звена для обмоток управления оу-1 и оу-2	$m_1; m_2$	1,4
Постоянная времени короткозамкнутой цепи, сек	T_q	0,105
Коэффициент усиления по напряжению второго звена	m_q	32
Коэффициент усиления внутренней жесткой обратной связи при холостом ходе	χ	0,041
Коэффициент внутренней гибкой обратной связи при нагрузке	χ_2	0,056
Зависимость коэффициента внутренней жесткой обратной связи χ_1 от сопротивления нагрузки и степени компенсации		Представлена на рис. 10

* Сопротивление щеток определено методом вольтметра-амперметра при вращающемся якоре для номинального тока якоря

Коэффициент χ обычно возрастает с увеличением мощности усилителя. По экспериментальным данным для усилителя мощностью 10 кВт коэффициент усиления по напряжению при холостом ходе вследствие действия внутренней жесткой обратной связи уменьшается примерно в 5...6 раз, а для усилителя мощностью 0,8 кВт — только в 1,5...1,6 раза.

Коэффициент χ_2 зависит от выполнения компенсационной обмотки и тем больше, чем с большим запасом по виткам она выполнена. Чем больше коэффициент χ_2 , тем сильнее ухудшаются динамические свойства усилителя при нагрузке.

Пример расчета переходного процесса в усилителе по данным табл. 2. Произведем расчет коэффициентов передаточной функции и переходного процесса в усилителе для следующего случая: степень недокомпенсации усилителя составляет 0,77% ($R_{ш} = 40$ ом), сопротивление нагрузки $R_k = 21$ ом; обмотка управления оу-2 замкнута накоротко; постоянное напряжение U_1 прикладывается к обмотке оу-1; дополнительное сопротивление в цепи обмотки оу-1 $R_{д1} = 0$.

Постоянная времени контура компенсационной обмотки

$$T_k = T_{ко} R_k \frac{1}{R_k + R_{ш}} = 0,135 \cdot 1,1 \frac{1}{1,1 + 40} = 0,0036 \text{ сек.}$$

Для $R_k = 21$ ом получаем:

$$\begin{aligned} a &= \frac{R_a}{R_a + R_k + R_{дп} + R_{ш}} = \\ &= \frac{1,63}{1,63 + 1,1 + 0,3 + 21} = 0,068; \\ m_k &= \frac{R_k}{R_a + R_k + R_{дп} + R_{ш}} = \\ &= \frac{21}{1,63 + 1,1 + 0,3 + 21} = 0,875; \\ 2h\nu &= \frac{T_1 + T_2 + T_k + T_q + \chi_2 \frac{am_q^2}{T_q}}{(T_1 + T_2 + T_k) T_q} = \\ &= \frac{0,09 + 0,09 + 0,0036 + 0,105}{(0,09 + 0,09 + 0,0036) 0,105} + \\ &+ 0,056 \frac{0,068 \cdot 32^2}{0,105} = 52 \frac{1}{\text{сек}}. \end{aligned}$$

Для заданной (0,77%) недокомпенсации усилителя и

$\frac{R_k}{R_{ш ном}} = 1$ по кривым рис. 10 находим $\chi_1 = 0,011$. Тогда

$$\begin{aligned} \nu^2 &= \frac{1 + \chi m_q}{(T_1 + T_2 + T_k) \cdot T_q} + \chi_1 \frac{am_q^2}{(T_1 + T_2 + T_k) T_q} = \\ &= \frac{1 + 0,041 \cdot 32}{(0,09 + 0,09 + 0,0036) 0,105} + \\ &+ 0,011 \frac{0,068 \cdot 32^2}{(0,09 + 0,09 + 0,0036) \cdot 0,105} = 160; \end{aligned}$$

$$K = \frac{m_1 m_q m_k}{1 + \chi m_q + \chi_1 a m_q} =$$

$$= \frac{1,4 \cdot 32 \cdot 0,875}{1 + 0,041 \cdot 32 + 0,011 \cdot 0,068 \cdot 32^2} = 12,7.$$

Передаточная функция усилителя

$$K(p) = \frac{U_a(p)}{U_1(p)} = \frac{160 \cdot 12,7}{p^2 + 52p + 160},$$

откуда

$$U_a(p) = 12,7 \cdot U_1(p) \frac{1}{0,00625p^2 + 0,325p + 1}.$$

Для случая скачкообразного изменения напряжения $U_1(t)$

$$U_a(t) = 12,7 U_1 (1 - 1,07e^{-3,2t} + 0,07e^{-49t}).$$

Расчетный переходный процесс, вычисленный по этой формуле, приведен на осциллограмме рис. 11.

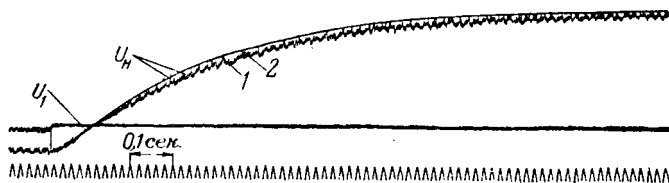


Рис. 11. Расчетный (1) и экспериментальный (2) переходные процессы в усилителе мощностью 2,5 квт при активной нагрузке.

$R_k = 21 \text{ ом}$; $R_{ш} = 40 \text{ ом}$; $R_{\partial 1} = R_{\partial 2} = 0$; U_k — напряжение на нагрузке; U_1 — напряжение, приложенное к обмотке управления.

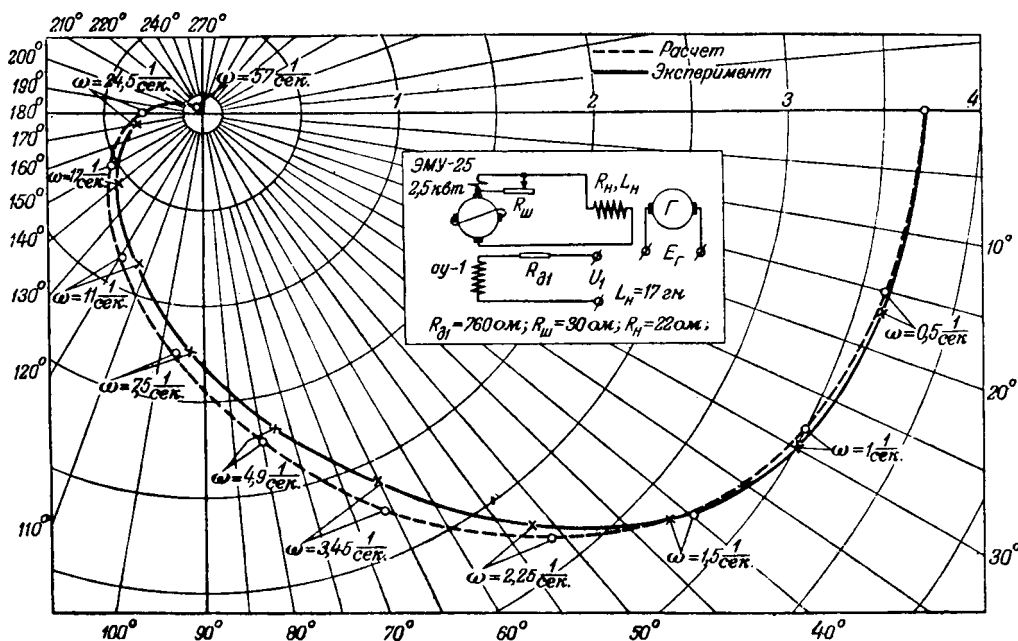


Рис. 12. Экспериментальная и расчетная частотные характеристики системы усилитель — генератор.

Работа усилителя, нагруженного на обмотку возбуждения генератора. Коэффициенты передаточной функции системы, состоящей из усилителя и генератора, выражаются через коэффициенты передаточных функций усилителя при холостом ходе, соответствующей активной нагрузке и параметры цепи возбуждения генератора⁴.

Передаточная функция системы имеет следующий вид:

$$K_1(p) = \frac{E_2(p)}{U_1(p)} = \frac{K m_2}{\frac{T_z}{v^2} p^3 + \left(\frac{1 + 2h_0 v_0 T_z}{v^2} \right) p^2 + \left(\frac{2h v_0 + v_0^2 T_z}{v^2} \right) p + 1}, \quad (26)$$

где

E_2 — э. д. с. генератора;
 m_2 — коэффициент усиления генератора по напряжению;

$T_z = \frac{L_k}{R_a + R_{\partial n} + R_k + R_k}$ — постоянная времени цепи возбуждения генератора.

Экспериментальная и расчетная амплитудно-фазовые частотные характеристики системы приведены на рис. 12. Там же указаны параметры усилителя и генератора.

Выводы. 1. Частотные характеристики электромашиного усилителя, полученные опытным путем, позволяют с наибольшей полнотой выявить влияние на его динамические свойства внутренних обратных связей, взаимоиндукции обмоток управления, степени компенсации и нагрузки.

2. По экспериментальным частотным характеристикам можно с минимальной затратой времени и максимальной точностью определить все

основные параметры усилителя: постоянные времени и коэффициенты усиления первого и второго звеньев, а также коэффициенты внутренних гибких и жестких обратных связей как в режиме холостого хода, так и при нагрузке.

3. Определение параметров усилителя непосредственно по экспериментальным частотным характеристикам позволяет значительно упростить передаточную функцию, так как в этом случае при выводе дифференциальных уравнений

⁴ Доказательство приведено в приложении II.

усилителя нет необходимости различать факторы, вызывающие один и тот же динамический эффект.

4. Сочетание теоретического исследования с экспериментальным позволяет, пользуясь экспериментальными данными, полученными для одного режима, вычислять по формулам (15) и (19) ... (21) коэффициенты передаточной функции усилителя для различных нагрузок, степени компенсации и дополнительных сопротивлений в цепях обмоток управления.

5. Метод экспериментальных частотных характеристик может быть также с успехом использован для исследования динамических свойств, определения параметров и передаточных функций и других типовых элементов автоматизированного электропривода: стабилизирующих трансформаторов, генераторов, двигателей, магнитных усилителей и т. п.

Это даст возможность представлять сложные системы в виде комбинации элементарных звеньев, точно описывающих действительные физические процессы, легко вычислять коэффициенты отдельных передаточных функций и тем самым позволит эффективно использовать для расчета динамики автоматизированных промышленных электроприводов последние достижения современной теории автоматического регулирования.

Приложение I. Дифференциальные уравнения электромагнитного усилителя при холостом ходе с учетом влияния размагничивающего потока $\Phi_p = \chi \Phi_q$ (рис. 4) имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} (L_1 p + R_1) i_1 &= U_1 + \chi \omega_1 p_1 \Phi_q; \\ \Phi_1 &= k_1 i_1; \\ E_q &= 4 n_s \omega_a \Phi_1 - \chi E_a; \\ (L_q p + R_a) i_q &= F_q; \\ \Phi_q &= k_q i_q; \\ E_a &= 4 n_s \omega_a \Phi_q, \end{aligned} \right\} \quad (I,1)$$

где E_a — э. д. с. усилителя;

R_a — сопротивление короткозамкнутой цепи вместе со щетками.

Из уравнений (3), (4) и табл. I для коэффициента k_q получаем:

$$k_q = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_q}{\omega_a} \cdot \frac{\gamma_q}{\xi_q}.$$

После преобразований система уравнений (I,1) приводится к виду:

$$\left. \begin{aligned} (T_1 p + 1) E_q &= m_1 U_1 - \chi E_a; \\ (T_q p + 1) E_a &= m_q E_q. \end{aligned} \right\} \quad (I,2)$$

Решая последние уравнения относительно E_a , получим выражение (13) для передаточной функции усилителя:

$$K_o(p) = \frac{m_1 m_q}{1 + \chi m_q} \cdot \frac{1}{\frac{T_y T_q}{1 + \chi m_q} p^2 + \frac{T_y + T_q}{1 + \chi m_q} p + 1}.$$

Приложение II. Рассмотрим более сложный случай (рис. 4) нагрузки усилителя на сопротивление R_κ и индуктивность L_κ (например, обмотку возбуждения генератора). Учитывая дополнительные обратные связи при нагрузке, создаваемые приведенным потоком рассеяния $\Phi_{\kappa s}$ и потоком недокомпенсации $\Delta \Phi$, действие которого аналогично действию размагничивающего потока Φ_p , получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (T_1 p + 1) \frac{E_q}{m_1} &= U_1 - \frac{\chi}{m_1} E_a - \\ &- \eta_1 \frac{\omega_1}{T_1} \Phi_a - \eta_2 \omega_1 p \Phi_a; \\ (T_q p + 1) E_a &= m_q E_q; \\ (T_\kappa p + 1) U_\kappa &= m_\kappa E_a, \end{aligned} \right\} \quad (II,1)$$

где $T_\kappa = \frac{L_\kappa}{R_a + R_\kappa + R_{\partial n} + R_\kappa}$ — постоянная времени цепи нагрузки (индуктивность якорных обмоток усилителя не учитывается);

$$m_\kappa = \frac{R_\kappa}{R_a + R_\kappa + R_{\partial n} + R_\kappa}.$$

Согласно (5) и (6) поток Φ_a выражается через падение напряжения на сопротивлении R_κ следующим образом:

$$\Phi_a = \frac{\gamma_a}{\xi_a} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_a}{\omega_a} \cdot \frac{U_\kappa}{R_\kappa}.$$

Выражая индуктивность якоря по продольной цепи L_c через индуктивность якоря по поперечной цепи L_q , получим:

$$\Phi_a = \frac{3}{2} \cdot \frac{\gamma_a}{\xi_a} \cdot \frac{L_q}{\omega_a} \cdot \frac{U_\kappa}{R_\kappa}.$$

Подставив значение Φ_a в (II,1) и решив систему уравнений относительно U_κ , получим:

$$\left(\frac{T_1 T_q}{1 + \chi m_q} p^2 + \frac{T_1 + T_q}{1 + \chi m_q} p + 1 \right) (T_\kappa p + 1) U_\kappa = \\ = \frac{m_1 \cdot m_q \cdot m_\kappa}{1 + \chi m_q} U_1 - \frac{m_q^2 \alpha}{1 + \chi m_q} \chi_1 U_\kappa - T_1 \cdot \frac{m_q^2 \alpha}{1 + \chi m_q} \cdot \chi_2 p U_\kappa, \quad (II,2)$$

где

$$\chi_1 = \eta_1 \frac{\gamma_a}{\gamma_q};$$

$$\chi_2 = \eta_2 \frac{\gamma_a}{\gamma_q};$$

$$\alpha = \frac{R_a}{R_a + R_\kappa + R_{\partial n} + R_\kappa}.$$

В случае $L_\kappa = 0$, $T_\kappa = 0$ и уравнение (II,2) приобретает вид:

$$\left[\frac{T_y T_q}{1 + \chi m_q + \chi_1 \alpha m_q^2} p^2 + \right. \\ \left. + \frac{T_y + T_q + \chi_2 T_y \alpha m_q^2}{1 + \chi m_q + \chi_1 \alpha m_q^2} p + 1 \right] U_a = \\ = \frac{m_1 m_q m_\kappa}{1 + \chi m_q + \chi_1 \alpha m_q^2} U_1, \quad (II,3)$$

где T_y — суммарная постоянная времени цепи управления с учетом взаимной индукции обмоток.

Электропривод с импульсным управлением скоростью асинхронного двигателя

Доцент Н. Н. КРЕЧЕТОВИЧ

Белорусский институт механизации и электрификации
сельского хозяйства

В последнее время в технике электропривода получает распространение метод регулирования скорости вращения небольших двигателей путем периодических замыканий и размыканий той или иной части электрической цепи двигателя [Л. 1].

Теория этого метода, получившего название импульсного, подробно разработана В. С. Кулебакиным [Л. 2]. Под его руководством созданы замкнутые импульсные системы автоматического регулирования с диапазоном 1:1500.

Импульсный метод впервые появился и получил широкое распространение для двигателей постоянного тока; в настоящее время он начал применяться и для асинхронных двигателей [Л. 1]. Здесь перед ним открываются широкие перспективы вследствие трудности регулирования асинхронных двигателей другими способами. Даже наиболее современный способ регулирования — привод с дроссельным управлением не дает возможности точно сохранять заданное значение скорости двигателей при холостом ходе, тогда как при импульсном методе это легко достигается.

Однако импульсные схемы регулирования скорости получили распространение пока только для малых двигателей вследствие тяжелых условий работы, обусловленной большой частотой импульсов и значительным увеличением токов при снижении скорости, что особенно затрудняет импульсное регулирование асинхронных двигателей.

Для двигателей большой мощности при необходимости регулирования их скорости обычно используется введение в цепь ротора сопротивления. Этот способ, как известно, обладает существенными недостатками:

а) механическая характеристика двигателя при введении в цепь ротора добавочного сопротивления становится мягкой, вследствие чего из-

менение нагрузки сопровождается значительным изменением скорости;

б) пределы регулирования скорости зависят от степени загрузки двигателя, суживаясь при уменьшении нагрузки;

в) регулирование скорости при холостом ходе практически невозможно.

Поэтому регулирование скорости вращения двигателей путем изменения величины сопротивления в цепи ротора широко применяется только при относительно неизменной нагрузке. Всякое изменение нагрузки и особенно полный сброс ее резко изменяет скорость, что во многих случаях является недопустимым и приводит к необходимости отказа от применения асинхронных двигателей и перехода на электропривод постоянного тока.

Между тем применение импульсного метода совместно с изменением сопротивления в цепи ротора асинхронного двигателя позволяет освободиться как от недостатков импульсного метода, заключающихся в значительной величине коммутруемых токов, так и от недостатков обычного способа регулирования, перечисленных выше.

Для этой цели применяется принципиальная схема, приведенная на рис. 1, а. К тахогенератору ТГ через переменное сопротивление r подключено реле напряжения. При повышении скорости до величины ω'' реле напряжения срабатывает и устанавливает цепь питания промежуточного реле, которое при этом размыкает цепь катушки контактора К и вызывает его отключение.

При уменьшении скорости до величины ω' реле напряжения размыкает свои контакты, что влечет за собой замыкание контактов промежуточного реле и включение контактора К. Таким образом, получается замкнутая система автоматического регулирования (стабилизации) релейного дейст-

Вводя обозначения

$$2h\nu = \frac{T_y + T_q}{T_y T_q} + \chi_2 \frac{am_q^2}{T_q} = 2h_0\nu_0 + \chi_2 \frac{am_q^2}{T_q};$$

$$\nu^2 = \frac{1 + \chi m_q}{T_y T_q} + \chi_1 \frac{am_q^2}{T_y T_q} = \nu_0^2 + \chi_1 \frac{am_q^2}{T_y T_q};$$

$$K = \frac{m_1 m_q m_\kappa}{1 + \chi m_q + \chi_1 am_q^2},$$

получим:

$$K(p) = \frac{U_a(p)}{U_1(p)} = \frac{\nu^2 K}{p^2 + 2h\nu p + \nu^2}.$$

Если усилитель нагружен на обмотку возбуждения генератора и выходной величиной служит э. д. с. генератора, то из уравнения (II,2) будем иметь:

$$K_1(p) = \frac{E_z(p)}{U_1(p)} = \frac{K \cdot m_z}{\frac{T_\kappa}{\nu^2} p^3 + \left(\frac{1 + 2h_0\nu_0 T_z}{\nu^2} \right) p^2 + \left(\frac{2h\nu + \nu_0^2 T_z}{\nu^2} \right) p + 1},$$

где $m_z = \frac{E_z}{U_\kappa}$ — коэффициент усиления генератора по напряжению.

Литература

1. Н. М. Якименко. Электромашинный усилитель как элемент регулирующей системы. Электричество, № 9, 1948.

2. Ю. Р. Рейнгольд. К методике экспериментального исследования динамических свойств автоматизированного электропривода. Электричество, № 10, 1954.

3. М. Ф. Гарднер и Дж. Л. Бэрнс. Переходные процессы в линейных системах. Гостехиздат, 1949.

[3. 8. 1955]



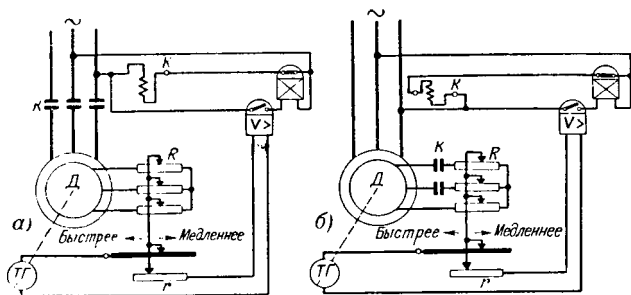


Рис. 1. Принципиальные схемы импульсного управления скоростью асинхронного двигателя.
Д — двигатель; ТГ — тахогенератор.

вия, обеспечивающая поддержание скорости вращения двигателя независимо от нагрузки в пределах от ω'' до ω' , т. е. около среднего значения

$$\omega = \frac{\omega'' + \omega'}{2}.$$

Пренебрегая для крупных двигателей временем срабатывания реле и контактора, можно сказать, что отношение ω'/ω'' равно отношению напряжений отпадания и срабатывания реле напряжения, т. е. коэффициенту возврата:

$$\frac{\omega'}{\omega''} = k_g.$$

Амплитуда пульсации скорости около среднего значения

$$\Delta\omega = \omega'' - \omega = \omega - \omega',$$

откуда

$$k_g = \frac{\omega - \Delta\omega}{\omega + \Delta\omega},$$

и, следовательно,

$$\Delta\omega = \frac{1 - k_g}{1 + k_g} \omega, \text{ или } \Delta\omega/\omega = \frac{1 - k_g}{1 + k_g} \cdot 100. \quad (1)$$

При коэффициентах возврата, близких к 1, с достаточным приближением, можно принять:

$$\Delta\omega = \frac{1 - k_g}{2} \omega, \text{ или } \Delta\omega/\omega = (1 - k_g) \cdot 50. \quad (2)$$

Например, если реле имеет $k_g = 0,9$, то пульсация скорости составит $\pm 5\%$.

Жесткость характеристики при этом можно условно определить, как

$$\frac{\Delta M\%}{2\Delta\omega\%} = \frac{\Delta M\%}{(1 - k_g) 100}. \quad (3)$$

С изменением сопротивления r в цепи реле напряжения изменяется уставка скорости ω , около которой происходит пульсация скорости. Нетрудно показать, что эта скорость пропорциональна величине r :

$$\omega \equiv U_{T_z} = U + ir,$$

где U_{T_z} — напряжение тахогенератора;
 U — напряжение срабатывания реле;
 i — ток срабатывания реле.

Сопротивление r механически связано с сопротивлением R в цепи ротора так, что с уменьше-

нием r сопротивление R увеличивается и, следовательно, с уменьшением уставки скорости ток двигателя ограничивается. Это ограничение легко осуществить до любого предела, например до номинального тока и соответствующего ему номинального момента двигателя. Таким образом, можно установить коммутируемый ток любой необходимой величины в соответствии с допускаемыми для аппаратуры управления значениями. В этом и заключается главная особенность предлагаемой схемы, позволяющая применять импульсный метод и для мощных двигателей.

Вместо периодических размыканий цепи стартера можно производить замыкание и размыкание цепи ротора (рис. 1, б). Этим несколько уменьшается мощность контактора, который можно брать и в двухфазном исполнении.

На рис. 2, а приведен график зависимости $\omega = f(M)$ нескольких механических характеристик асинхронного двигателя для различных уставок скорости и различных сопротивлений в цепи ротора, подобранных так, что ток и момент вращения при включении контактора (при падении скорости до ω') имеют номинальные значения. В этом случае заданная скорость сохраняет свое значение в неизменных процентных пределах, определяемых коэффициентом возврата реле напряжения, при любой нагрузке от нуля до номинальной. Жесткость характеристики определится, как $\frac{1}{1 - k_g}$.

При перегрузке начинает сказываться небольшая жесткость характеристик для малых уставок, и скорость падает ниже установленной нижним пределом ω' . При необходимости сохранения скорости и при перегрузках включение контактора можно производить при большей величине момента (например, $1,5M_n$). При этом жесткость механической характеристики будет увеличена и в пределах $(0 \dots 1,5)M_n$ определится, как $\frac{1,5}{1 - k_g}$. Коммутируемые токи при этом соответственно возрастут.

На графике $\omega = f(t)$ рис. 2, б показаны пульсации скорости для нагрузки, меньшей номинальной. Исходя из этого графика, с достаточ-

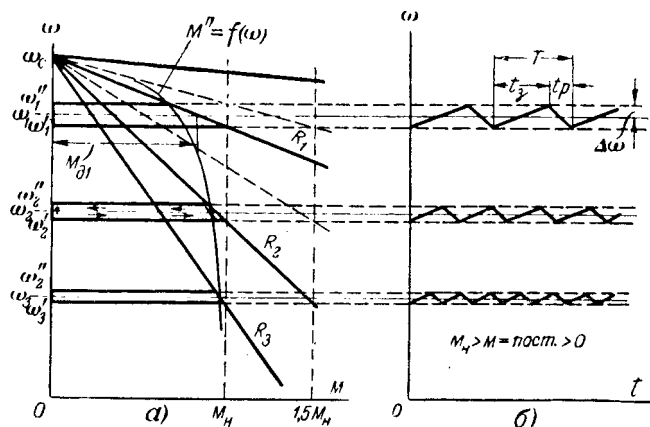


Рис. 2. Механические характеристики (а) и зависимость скорости от времени (б) при импульсном управлении.

ным приближением для квазистационарного процесса можно записать:

$$t_z = -\frac{2\Delta\omega}{\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_z}; \quad t_p = -\frac{2\Delta\omega}{\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_p}. \quad (4)$$

Из уравнения движения электропривода

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_z = \frac{M_\partial - M_c}{J}; \quad \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_p = -\frac{M_c}{J}.$$

Подставляя последние выражения в (4), с учетом (2), получим:

$$t_z = \frac{J\omega(1-k_g)}{M_\partial - M_c}; \quad t_p = \frac{J\omega(1-k_g)}{M_c}. \quad (5)$$

Период импульса

$$T = t_z + t_p = \frac{J\omega M_\partial(1-k_g)}{M_c(M_\partial - M_c)}. \quad (6)$$

Относительное время замкнутости контактора

$$\tau_z = \frac{t_z}{T} = \frac{M_c}{M_\partial}. \quad (7)$$

Частота импульсов

$$f = \frac{1}{T} = \frac{M_c(M_\partial - M_c)}{M_\partial J\omega(1-k_g)}. \quad (8)$$

Из последнего выражения видно, что частота связана с моментом статической нагрузки M_c параболическим законом. При $M_c = 0$ и $M_c = M_\partial$ $f = 0$.

Взяв производную

$$\frac{df}{dM_c} = \frac{M_\partial - 2M_c}{JM_\partial\omega(1-k_g)}$$

и приравняв ее нулю, найдем, что максимум частоты имеет место при

$$M_c = \frac{M_\partial}{2}.$$

Таким образом, при идеальном холостом ходе двигателя контактор все время отключен и вращение происходит по инерции.

С появлением небольшой нагрузки контактор начинает работать, включаясь на небольшие промежутки времени. С увеличением нагрузки частота включений увеличивается, достигая максимума при $M_c = \frac{M_\partial}{2}$, при котором $t_z = t_p$. При дальнейшем увеличении нагрузки частота включений уменьшается и относительное время замкнутости увеличивается, достигая при $M_c = M_\partial$ единицы, т. е. контактор оказывается все время включенным.

Из выражения (8) следует, что частота импульсов обратно пропорциональна уставке скорости ω . Это также видно из графиков $\omega = f(t)$ рис. 2, б. С увеличением коэффициента возврата k_g амплитуда пульсации уменьшается; жесткость характеристики увеличивается вместе с частотой импульсов.

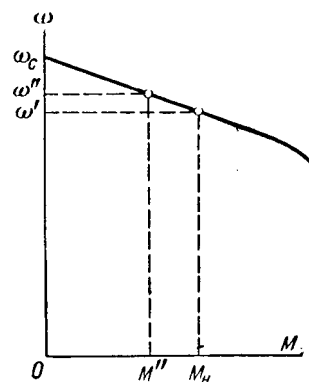


Рис. 3.

Весьма важным фактором является обратно пропорциональная зависимость между частотой импульсов и моментом инерции привода. Это делает схему импульсного управления скоростью особо ценной для приводов с большими маховыми массами, так как частота при этом резко снижается, что позволяет в ряде случаев применять аппаратуру управления обычных стандартных типов.

В формулах (5)...(8) под величиной M_∂ следует понимать среднюю величину момента двигателя при изменении скорости от ω'' до ω' .

При настройке схемы на включение контактора при номинальном токе и моменте величину M_∂ легко найти, принимая рабочую часть механической характеристики асинхронного двигателя прямолинейной

$$\frac{M_\partial}{M_n} = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c - \omega + \Delta\omega}.$$

Переходя к относительным единицам и обозначая $\frac{\omega}{\omega_c} = \frac{n}{n_c} = \nu$, а также подставляя $\Delta\omega$ из (1), получим:

$$M_\partial = M_n \frac{1 - \nu}{1 - \nu \frac{1}{1 + k_g}} \approx M_n \frac{1 - \nu}{1 - \nu k_g}.$$

При скоростях $\nu = 0,40 \dots 0,35$ и меньших с достаточным приближением можно считать $M_\partial = M_n$.

Графики $\omega = f(M)$ рис. 2, а, а также эксперимент показывают, что формулы (5)...(8) дают достаточную точность при скоростях ниже 65...55% синхронной. При более высоких скоростях начинает сказываться неточность выводов, обусловленная тем, что в пределах изменения скорости от ω'' до ω' был принят средний момент M_∂ . Поэтому для более высоких скоростей необходимо уточнить вывод формул, что несколько усложнит их вид.

Принимая попрежнему рабочую часть механической характеристики прямолинейной (рис. 3), можно составить уравнение

$$\frac{M - M_n}{M'' - M_n} = \frac{\omega - \omega'}{\omega'' - \omega'}.$$

откуда

$$M = M_{\kappa} + \frac{M_{\kappa} - M''}{\omega'' - \omega'} \omega' - \frac{M_{\kappa} - M''}{\omega'' - \omega'} \omega = A - B\omega,$$

где

$$A = M_{\kappa} + \frac{M_{\kappa} - M''}{\omega'' - \omega'} \omega'; \quad B = \frac{M_{\kappa} - M''}{\omega'' - \omega'}. \quad (9)$$

Уравнение движения привода при замкнутом контакторе

$$J \frac{d\omega}{dt_3} = A - B\omega - M_c,$$

откуда, полагая M_c в пределах $\omega'' \dots \omega'$ неизменным, получим:

$$t_3 = J \int_{\omega'}^{\omega''} \frac{d\omega}{A - B\omega - M_c} = \frac{J}{B} \ln \frac{A - B\omega' - M_c}{A - B\omega'' - M_c}.$$

Подставляя в последнее выражение B из (9) и учитывая, что

$$\omega'' - \omega' = 2\Delta\omega = (1 - k_g)\omega; \quad A - B\omega' = M_{\kappa} \quad \text{и} \\ A - B\omega'' = M'',$$

имеем:

$$t_3 = \frac{J\omega(1 - k_g)}{M_{\kappa} - M''} \ln \frac{M_{\kappa} - M_c}{M'' - M_c}. \quad (10)$$

Отсюда видно, что когда M_c увеличится до величины M'' , $t_3 = \infty$, отключения контактора прекращаются и он остается в замкнутом состоянии.

Для времени размыкания t_p будет справедлива ранее выведенная формула (5).

Период импульса

$$T = t_3 + t_p = \frac{J\omega(1 - k_g) \left(M_{\kappa} - M'' + M_c \ln \frac{M_{\kappa} - M_c}{M'' - M_c} \right)}{M_c(M_{\kappa} - M'')}; \quad (11)$$

относительное время замкнутости контактора

$$\tau_3 = \frac{t_3}{T} = \frac{M_c}{M_c + \frac{M_{\kappa} - M''}{\ln \frac{M_{\kappa} - M_c}{M'' - M_c}}}; \quad (12)$$

частота импульсов

$$f = \frac{1}{T} = \frac{M_c(M_{\kappa} - M'')}{J\omega(1 - k_g) \left(M_{\kappa} - M'' + M_c \ln \frac{M_{\kappa} - M_c}{M'' - M_c} \right)}. \quad (13)$$

Величину M'' можно определить на основании рис. 3:

$$\frac{M''}{M_{\kappa}} = \frac{\omega_c - \omega - \Delta\omega}{\omega_c - \omega + \Delta\omega},$$

или в относительных единицах

$$M'' = \frac{1 + k_g - 2v}{1 + k_g - 2vk_g}. \quad (14)$$

При $M'' = 0$ контактор не отключается. При этом

$$1 + k_g - 2v_0 = 0,$$

откуда

$$v_0 = \frac{1 + k_g}{2}.$$

Например, при $k_g = 0,9$ $v_0 = 0,95$, т. е. $\omega = 0,95\omega_c$, где ω — средняя величина в пределах изменения $\omega' \dots \omega''$.

График $M'' = f(\omega)$ на рис. 2,а указывает границу между зоной работы (слева) и зоной постоянного включения (справа) контактора. Этот же график показывает, что по мере увеличения уставки скорости условия работы контактора облегчаются: частота импульсов снижается, ток размыкания уменьшается и зона работы контактора суживается, т. е. даже при значительном уменьшении нагрузки против номинальной контактор остается во включенном состоянии и схема работает, как обычная, неимпульсная.

Таким образом, особо благоприятные условия для применения данной схемы создаются в регулируемых приводах с большими маховыми массами, характерных работой с полной нагрузкой и отдельными сбросами нагрузки, которые не должны отражаться на скорости. Подобным примером является привод прессов для брикетирования угля и торфа. Эти прессы, снабженные массивными маховиками весом 14 т ($GD = 120 \text{ тм}^2$), должны нормально работать с устойчивыми скоростями, регулируемые от 100 до 80% максимальной. Во время работы возможны полные сбросы нагрузки, при которых скорость не должна возрастать. Наладка процесса брикетирования должна производиться при заправочной скорости (30% номинальной) и длиться до 5...10 мин, после чего пресс переходит на высокие скорости вращения, на которых он нормально работает.

Во время процесса наладки нагрузка все время колеблется от нуля до номинальной, при этом скорость должна устойчиво поддерживаться в заданных пределах; пульсации скорости до $\pm 5 \dots 6\%$ вполне допустимы.

Подробные расчеты, произведенные с учетом времени работы на пониженных скоростях вращения и связанных с этим потерь энергии, тем не менее всегда показывают экономическую целесообразность применения асинхронных двигателей по сравнению с двигателями постоянного тока. Кроме того, брикетные цехи относятся к категории взрывоопасных и поэтому установка в них коллекторных двигателей чрезвычайно затруднена.

Эти обстоятельства обуславливают целесообразность применения для брикетных заводов асинхронных двигателей с устойчивым регулированием скорости.

На рис. 4 приведена схема импульсного управления скоростью двигателя пресса.

В качестве реле напряжения было использовано реле ЭН-524, механически отрегулированное на $k_g = 0,92$. Для возможности такой регулировки контакты реле были почти полностью разгружены от тока путем установки триода 1Л и включения контакта РН в цепь сетки. Это дает возможность довести коэффициент k_g до 0,96

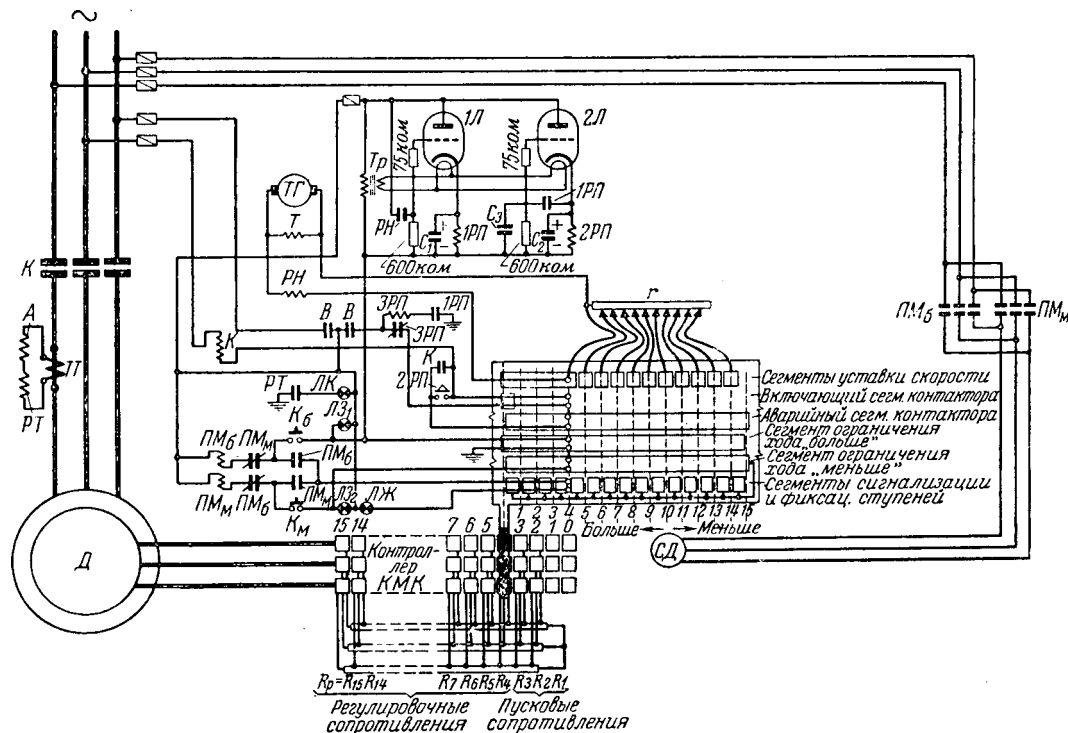


Рис. 4. Схема импульсного управления скоростью двигателя пресса.
Д — двигатель пресса; СД — серводвигатель; ТГ — тахогенератор.

Включение реле *РН* вызывает срабатывание реле *1РП* и *3РП*. Последнее разрывает цепь катушки линейного контактора *К* (КТ-35А), отключающего двигатель *Д* (АМТ6-137-10 380 в, 155 кВт).

При снижении скорости до заданного предела реле $РН$, а затем $1РП$ отпадают, что вызывает замыкание контакта $ЗРП$ и включение контактора $К$. Для включения контактора $К$ его блок-контакт на это время блокируется контактом реле $2РП$, имеющего выдержку времени около $0,3$ сек при отпадании, что достигается установкой конденсатора $С_3$ в цепи триода $2Л$.

Для увеличения уставки скорости нажимом кнопки K_6 («больше») включается серводвигатель $СД$, передвигающий щетки контроллера. Вследствие этого сопротивление в цепи ротора двигателя D уменьшается и одновременно увеличивается сопротивление r в цепи катушки реле $РН$. Сопротивление r представляет собой реостат с десятью ползунками, соединенными гибкими проводами с сегментами уставки скорости, расположенными на валу контроллера, который может поворачиваться вместе со щетками на неполный оборот как в одну, так и в другую сторону. Установка ползунков производится при наладке схемы по показаниям тахометра и амперметра таким образом, чтобы ток при включениях контактора на каждой ступени не превышал заданного значения (например, для данной установки 310 а).

Так как согласно технологическому заданию наименьшая скорость двигателя должна составлять 30% номинальной, то ступени 0...3 выполнены как пусковые и заданная уставка скорости

начинается с 4-й ступени, повышаясь с каждой ступенью на 6...9%. На последней, 15-й, ступени цепь катушки реле *РН* разрывается, и двигатель работает на естественной характеристике.

Переход на каждую ступень скорости сигнализируется вспышкой желтой лампы ЛЖ; выход на естественную характеристику — погасанием зеленой лампы ЛЗ₁, причем одновременно с этим отключаются и электронные лампы.

Общий вид электрооборудования импульсного управления одного пресса показан на рис. 5.

Привод тахогенератора от вала двигателя, соединенного ременной передачей с прессом, недопустим, так как вследствие возможной пробуксовки ремня и рывков при включении двигателя, обусловленных слабиной ременного привода, может произойти нарушение соответствия между скоростью пресса и импульсами на двигатель. По этим соображениям на данной установке тахогенератор был фрикционно соединен с прессом, благодаря чему была обеспечена четкая работа схемы.

Так как нагрузка прессов легко регулируется количеством поступающего в пресс сырья и толщиной выходящего брикета, то для эксперимента было произведено изменение нагрузки от номинальной до холостого хода для трех ступеней скорости. Для каждой нагрузки секундомером измерялась продолжительность импульса и по ней вычислялась частота импульсов в час $F = \frac{3600}{T}$.

вычислялась частота импульсов в час $F = \frac{3600}{T}$.

На рис. 6 приведены кривые, рассчитанные по формулам (13) и (14). Там же приведены точки, полученные экспериментальным путем.

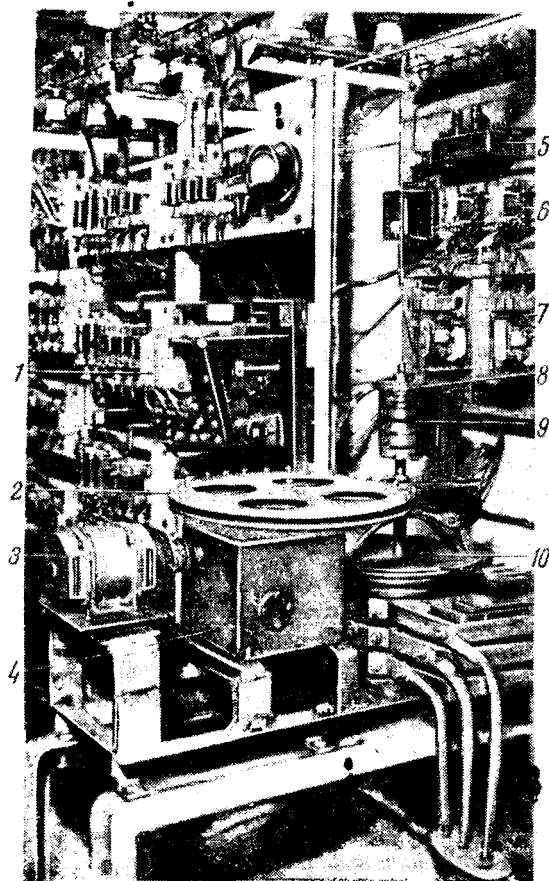


Рис. 5. Электрооборудование импульсного управления пресса.

1 — линейный контактор КТ-35А; 2 — диск сцепления редуктора с контроллером КМК; 3 — серводвигатель контроллера мощностью 0,6 квт, 380 в, 1 450 об/мин; 4 — редуктор контроллера (1 : 1 450); 5 — электронный блок для реле; 6 — реле напряжения и промежуточные; 7 — магнитные пускатели серводвигателя; 8 — диск переключения сопротивлений для изменения установки скорости; 9 — сигнально-блокировочный барабан; 10 — контроллер круглый масляный (КМК).

Как видно, результаты эксперимента достаточно хорошо совпали с расчетными данными, причем для холостой работы они точно совпали с расчетными. Пульсация скорости составляла $\pm 4\%$.

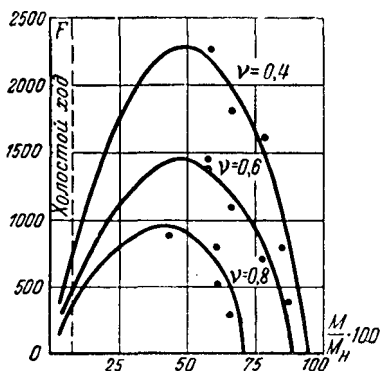


Рис. 6. Зависимость частоты импульсов от нагрузки для трех установок скорости.

Для определения действительного числа срабатываний контактора в час и для выбора соответствующей аппаратуры управления необходимо еще учитывать длительность и величину нагрузки на каждой ступени и, рассчитав число срабатывания для отдельных режимов в течение часа, просуммировать полученные числа.

Например, если при $v = 0,4$ пресс работает 10 мин, из которых 4 мин — вхолостую и 6 мин с нагрузкой 90%; затем переходит на $v = 0,8$ и продолжает работать на этой скорости с нагрузкой 75% и, наконец, со сбросом этой нагрузки до нуля на 2 мин через каждые 20 мин, то воспользовавшись графиками рис. 6, можно найти, что для указанного режима работы пресса полное число импульсов в час составляет 133 (таблица).

Время, мин	v	$M_c, \%$	$F = \frac{3600}{T}$	Число импульсов
6	0,4	90	600	$600 \cdot \frac{6}{60} = 60$
4	0,4	Момент холостого хода	700	$700 \cdot \frac{4}{60} \approx 47$
20	0,8	75	0	—
2	0,8	Момент холостого хода	380	$380 \cdot \frac{2}{60} \approx 13$
20	0,8	75	0	—
2	0,8	Момент холостого хода	380	$380 \cdot \frac{2}{60} \approx 13$
6	0,8	75	0	—

Ясно, что подобные расчеты носят ориентировочный характер, однако они необходимы для предварительного выявления хотя бы порядка числа импульсов в час.

На выполненной установке вследствие наличия сырья, хорошо брикетирующегося на максимальных скоростях, работа контактора происходила значительно реже. Лишь за несколько месяцев работы наибольшее зарегистрированное число импульсов в час составило 230.

Следует отметить, что контактор, выбранный по номинальному току двигателя и рассчитанный на включение короткозамкнутых двигателей, работает в данной схеме на включение лишь номинального тока и на отключение тока, меньшего, чем номинальный, благодаря чему условия его работы облегчаются. Все же необходимо признать малую пригодность для импульсных схем контакторов серии КТ с катушками переменного тока. Контакторы серии КТП-500 с катушками постоянного тока, предназначенные для тяжелых

Трансформаторы тока на особо высокие напряжения

(Обзор конструкций на 275 ... 400 кВ)

Инж. Н. И. БАЧУРИН и инж. Л. К. ГРЕЙНЕР

Завод «Электроаппарат»

В послевоенное время в мировой энергетике наметилась совершенно определенная тенденция к повышению верхнего предела рабочих напряжений энергосистем с 220 до 380 ... 400 кВ, что обусловлено интенсивным ростом мощностей энергосистем и главным образом их протяженности. Например, в Советском Союзе только за пятилетие 1951 — 1955 гг. общая мощность действующих электростанций удвоилась. В Швеции оборудована и пущена в эксплуатацию линия электропередачи Харспренгет — Халльсберг протяженностью в 954 км при напряжении 380 кВ, 50 Гц.

В Советском Союзе закончено строительство линии электропередачи Куйбышев—Москва протяжением около 900 км на напряжение 400 кВ. Ряд линий на 400 кВ проектируется. Имеются опытные линии на 500 кВ в СССР, Франции (Шевильи), США (Тидд). Ряд линий электропередачи на 275, 287 и 330 кВ строится, а ряд — уже сдан в эксплуатацию.

Создание надежного и экономически приемлемого оборудования для особо мощных энергосистем, использующих особо высокие напряжения, является задачей, над решением которой сейчас работают ученые, конструкторы, исследователи и производственники многих стран.

В статье дан краткий обзор работ по созданию трансформатора тока на 380—400 кВ — одного из важных элементов оборудования энергосистем особо высокого напряжения.

Повышение рабочего напряжения с 220 до 400 кВ, почти в 2 раза, поставило перед конструкторами трансформаторов тока, можно сказать, качественно новые задачи, которые не поддаются решению простым увеличением размеров конструктивных элементов действующей серии аппаратов этого типа. Упомянем некоторые из этих задач: 1) ионизационная прочность изоляции; 2) устойчивость изоляции к тепловому пробую; 3) вопросы, связанные с размерами фарфоровых изоляторов; 4) транспортабельность; 5) механическая прочность обмоток и их изоляции, а также прочность фарфоровых изоляторов; 6) устойчивость конструкций при токах короткого замыкания; 7) предотвращение короны при рабочем напряжении; 8) получение высоких характери-

стик трансформатора тока как измерительного и защитного прибора.

Предложение о создании бакового трансформатора тока на 400 кВ с применением аппаратных втулок не нашло поддержки. Габариты и вес трансформатора тока такой конструкции получились бы чрезвычайно большими. Шагом вперед является конструкция, в которой первичная обмотка изолирована на полное рабочее напряжение по типу маслонаполненного кабеля с применением многослойной бумажно-масляной изоляции. Тогда сердечник с вторичной обмоткой принимает незначительные размеры, обусловленные размерами окна в петле изолированной первичной обмотки. В данной конструкции первичную обмотку можно защитить фарфоровыми крышками относительно небольшого внутреннего диаметра; обмотка может разместиться в металлическом заземленном корпусе вблизи от заземленного фланца изолятора, так как изоляция рассчитана на полное напряжение. Вместе с тем такое конструктивное решение представляется несколько рискованным, так как обмотки изолируются вручную и поэтому по условиям как пробивной, так, в особенности, ионизационной прочности изоляции едва ли следует здесь повышать напряженность поля в самом опасном месте выше 2 ... 4 кВ/мм при рабочем напряжении. Это означает, что толщина изоляции с учетом неравномерности поля может вырасти до значений невыгодных как в производственном отношении, так и по условиям теплоотдачи (приложение I).

Рис. 1 показывает трансформатор тока на 380 кВ швейцарской фирмы Эрликон, построенный по этому принципу. Конструкция допускает транспортировку лишь в наклонном состоянии.

Та же фирма изготовила опытный образец трансформатора тока на 380 кВ с первичной обмоткой, изолированной на полное напряжение литой смолой низкого давления. В качестве изоляции в обмотке применена смола «аралдит» фирмы CIBA (США), а в сущности широко известная смола типа «эпокси». Электрические свойства смолы довольно высокие. При заливке она представляет собой легко подвижную жидкость, после полимеризации твердеет без образования пузырей. Обмотка с изоляцией по-

условий работы и рассчитанные на 1 200 включений в час, более пригодны для этой цели. Необходимо освоение нашей электропромышленностью выпуска более совершенных контакторов, что было отмечено в резолюции совещания по автоматизированному электроприводу переменного тока в мае 1955 г. Это позволит значительно расширить область применения импульсных схем, которые благодаря своей исключительной простоте, быстрдействию и устойчивости регулирования

должны получить широкое распространение не только для малых, но и для мощных двигателей.

Литература

1. М. Г. Чиликин. Общий курс электропривода. Госэнергоиздат, 1953.
2. В. С. Кулебакин. К теории импульсного метода регулирования скорости вращения электродвигателей с независимым или постоянным возбуждением. Труды ВВА им. Жуковского, вып. 304, 1948.

[27. 6. 1955]

мещается, как обычно, в крышке и заливается маслом.

Применение литой изоляции является весьма заманчивым решением как с точки зрения технологической, так и с точки зрения транспортировки. Аппарат с такой изоляцией можно отправлять на место установки в разобранном виде, не опасаясь, что характеристики изоляции при транспортировке или при хранении на монтажной площадке ухудшатся.

Потребовалась значительная толщина смолы, чтобы противостоять относительно низкому испытательному напряжению — 750 кВ, что вынудило применить фарфоровые крышки большого диаметра (внутренний диаметр не менее 800 мм).

Стремление рационализировать изоляцию обмоток трансформаторов тока высокого напряжения привело к общеизвестному методу разделения изоляции на две части: часть изоляции наносится на первичную обмотку и часть — на вторичную (вместе с сердечником). Этот метод используется в так называемой «восьмерочной» или цепной (Kreuzring) конструкции, в которой изолированная петля первичной обмотки и изолированная вторичная обмотка с сердечником представляют собой два почти круглых кольца, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях и соединенных между собой подобно двум звеньям цепи. При данной конструктивной схеме отпадает потребность в заземленном баке или корпусе. Изоляция заземленной вторичной системы несет часть (примерно половину) электрической нагрузки. Следовательно, при этой схеме обмотки могут быть целиком размещены внутри

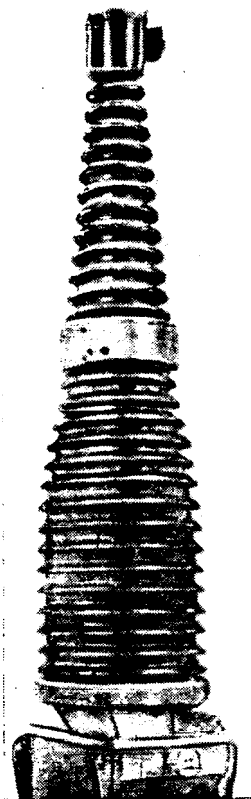


Рис. 1. Трансформатор тока на 380 кВ фирмы Эрликон.

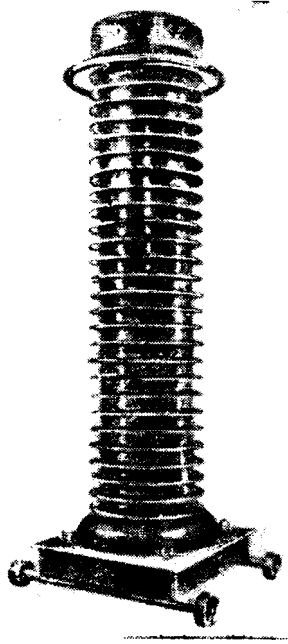


Рис. 2. Трансформатор тока на 380 кВ восьмерочного типа фирмы «д-р Ритц».

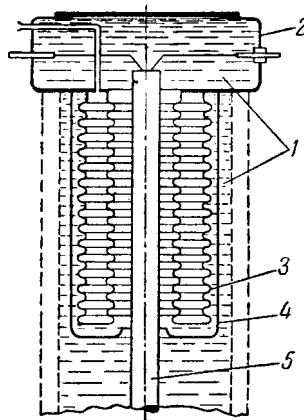


Рис. 3. Примерная схема сильфонного маслорасширителя, погруженного внутрь крышки.

1 — масло; 2 — герметизированная головка; 3 — сильфон; 4 — экран; 5 — первичная обмотка.

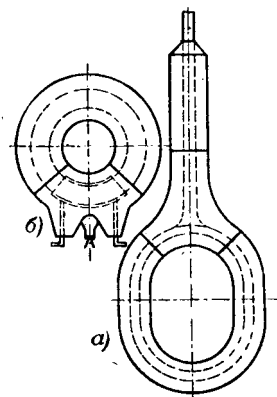


Рис. 4. а — образование «тройника» на первичной обмотке трансформатора тока восьмерочной конструкции; б — на вторичной обмотке.

фарфоровых крышек, что сокращает общую высоту аппарата.

При всех достоинствах этого решения при обычном выполнении высота трансформатора тока на 400 кВ по этой схеме получается столь большой, что транспортировка его возможна лишь в наклонном положении.

Рис. 2 показывает трансформатор тока восьмерочного типа на 380 кВ фирмы Dr. H. Ritz (Ритц). Высота трансформатора тока не более 4 500 мм и допускает перевозку на пониженной платформе в вертикальном положении. Такого уменьшения высоты удалось добиться путем решительного сокращения размеров как основания, так и головки аппарата. В конструкции Ритц головка сведена почти на нет, так как объем для температурного расширения масла предоставляется полым цилиндрическим сильфоном, устанавливаемым внутри фарфоровой крышки. Примерная схема такого сильфона дана на рис. 3. Таким образом, здесь маслорасширитель как бы утоплен внутри аппарата в верхней части крышки. Конструкция — герметизированная, и масло в аппарате не имеет сообщения с внешним воздухом.

Стальные части аппарата, соприкасающиеся с маслом, оцинкованы горячим способом. Для трансформаторов тока восьмерочной конструкции по рис. 2 актуальными являются следующие конструктивные вопросы.

Ионизационная прочность. Разделение изоляции на две ступени позволяет более просто достичь необходимых градиентов (приложение II), однако с этой конструктивной схемой связаны новые опасности ионизации. Геометрические очертания обмоток восьмерочных трансформаторов тока таковы, что при изолировке возникают так называемые «тройники» (рис. 4), которые невозможно покрыть путем непрерывного навивания бумажной ленты. Приходится подкладывать по месту бумажные вкладки, что может иногда привести к образованию масляных

мешков, облегчающих возникновение ионизации. При тщательном выполнении изоляции, сушки и пропитки, при соблюдении высокого вакуума для данной изоляции может быть достигнута значительная ионизационная прочность. Герметизация аппарата с применением силфона позволяет сохранить эти первоначальные высокие качества изоляции. Доктор Ритц указывает, что до 500 кВ не наблюдалось повышения $\lg \delta$ при испытании.

Механическая прочность. Свободно спускающаяся первичная обмотка (подтягиваемая обычно к головке) до напряжений 110...154 кВ является довольно жестким телом. При переходе к особо высоким напряжениям вес изолированной обмотки и ее масса становятся такими, что возможны деформации обмотки, а главное — возможны смещения в навивке бумажной изоляции как под влиянием собственного веса, так и при толчках при транспортировке. Предотвращение деформации обмотки требует специальных конструктивных мер, как введение ребер жесткости и т. п.

Размеры фарфоровых покрышек. Кольцевые звенья, образуемые первичной обмоткой и вторичной системой в «восьмерочных» трансформаторах тока, по необходимости должны иметь довольно значительные наружные диаметры. В результате внутренние диаметры фарфоровых покрышек для одноступенчатых цепных трансформаторов тока на 380...400 кВ приближаются к технологически предельным при современных возможностях керамического производства (850 ... 950 мм).

Зарубежные конструкции трансформаторов тока на 380 кВ выполнены на номинальные токи 800...1 200 А, тогда как номинальный ток Куйбышевской линии электропередачи составляет уже 2 000 А. Между тем по мере роста тока, а следовательно, и диаметра токоведущей жилы неизбежно увеличивается и диаметр фарфоровой покрышки. На размеры внутреннего диаметра покрышки влияют количество сердечников и номинальный вторичный ток трансформатора.

Не меньшие трудности вызывает высота покрышки. В аппарате, показанном на рис. 2, применена цельная фарфоровая покрышка высотой около 4 000 мм, что, конечно, электрически является наилучшим решением, однако такая покрышка довольно трудно выполнима. В других аналогичных конструкциях применяются составные покрышки, на фланцах или склеенные в обожженном состоянии.

Неравномерность электрического поля. Цепным трансформатором тока, в котором остроумно используется разделение изоляции на две ступени, вместе с тем присущ органический недостаток — крайне неравномерное электрическое поле. Действительно, одно звено этой системы имеет потенциал земли, а другое — линии. Таким образом, в нижней части аппарата происходит фактически переход от потенциала линии к потенциалу земли. Кроме того, поле лишено цилиндрической симметрии. В трансформаторе тока Ритц (рис. 2) применено специальное

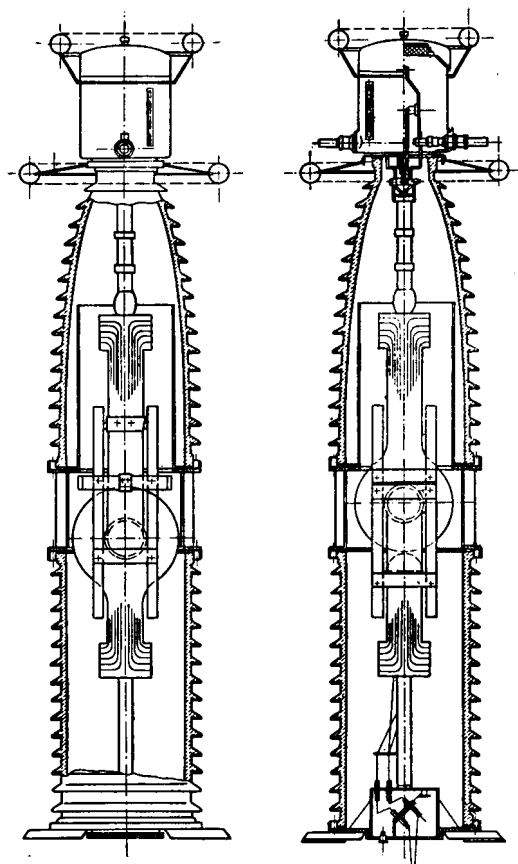


Рис. 5. Трансформатор тока на 380 кВ фирмы Броун-Бовери (разрез).

устройство для выравнивания распределения потенциала вдоль изолятора в виде цилиндрического конденсатора, охватывающего первичные и вторичные обмотки. Емкостный ток этого устройства используется для измерения напряжения и синхронизации.

Своеобразной модификацией цепной схемы является конструкция трансформатора тока на 380 кВ Броун-Бовери (выпуск 1953 г.) (рис. 5). В трансформаторе обмотки размещены не в нижней трети изолирующей покрышки, как в обычных цепных трансформаторах тока (например, типа ТФН), а посередине, на уровне среднего металлического барабана, разделяющего верхнюю и нижнюю покрышки. Один и тот же фиксированный потенциал (равный половине потенциала сети) на металлическом барабане и на внешних поверхностях обоих концевых звеньев «восьмерки» (первичная обмотка и сердечники со вторичными обмотками) обеспечивается способом, о котором не упоминается в опубликованных материалах. Первичная обмотка и сердечники со вторичными обмотками закреплены на среднем металлическом барабане изолирующими рейками. Выводные концы первичной обмотки (вверх) и выводные концы вторичных обмоток (вниз) образуют изолированные кабельной бумагой «хоботы». На рис. 5 видно, что хоботы с первичной и с вторичной стороны снабжены разделками.

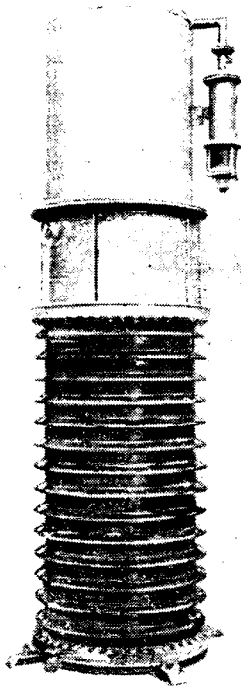


Рис. 6. Трансформатор тока ВВС на 380 кВ, подготовленный к транспортировке.

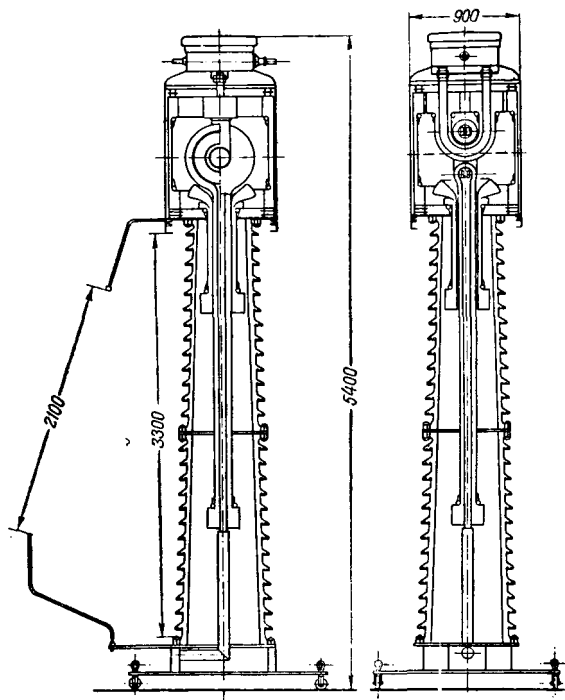


Рис. 7. «Перевернутая» схема трансформатора тока на 380 кВ, предложенная ВВС.

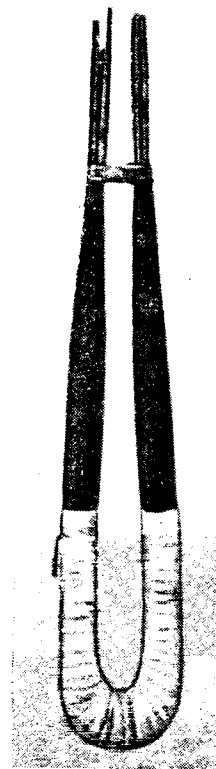


Рис. 8. U-образная («шпилька») форма первичной обмотки трансформатора тока с кабельно-конденсаторной изоляцией.

Имеется устройство для емкостного измерения напряжения.

Силикагелевый поглотитель (под крышкой, рис. 5) защищает внутреннюю полость трансформатора тока от проникновения влаги.

Трансформатор тока Броун-Бовери транспортируется в вертикальном положении. Для этой цели в верхней крышке установлен широкий бакелитовый цилиндр, нижняя часть которого плотно соединена со средним металлическим барабаном. Перед отправкой с завода из аппарата выпускается часть масла и снимаются головка и верхняя фарфоровая крышка. Первичная обмотка и нижняя часть ее выводных концов остаются погруженными в масло, оставшееся в бакелитовом цилиндре. Верхняя часть выводных концов (без изоляции) загибается внутрь цилиндра. Затем вся верхняя часть трансформатора тока закрывается специальным транспортным стальным колпаком, снабженным силикагелевым поглотителем (рис. 6). В таком частично разобранном состоянии высота трансформатора не превышает железнодорожный габарит.

Известный интерес представляет «перевернутая» схема трансформатора тока на 380 кВ, предложенная в качестве проектного варианта той же фирмой ВВС (рис. 7). При этой схеме первичная обмотка очень коротка и ее изоляция незначительна. Сердечники изолированы на полное напряжение и помещены в головке трансформатора тока. Выводы вторичных обмоток через длинный хобот спускаются к основанию аппарата.

В последних описанных типах трансформато-

ров тока на особо высокие напряжения (кроме конструкции рис. 7) применялся принцип разделения изоляции на несколько ступеней при одноступенчатой схеме трансформации. Распределение напряженностей поля по толщине изоляции всюду было логарифмическим, что вынуждало значительно увеличить ее толщину.

Шведская фирма ASEA пошла по другому пути: она изолирует первичную обмотку на полное напряжение, но выравнивает распределение напряжения по радиусу и по оси при помощи конденсаторных обкладок, создавая, таким образом, новый в трансформаторостроении класс кабельно-конденсаторной изоляции, в которой достигается существенный выигрыш в толщине изоляции по сравнению с обычной бумажно-масляной. Действительно, в кабельно-конденсаторной изоляции поле можно считать равномерным. Сравнение толщины простой бумажно-масляной изоляции, где градиент определяется по логарифмической формуле, и новой изоляции при номинальном напряжении 400 кВ дано в приложении II. Расчет показывает выигрыш в суммарной толщине изоляции даже по сравнению с восьмичетырехным типом, хотя там изоляция разделена на две ступени. Однако еще более важным достоинством этой новой изоляции является выравнивание напряжения по оси обмотки и соответственно изолятора.

Некоторые другие конструктивные вопросы также решены в трансформаторе ASEA по-новому. Например, петля первичной обмотки имеет

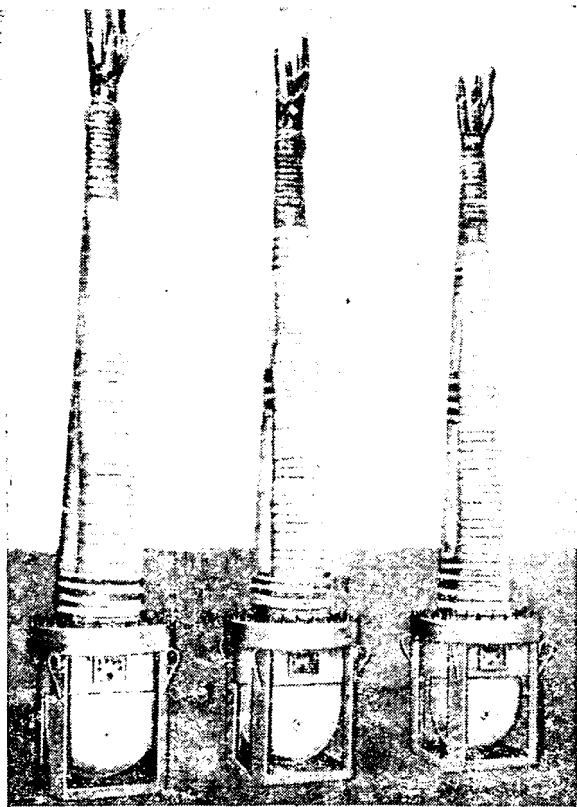


Рис. 9. Закрепление на первичной обмотке фарфоровых накладок для уменьшения объема масла.

вид не тороида с хвостом, как во всех описанных ранее конструкциях, а U-образную форму (рис. 8). Такая форма («дамская шпилька») позволяет избегать тройников (рис. 4) и вместе с тем позволяет всюду вести наложение изоляции путем непрерывной навивки

бумажной ленты, что в свою очередь устраняет масляные мешки и опасность ионизации, благодаря чему значительно повышается качество изоляции. U-образная форма позволяет также заготовить отдельно сердечники с вторичными обмотками и затем надеть их на вертикальные ветви обмотки.

В трансформаторах ASEA, после того как сердечники надеты, ветви обмотки стягиваются бандажми, которые делают всю систему жесткой, бандажки же воспринимают на себя электродинамические усилия.

Далее, ASEA заполняет пространство между обмоткой и фарфором, а равно и полости в нижнем корпусе аппарата чистым кварцевым песком, после чего трансформатор заливают маслом, что резко сокращает объем масла (в трансформаторе на 380 кВ — всего 375 кг масла). Снижение достигается еще за счет массивных фарфоровых накладок сегментовидного сечения, которые заполняют две наиболее крупные полости между первичной обмоткой и крышкой. Рис. 9 показывает первичную обмотку с фарфоровыми накладками, закрепленными при помощи ленты. Столь малый объем масла позволяет резко сократить объем головки — маслорасширителя. Головка заполняется азотом и герметически закрывается. Применение песка имеет и другие преимущества: песок фиксирует первичную обмотку в определенном положении, предохраняя ее тем самым от деформации и принимая на себя в известной степени электродинамические усилия. При сборке песок уплотняется по способу вибрации.

В кабельно-конденсаторной изоляции применена креповая бумага. На первичной обмотке имеется отвод с предпоследней конденсаторной обкладки для использования емкостного тока, пропорционального напряжению, для целей синхронизации и измерения.

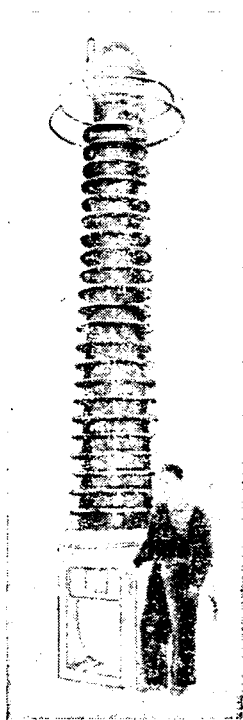


Рис. 10. Общий вид трансформатора тока на 380 кВ с кабельно-конденсаторной изоляцией фирмы ASEA.

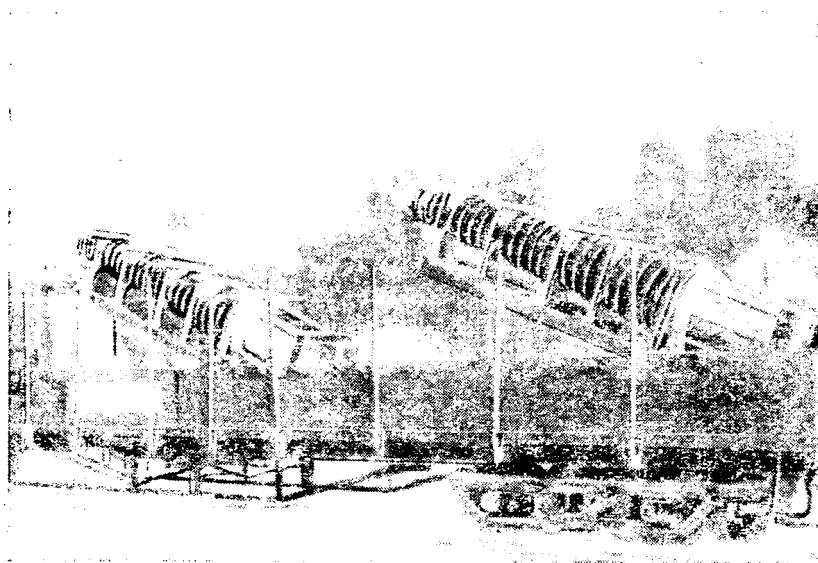


Рис. 11. Перевозка трансформаторов тока на 380 кВ фирмы ASEA в наклонном положении.

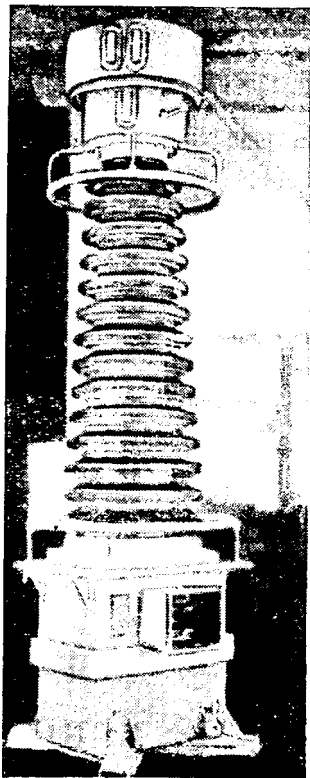


Рис. 12. Трансформатор тока на 275 кВ фирмы Метрополитен-Виккерс.

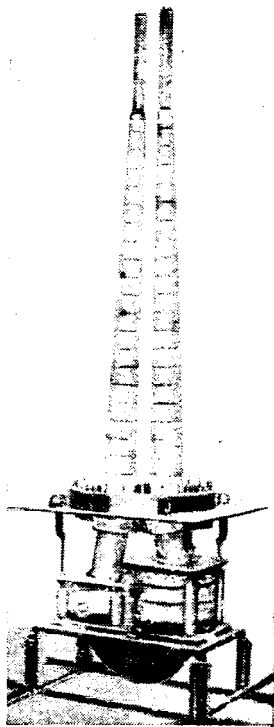


Рис. 13. Первичная обмотка и сердечники трансформатора тока на 275 кВ фирмы Метрополитен-Виккерс.

На рис. 10 дан общий вид аппарата. По высоте изолятор склеен из пяти частей. Высота трансформатора 5 400 мм, транспортируется он в наклонном положении (рис. 11). Ряд таких аппаратов находится в эксплуатации на шведской линии 380 кВ.

В качестве иллюстрации того, как развивается применение кабельно-конденсаторной изоляции при особо высоких напряжениях, можно еще упомянуть о недавно выпущенном английской фирмой Метрополитен-Виккерс трансформаторе тока на 275 кВ для установки в объединенной британской энергосистеме (рис. 12). Можно отметить ряд интересных особенностей этой конструкции. Первичная обмотка (рис. 13) выполнена здесь в виде U-образной трубы; таким образом, это — одновитковый трансформатор. На трубу нанесена изоляция (примерно 20 обкладок)¹.

Номинальный первичный ток — 1 200 а, вторичный ток — 2 а. Эти же трансформаторы могут быть применены на 600 а с вторичным током 1 а и на 300 а с вторичным током 0,5 а. Соответственно британская энергосистема применяет приборы и реле на разные номинальные токи: 2, 1 и 0,5 а.

Трансформатор Метрополитен-Виккерс заполняется маслом, доступ воздуха к маслу предотвращен. В герметизации аппарата использован

оригинальный азотно-масляный затвор, располагающийся в головке аппарата (рис. 14). Свободная полость над зеркалом изоляционного масла в головке заполнена азотом. В верхней части головки расположен затвор, состоящий из двух перепускных камер, которые соединяются между собой у самого дна посредством отверстий малого диаметра. Первая из этих камер соединяется с азотной подушкой основного маслорасширителя при помощи трубочки, которая выходит в самую верхнюю часть этой первой камеры. Вторая камера сообщается с атмосферой. Камеры заполнены до половины «затворным» маслом. Когда масло в трансформаторе тока нагревается, уровень его в основном маслорасширителе повышается, часть азота вытесняется из подушки через трубочку в азотную полость первой камеры, давление азота увеличивается. Под влиянием этого давления часть «затворного» масла перетекает через донные отверстия из первой камеры во вторую, уровень масла в первой камере понижается, во второй — повышается, излишек воздуха из полости второй камеры выходит наружу. При охлаждении масла, наоборот, уровень его в трансформаторе понижается, часть азота перетекает из первой камеры в основной маслорасширитель, происходит некоторое понижение давления газа. Уровень масла в первой камере повышается за счет подсосывания из второй. Уровень масла во второй камере понижается, из атмосферы засасывается во вторую камеру свежий воздух. Таким образом, колебания давления внутри аппарата обусловлены лишь возможной разностью высот уровня масла в первой и во второй камере и могут быть сделаны очень малыми. Так как изоляционные качества «затворного» масла безразличны, то легко подобрать сорт масла с достаточно низкой температурой застывания, надлежащей вязкости и т. д.

Английская фирма Инглиш Электрик также выпустила трансформатор тока на 275 кВ с кабельной конденсаторной изоляцией. Конструкция его имеет сходство с конструкцией Метрополитен-Виккерс.

Рис. 15 показывает опытный образец трансформатора тока конструкции завода «Электроаппарат» на 400 кВ, 2 000/1 а с кабельно-конденсаторной изоляцией без применения песочного заполнения. В трансформаторе использованы фарфоровые покрывки относительно малого диа-

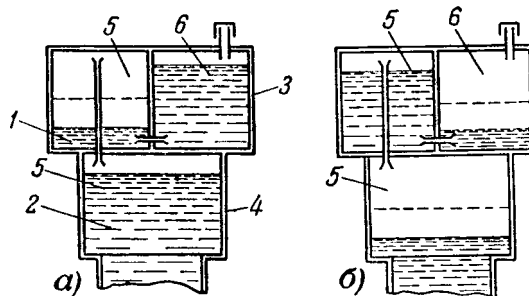


Рис. 14. Азотно-масляный затвор.

а — повышенная температура масла; б — пониженная.
1 — затворное масло; 2 — изолирующее; 3 — масляный затвор;
4 — головка аппарата; 5 — азот; 6 — воздух.

¹ Впервые такое решение было принято в варианте конструкции завода «Электроаппарат» в 1950.

метра. Данная конструкция полностью снимает проблему крупногабаритного фарфора, однако к числу ее недостатков следует отнести большое число уплотнений. Конструкция имеет U-образную первичную обмотку из медной трубы, а переключение на различные коэффициенты трансформации осуществляется на вторичной стороне. Дальнейшая работа по созданию серии трансформаторов тока с новой изоляцией на напряжения до 400 кВ включительно на заводе «Электроаппарат» продолжается.

Как показывают приложения I и II, увеличение числа ступеней, на которые разделяется изоляция аппарата, оказывается с электрической точки зрения очень выгодным. Это увеличение числа ступеней изоляции может быть связано и с увеличением числа ступеней трансформации. Однако расчет показывает, что число ступеней трансформации более двух явно нерационально. При большом их числе существенно ухудшаются условия для соблюдения приемлемых магнитных характеристик аппарата, импеданс нижней ступени оказывается дополнительной нагрузкой для верхней ступени. Это приводит к росту (суммированию) погрешностей или к значительному увеличению расхода активных, в особенности магнитных, материалов, что утяжеляет всю конструкцию.

Для защитных целей каскадная схема представляет то дополнительное затруднение, что защитные сердечники различных цепей в нижней ступени оказываются в некоторой степени магнитно-связанными через общий сердечник верхней ступени. Например, Ритц [Л.10] считает це-

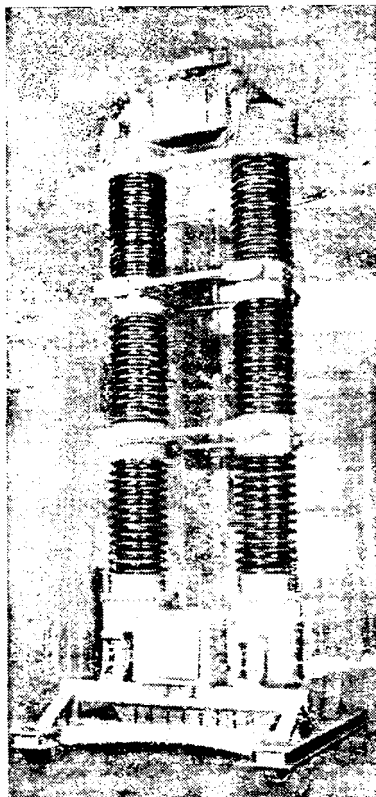


Рис. 15. Опытный образец трансформатора тока на 400 кВ с кабельно-конденсаторной изоляцией и крышками малого диаметра завода «Электроаппарат».

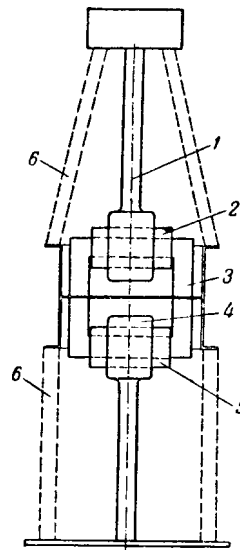


Рис. 16. Схема многоступенчатой изоляции трансформатора тока по предложению А. А. Горева.

1 — первичная обмотка с изоляцией (первая ступень изоляции); 2 — изоляция сердечников (вторая ступень изоляции); 3 — сердечник; 4 — вторичная обмотка с изоляцией (четвертая ступень изоляции); 5 — изоляция сердечника (третья ступень изоляции); 6 — крышка.

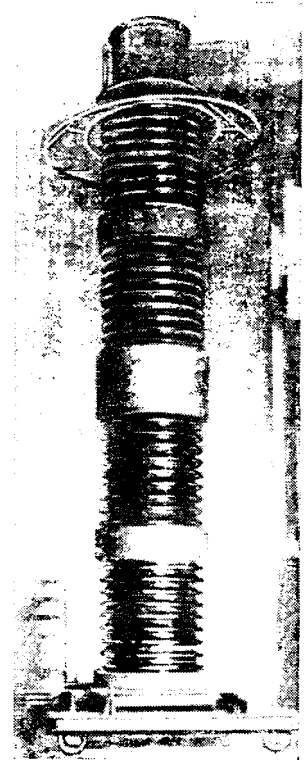


Рис. 17. Каскадный трансформатор тока на 400 кВ завода «Электроаппарат».

лесообразным при каскадном выполнении трансформаторов тока разделять сердечники также и в верхней ступени; это, однако, чрезмерно усложнило бы конструкцию и увеличило ее габариты.

Представляет интерес конструктивная схема для трансформаторов тока на особо высокие напряжения, предложенная в 1951 г. ныне покойным профессором А. А. Горевым (рис. 16), где увеличение ступеней по изоляции до четырех достигается при одноступенчатой схеме трансформации. Недостатком каскадной схемы противостоит несомненное преимущество, которое может иметь решающее значение: аппарат можно разделить по высоте на две самостоятельные части, которые допускают транспортировку по отдельности в готовом к эксплуатации виде.

Учтя вопросы надежности работы изоляции и в целях упрощения производства, транспортировки, монтажа и эксплуатации Куйбышевской электропередачи, сочли наиболее целесообразным в условиях весьма сжатых сроков освоения принять для поставок первой очереди двухступенчатый каскадный тип с цепной изоляцией обеих ступеней, расположенных в двух вертикальных колоннах, монтируемых друг на друге. Рис. 17 показывает внешний вид каскадного трансформатора тока на 400 кВ конструкции завода «Электроаппарат», на номинальный ток 2000 А. Описание конструкции этого трансформатора, его расчетные данные и результаты испытаний даны в статье инж. А. И. Коченовой и инж. А. А. Юдиной, помещенной в этом же номере журнала.

Из обзора существующих конструкций и проектных вариантов трансформаторов тока на особо высокие напряжения можно сделать следующие выводы:

1. Многообразие конструктивных схем трансформаторов показывает, что ни одна из них еще не показала бесспорных преимуществ перед другими. Это положение иллюстрируется хотя бы тем обстоятельством, что на первой линии электропередачи 380 кВ в Швеции было сочтено целесообразным установить трансформаторы тока по крайней мере трех различных конструкций и фирм: ASEA, BBC, Ritz.

2. Герметизация аппарата с масляным наполнением и устранение контакта масла с воздухом и влагой могут оказаться полезными для длительного сохранения высоких электрических характеристик изоляции. На изучение вопросов старения бумажно-масляной и кабельно-конденсаторной изоляции в эксплуатационных условиях должно быть обращено большое внимание.

3. Защита масла от соприкосновения со стальными частями конструкции, например, путем горячей их оцинковки, является целесообразной.

4. Бумажно-масляная изоляция может быть надежным решением для напряжений 380...400 кВ. Однако при всех модификациях этого типа изоляции, в том числе и кабельно-конденсаторной, она не дает очень больших запасов и поэтому требуется чрезвычайно тщательное ее проектирование и выполнение.

5. Монолитная (литая) изоляция в принципе является весьма устойчивой во времени и более простой по выполнению, чем бумажно-масляная, однако она совершенно недостаточно освоена для применения ее на особо высоких напряжениях.

6. Высокие разрядные характеристики аппарата обеспечиваются цельными крупногабаритными крышками в большей степени, чем составными с промежуточными фланцами. Обзорные материалы показывают явную тенденцию к применению именно цельных крышек, в том числе и склеенных в обожженном виде.

7. В обзорной литературе нет упоминаний о применении каких-либо специальных изоляционных масел для аппаратов на особо высокие напряжения.

В заключение следовало бы еще остановиться на вопросе о расчетных и испытательных напряжениях для трансформаторов тока на 380...400 кВ.

Изоляция серийных трансформаторов тока обычно по традиции рассчитывается на длительное приложение линейного напряжения по отношению к земле. Там это можно считать обоснованным, так как аппарат может быть установлен как в энергосистеме с глухо заземленной нейтралью, так и в системе с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через сопротивление. Однако, уже начиная со 110 кВ, эта традиция приводит к чрезмерно жестким требованиям к изоляции по условиям ее устойчивости в рабочем режиме.

В части аппаратов на 380...400 кВ, повидимому, нет двух мнений, и их изоляция повсюду

рассчитывается на фазное рабочее напряжение (по отношению к земле), так как эти энергосистемы имеют заведомо заземленную нейтраль и длительно-рабочий режим при линейном напряжении по отношению к земле никогда не может иметь места.

Испытательные напряжения, определяющие уровень изоляции аппарата в условиях коммутационных и атмосферных перенапряжений, зависят от реальных условий в энергосистеме, ее параметров, наличия или отсутствия продольной компенсации, типа выключателей, уровня защиты системы разрядниками и т. д. Данные зарубежных фирм свидетельствуют о большом разнообразии в этом отношении. Так, испытательное напряжение промышленной частоты для трансформаторов тока на 380 кВ изменяется от 750 (Oerlikon) до 977 кВ (Ritz). Как правило, испытательное напряжение промышленной частоты прикладывается на одну минуту.

Приложение III дает сводную таблицу характеристик известных нам выполненных трансформаторов тока на напряжения 380...400 кВ.

[9. 12. 1955]

Приложение I. Расчет толщины бумажно-масляной изоляции в случае одноступенчатой изолировки первичной обмотки на полное рабочее напряжение.

Задаемся рабочим градиентом в изоляции не выше 2...4 кВ/мм. Расчетное электрическое поле образуется цилиндрической жилой первичной обмотки, навитой на нее цилиндрической бумажно-масляной изоляцией, сравнительно нетолстой прослойкой чистого масла и заземленным фланцем изолятора (очевидно, самое узкое место, через которое обмотке придется пройти). Во избежание электрической перегрузки масла следовало бы подать потенциал земли уже на внешнюю поверхность бумажно-масляной изоляции, например путем нанесения слоя фольги с надлежащей защитой краев слоя. Тогда задача сводилась бы к расчету простейшего поля между двумя коаксиальными цилиндрами. В этом случае максимальный градиент на внутреннем цилиндре

$$G_r = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}},$$

где U — приложенное напряжение;
 r — радиус внутреннего цилиндра;
 R — радиус наружного цилиндра.
Отсюда

$$R = re^{\frac{U}{G_r \cdot r}}.$$

Проведем расчет для аппарата на 400 кВ с максимальным рабочим напряжением 420 кВ. Принимаем фазное напряжение 242 кВ, так как в сетях 380...400 кВ, как правило, нейтраль глухо заземлена. Берем запас в 15%, учитывая производственные отклонения от расчетной схемы, отклонения в качестве намотки, материалов и т. д. Получаем расчетное напряжение $U = 280$ кВ.

При выборе жилы первичной обмотки берем наиболее благоприятный случай, когда диаметр ее равен по крайней мере 100 мм (большие номинальные токи) ($r = 50$ мм).

Подставив соответствующие значения величин, получим:

а) при допустимом градиенте $G_r = 2$ кВ/мм

$$R = 50e^{\frac{280}{2 \cdot 50}} = 50 \cdot 16,444 = 822 \text{ мм},$$

когда толщина изоляции

$$\Delta = R - r = 772 \text{ мм};$$

б) при допустимом градиенте $G = 4$ кВ/мм

$$R = 50e^{\frac{280}{4 \cdot 50}} = 50 \cdot 4,055 = 203 \text{ мм},$$

отсюда $\Delta = 153$ мм, что тоже довольно много.

Сравнительная таблица характеристик трансформаторов тока на особо высокие напряжения

Приложение III

Изготовление Характеристика	Эрликон	Броун-Бовери	Ритц	ASEA	«Электроаппарат»		Метрополитен-Виккерс
					Опытный образец	Выпускаемый тип	
Номер рисунка	Рис. 1	Рис. 6	Рис. 2	Рис. 10	Рис. 15	Рис. 17	Рис. 12
Тип аппарата		TMR 380		1MBA-380	ТПН-400	ТФНК-400	
Конструкция	Первичная обмотка изолирована на полное напряжение	Восьмерочный. Фиксированный потенциал	Восьмерочный. Герметизированный с сильфоном	Первичная обмотка изолирована на полное напряжение	Первичная обмотка изолирована на полное напряжение	Восьмерочный каскад из двух единиц	Первичная обмотка изолирована на полное напряжение
Число ступеней трансформации	1	1	1	1	1	2	1
Число ступеней изоляции	1	2	2	1	1	4	1
Тип изоляции	БМИ	БМИ с разделками	БМИ с конденс. цилиндром	ККИ с песочным заполнением	ККИ	БМИ	ККИ
Напряжение, кВ	380	380	380	380	400	400	275
Ток первичный, А		1 200—600—300	1 200—600—300	800—400—200	2 000—1 000—500	2 000—1 000—5 000	1 200—600—300
Ток вторичный, А		2	2	2	1	1	2—1—0,5
На какой стороне переключения			Первичная	Первичная снаружи	Вторичная	Первичная	Без переключателя
Количество сердечников	4	3	4	3	4	4	5
Характеристики сердечника, № 1	Измерительный 60 ва, класс 0,5		Измерительный 40 ва, класс 0,5	Измерительный 30 ва, класс KWH	Защитн. Д, 75 ва	Защитн. Д, 75 ва	Измерительный 15 ва, Т
Характеристики сердечника № 2	Измерительный, 60 ва, класс 0,5		Защитн.	Защитн. 60 ва	Защитн. Д, 75 ва	Защитн. Д, 75 ва	Защитн.
Характеристики сердечника № 3	Защитн. 60 ва, S		Защитн.	Защитн. 3	Защитн. Д, 75 ва	Защитн. Д, 50 ва	Защитн.
Характеристики сердечника № 4	Защитн. 60 ва		Защитн. 3		Измерительный 75 ва, класс 1	Измерительный, 50 ва, класс 1	Защитн. Измерительный, 15 ва
Характеристики сердечника № 5							
Испытательное напряжение 50 гц, сухое, кВ	750	850	977	781	850	850	485 (575)
То же, мокрое, кВ			781	781	700	700	460
Испытательное напряжение импульсное полной волной, кВ _{макс}	1 600	1 775	1 775	1 775	1 500	1 500	1 050
Высота, мм		5 650	4 500	5 400	6 460	6 100	
Вес, кг, на 1 мвта транзитной мощности			6,68	12,1	6,25	11,4	

Приложение II. Сравнение расчетной толщины изоляции для простой бумажно-масляной и для кабельно-конденсаторной изоляции при номинальном напряжении 400 кВ.

Принимаем те же данные приложения I.

Для простой бумажно-масляной изоляции при одноступенчатой изолировке толщины изоляции были подсчитаны в приложении I.

При двухступенчатой изолировке (например, для восьмерочного типа изоляции), если считать, что диаметр электрода второй ступени изоляции (например, сердечник) равен также 100 мм, получим толщину изоляции на одну ступень из выражения

$$R = r \cdot e^{\frac{U}{n \cdot G_r r}},$$

где U — напряжение, приложенное к аппарату в целом;
 n — число ступеней изоляции.

Следовательно, при допустимом максимальном градиенте $G_r = 2$ кВ/мм получим:

$$R_2 = 50e^{\frac{280}{2 \cdot 2 \cdot 50}} = 203 \text{ мм},$$

откуда толщина изоляции на две ступени будет равна:

$$\Sigma \Delta = 2(R_2 - r) = 306 \text{ мм}.$$

При допустимом градиенте $G_r = 4$ кВ/мм получим:

$$R_4 = 50e^{\frac{280}{2 \cdot 4 \cdot 50}} \approx 100,$$

откуда

$$\Sigma \Delta = 2(R_4 - r) = 100 \text{ мм}.$$

Эти цифры верны только для строго цилиндрических электродов. В восьмерочных трансформаторах тока электроды имеют угловатости с малыми радиусами закругления, так что R_2 и R_4 будут больше.

Для кабельно-конденсаторной изоляции толщина может быть определена по формуле

$$\Delta = \frac{U}{G_r}.$$

следовательно:

$$\text{при } G_r = 2 \text{ кВ/мм } \Delta = 140 \text{ мм};$$

$$\text{при } G_r = 4 \text{ кВ/мм } \Delta = 70 \text{ мм}.$$

Так как выравнивание поля фактически не будет полным, то толщина конденсаторной изоляции будет несколько (на 10...15%) больше, чем указано выше.

Результаты предыдущих расчетов могут быть сведены в таблицу.

Расчетная толщина бумажно-масляной изоляции при различных типах изоляции (расчетное напряжение по отношению к земле 280 кВ)

Расчетный максимальный градиент, кВ/мм	Толщина, мм		
	Для простой ЕМИ одноступенчатой	Для восьмерочной ЕМИ (суммарная толщина двух ступеней)	Для ККИ одноступенчатой
2	772	306	140
4	153	100	70

Литература

1. A. Métraux. Измерительные трансформаторы и компенсационные устройства в установках на 380 кВ. Bull. des SEV, № 4, 1952.
2. M. Itschner. Трансформаторы для 380-кВ линий электропередачи. Bull. des SEV, № 4, 1952.
3. Обзор развития конструкций фирмы Броун-Бовери в 1953 г. BBM, № 1'2, 1954.
4. B. Olsson. Маломасляные трансформаторы тока. ASEA-Journ., № 8—9, 1949.
5. B. Olsson. Трансформаторы тока на 380 кВ, ASEA Journ., № 7—8, 1953.
6. Сообщение о Ганноверской ярмарке, ETZ, № 9, 1952.
7. Bull. des SEV, № 4, 1952. Дискуссия по докладом.
8. N. A. Sh-ton. Новый трансформатор тока на 275 кВ для наружной установки. The Metropolitan-Vickers Gazette, т. XXV, № 423, 1950.
9. H. Hartmann. Измерительные трансформаторы на 380 кВ. BBM, № 9, 1954.
10. H. Ritz. Измерительные трансформаторы для сетей на сверхвысокие напряжения. ETZ, № 9, 1954.

Трансформаторы тока на 400 кВ для линии электропередачи Куйбышев—Москва

Инж. А. И. КОЧЕНОВА, инж. А. А. ЮДИНА

Завод «Электроаппарат»

Введение. К трансформаторам тока, предназначенным для электропередачи Куйбышев — Москва с номинальным напряжением 400 кВ, были предъявлены значительно более жесткие требования, чем к трансформаторам тока на напряжения до 220 кВ включительно. Это касалось не только характеристик изоляции, но также и величин номинальных токов и вторичных нагрузок. Ниже приводятся основные из этих требований.

1. Номинальное напряжение 400 кВ.
2. Наибольшее рабочее напряжение 420 кВ.
3. Номинальный первичный ток 500...1 000...2 000 А.
4. Номинальный вторичный ток 1 А.
5. Число сердечников 4; их номинальные нагрузки:
 - а) Д № 1 — 75 ВА; б) Д № 2 — 75 ВА;
 - в) Д № 3 — 50 ВА; г) класс 1 — 50 ВА. Все сер-

дечники предназначены для питания схем защиты, а один из них (класса 1) — также и для измерений; Д — обозначение сердечников в исполнении для дифференциальной защиты.

6. Кратность первичного тока, при которой токовая погрешность достигает—10% (10-процентная кратность), при указанных вторичных нагрузках, должна быть не ниже 12.

7. Погрешности всех сердечников при номинальной вторичной нагрузке не должны превышать значений, указанных в табл. 1.

8. Ветровая нагрузка — соответственно второму району климатических условий: толщина корки льда 1 см, скорость ветра при отсутствии обледенения 25 м/сек, а при наличии—10 м/сек.

9. Трансформаторы тока должны быть рассчитаны для длительной работы при температуре окружающего воздуха от —40° до +35° С (с эпизодическим понижением температуры воздуха в

Таблица 1

Первичный ток, % от номинального	Токовые погрешно- сти, %	Угловые погрешно- сти, град.
5...10	10	7
50...100	2	5
150...300	5	7
1 200	10	7

реальных условиях эксплуатации до -45°C и повышением ее до $+40^{\circ}\text{C}$).

10. Трансформаторы тока должны выдерживать ударный ток 35 000 а и односекундный ток 12 500 а.

11. Испытательное напряжение (при 50 гц) 850 кв в течение 1 мин, мокроразрядное напряжение — не ниже 700 кв.

12. Импульсное испытательное напряжение полной волной $\pm 1,5/40$ мксек (при трехударном методе) 1 500 кв_{макс}, срезанной волной ± 2 мксек: 1 800 кв_{макс}.

Кроме того, к изоляции трансформатора тока 400 кв были предъявлены особые требования в отношении ионизационных характеристик (см. ниже).

Работа по созданию трансформатора тока, удовлетворяющего указанным требованиям, велась двумя путями.

Первый путь — разработка трансформатора тока на базе новых изоляционных материалов, позволяющих получить трансформатор с минимальными габаритами и весом.

Второй путь — использование многолетнего опыта производства и эксплуатации трансформаторов тока серии ТФН на напряжения 35... 220 кв, т. е. создание трансформатора тока на 400 кв в развитие этой серии.

Естественно, что первый путь представлял большие трудности и требовал большего времени. Однако и создание трансформатора тока по типу ТФН также оказалось достаточно сложным, так как при переходе от напряжения 220 к 400 кв не удалось воспользоваться приемами, успешно применявшимися при переходе от 110 к 220 кв.

В результате рассмотрения нескольких принципиально различных конструктивных исполнений трансформаторов тока на 400 кв было разработано два варианта: 1) трансформатор тока с одноступенчатой кабельно-конденсаторной изоляцией, в принципе аналогичной изоляции, применяемой заводом «Электроаппарат» для вводов высоковольтных аппаратов, и 2) так называемый каскадный тип с бумажно-масляной изоляцией по типу изоляции трансформаторов тока ТФН, разделенной на две ступени, каждая из которых рассчитана на половинное напряжение.

Опытные образцы той и другой конструкции были подвергнуты исследованиям. Однако из-за чрезвычайной ограниченности во времени оказалось невозможным провести всестороннее исследование кабельно-конденсаторной изоляции к требуемому сроку. Учитывая это, а также отсутствие производственного и эксплуатационного

опыта по кабельно-конденсаторной изоляции, было решено принять к производству для поставок первой очереди каскадный тип и продолжать работу по освоению кабельно-конденсаторной изоляции.

Описание конструкции и выбор параметров. Эскиз разработанного каскадного трансформатора тока приведен на рис. 1. Трансформатор состоит из двух отдельных ступеней, установленных одна над другой. Каждая ступень (рис. 2) является ступенью по напряжению и одновременно ступенью трансформации тока и представляет собой трансформатор тока с обмотками «восьмерочного» типа, расположенными в фарфоровой крышке, заполненной трансформаторным маслом.

Каждая ступень конструктивно оформлена в виде самостоятельной единицы, которая в отдельности проходит технологический цикл, испытывается и транспортируется. Это является большим преимуществом данного варианта конструкции, так как упрощает по сравнению с одноступенчатым вариантом технологию сборки и транспортировку, позволяя применять нормальные железнодорожные платформы.

Для верхней ступени принят один сердечник с первичной обмоткой, выполненной из четырех секций, каждая из которых рассчитана на номинальный ток 500 а. При номинальном токе 2 000 а секции включаются параллельно, при токе 1 000 а — последовательно-параллельно и при токе 500 а — последовательно. Переключение осуществляется при помощи контактных планок переключателя, установленного в маслорасширителе.

Промежуточный ток, т. е. вторичный ток верхней ступени и первичный — нижней, выбран равным 20 а. Сердечник с обмотками и фарфоровая крышка верхней ступени установлены на цоколе. На фарфоровой крышке установлен общий маслорасширитель, объем которого рассчитан на возможные колебания уровня масла полностью собранного трансформатора тока.

Нижняя ступень имеет четыре сердечника, охватываемые общей первичной обмоткой. Номинальный вторичный ток равен 1 а.

Первичная обмотка верхней ступени включается в линию, а вторичная питает первичную обмотку нижней ступени. К вторичным обмоткам нижней ступени присоединяется внешняя нагрузка. Электрическая схема обмоток приведена на рис. 3.

Намагничивающая сила верхней ступени определяется наибольшим первичным током и равна $2\,000 \cdot 1 = 2\,000$ аб. Остальные параметры электромагнитных цепей обеих ступеней выбраны по заданной 10-процентной кратности таким образом, что при номинальной внешней нагрузке рабочие индукции в сердечниках Д и в сердечнике верхней ступени одинаковы и насыщение их наступает одновременно.

Сердечник класса 1, расположенный внутри сердечников Д, имеет запас по 10-процентной кратности.

Нижняя ступень снабжена тележкой с пово-

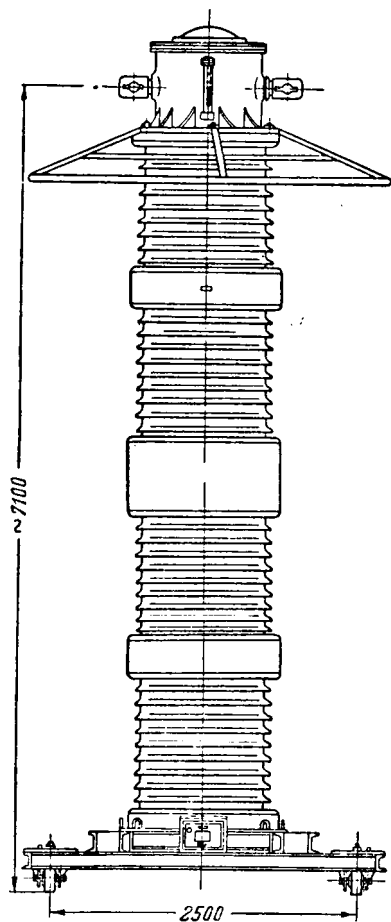


Рис. 1. Общий вид трансформатора тока ТФНКД-400.

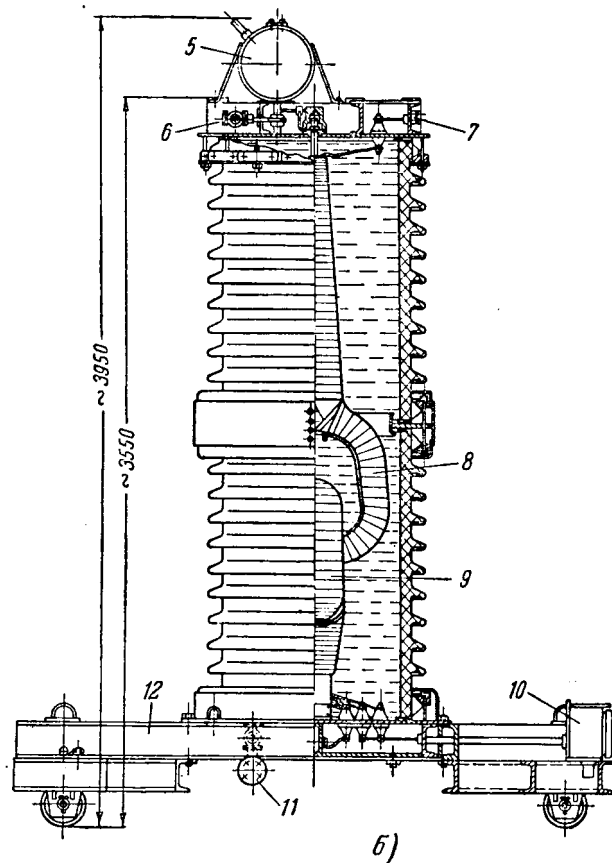
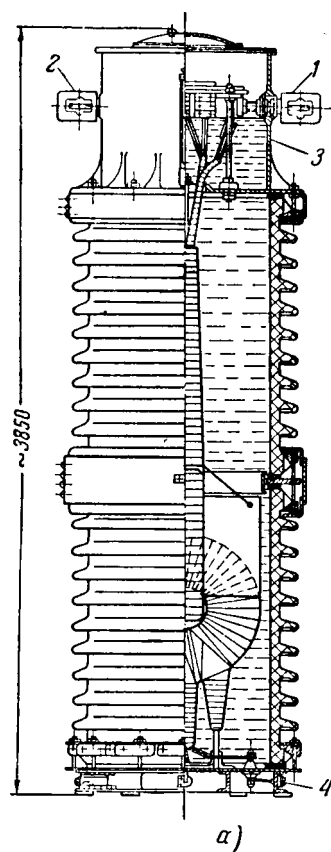


Рис. 2. Эскиз отдельных ступеней трансформатора тока ТФНКД-400.

а — верхняя ступень; б — нижняя ступень; 1 — вывод L_1 ; 2 — вывод L_2 ; 3 — маслорасширитель; 4 — выводы вторичной обмотки; 5 — временный маслорасширитель; 6 — цоколь; 7 — выводы первичной обмотки; 8 — первичная обмотка; 9 — вторичная обмотка; 10 — шкаф выводов вторичной обмотки; 11 — кран для спуска масла; 12 — тележка.

ротными катками. На тележке расположен шкаф выводов вторичных обмоток со встроенными в него четырьмя короткозамыкателями (по одному на каждую вторичную обмотку). В рабочем положении трансформатора тока доступ к контактным зажимам вторичных обмоток прегражден специальными заслонками. Назначение короткозамыкателя заключается в замыкании накоротко и заземлении данной вторичной обмотки при поднятии заслонки. Таким образом, наличие короткозамыкателя позволяет производить проверку контактов и переключение приборов в данной вторичной цепи, не отключая трансформатора

тока и оставляя в работе остальные вторичные цепи.

Так как общий маслорасширитель установлен на верхней ступени, то нижняя ступень на время транспортировки снабжается временным маслорасширителем. После того как ступени смонтированы одна над другой, их внутренние полости соединяются общим маслопроводом.

Характеристики изоляции. Основной внутренней изоляцией обмоток трансформаторов тока серии ТФН является бумажно-масляная изоляция, хорошо зарекомендовавшая себя в течение многих лет ее применения на напряжениях 35... 220 кв. Восьмерочная конструкция обмоток позволяет весьма рационально использовать эту изоляцию, распределяя ее поровну на первичной и вторичной обмотках каждой ступени.

Испытание изоляции было проведено Научно-исследовательским институтом постоянного тока (НИИПТ). Испытание велось как на отдельных ступенях, так и на полностью собранном трансформаторе. Испытание отдельных ступеней включало: а) определение зависимости $\lg \delta$ от напряжения; б) проверку наличия запаса в отношении теплового пробоя путем измерения зависимости $\lg \delta$ от времени при напряжении, превышающем наибольшее рабочее на 10%, и температуре, соответствующей максимально возможной

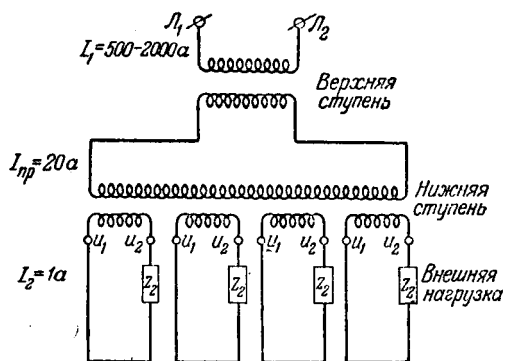


Рис. 3. Электрическая схема трансформатора тока ТФНКД-400.

температуре нагрева обмоток; в) определение минимального ионизационного напряжения.

Кроме того, была снята зависимость тока проводимости от напряжения при выпрямленном напряжении от 50 до 200 кВ и измерено сопротивление изоляции мегомметром на 2500 В через 15 и 60 сек после приложения напряжения. Эти данные требуются для оценки состояния изоляции в эксплуатации при профилактических испытаниях.

В качестве контрольной проверки после проведения всех указанных исследований на каждую ступень было подано испытательное напряжение 500 кВ при 50 Гц в течение 5 мин.

На полностью собранном трансформаторе тока были произведены следующие испытания: а) определение начала видимой короны; б) измерение распределения напряжения по ступеням; в) определение зависимости $\lg \delta = f(U)$; г) определение мокроразрядного напряжения; д) испытание импульсным напряжением (трехударным методом) 1500 и 1800 кВ_{макс}; е) испытание напряжением 850 кВ, 50 Гц, приведенным к нормальным атмосферным условиям, в течение 1 мин; ж) определение сухоразрядного напряжения.

Все указанные испытания отдельные ступени и полностью собранный трансформатор тока выдержали. Сопротивление изоляции верхней ступени получилось более 10 000 мгом как через 15, так и через 60 сек после приложения напряжения. Ток проводимости находился в пределах от $1,5 \cdot 10^{-8}$ до $3,5 \cdot 10^{-8}$ А. Напряжение начала видимой короны (у сухого трансформатора) составляло 380 кВ.

При измерении распределения напряжения по отдельным ступеням оказалось, что на верхнюю ступень падает ~55%, а на нижнюю ~45% от напряжения, приложенного ко всему трансформатору тока. Следовательно, изоляция верхней ступени работает в несколько более тяжелых условиях по сравнению с изоляцией нижней ступени. Так как неравномерность составляет всего 10% от среднего значения, то отпала необходимость в разработке первоначально намеченного специального устройства для принудительного выравнивания напряжения по отдельным ступеням.

Мокроразрядное напряжение оказалось выше 800 кВ. Заметная корона под дождем появляется при напряжении 350 кВ.

Трансформатор тока был испытан четырьмя ударами полной волны 1500 кВ_{макс} и тремя ударами срезанной волны 1800 кВ_{макс}. Исправность состояния изоляции после испытания импульсами была проверена приложением испытательного напряжения 750 кВ в течение 5 мин (причем не было отмечено никаких неблагоприятных явлений), а также повторным измерением зависимости $\lg \delta = f(U)$. После того как трансформатор тока выдержал испытательное напряжение 850 кВ в течение 1 мин, у него было определено сухоразрядное напряжение, которое оказалось равным 1000 кВ.

Испытание на теплоустойчивость, т. е. проверка наличия достаточного запаса электрической прочности изоляции в отношении теплового пробоя, производилась на верхней ступени. Согласно ГОСТ 1516-42 теплоустойчивость изоляции характеризуется тем, что угол диэлектрических потерь не изменяется с течением времени при напряжении, превышающем наибольшее рабочее на 10%, при тепловом режиме, эквивалентном режиму при номинальном токе, и при температуре окружающего воздуха +35°С.

Наибольшее рабочее напряжение верхней ступени $U_{\text{раб}}$ определялось, исходя из коэффициента неравномерности распределения напряжения по ступеням 1,1. Для запаса этот коэффициент был увеличен до 1,2, тогда

$$U_{\text{раб}} = \frac{420}{\sqrt{3.2}} \cdot 1,2 = 145 \text{ кВ.}$$

Следовательно, напряжение, при котором должна быть проверена теплоустойчивость верхней ступени согласно ГОСТ 1516-42, будет:

$$U'_{\text{раб}} = U_{\text{раб}} 1,1 = 160 \text{ кВ.}$$

Нагрев обмоток верхней ступени до максимально возможной температуры осуществлялся путем пропуска тока с вторичной стороны (при короткозамкнутой первичной обмотке); при этом окружающий воздух был подогрет до температуры 35°С. Одновременно к первичной обмотке подводилось высокое напряжение. Верхняя ступень предварительно была нагрета до установившейся температуры.

Для контроля перед испытанием на теплоустойчивость была снята зависимость $\lg \delta = f(U)$. Верхняя ступень выдержала испытание на теплоустойчивость при 160, 200 и 240 кВ. При переходе от ступени к ступени $\lg \delta$ возрастал соответственно его зависимости от напряжения, а затем достигал установившегося значения. После всех испытаний по определению теплового запаса вновь была снята кривая $\lg \delta = f(U)$, которая практически не отличалась от кривой, снятой перед испытанием.

Таким образом, верхняя ступень, работающая в более тяжелых условиях, чем нижняя, имеет вполне достаточный запас электрической прочности изоляции в отношении теплового пробоя.

Исследование ионизационных характеристик изоляции проводилось НИИПТ по разработанной им методике. Ионизационные характеристики трансформаторов тока с бумажно-масляной изоляцией до сих пор не проверялись, однако многолетний успешный опыт эксплуатации трансформаторов типа ТФН до 220 кВ свидетельствует о том, что в этих трансформаторах тока при рабочих режимах ионизационные процессы отсутствуют.

Ионизационные характеристики определялись на пробном образце каскадного трансформатора тока, а в дальнейшем были проверены и на производственном образце.

От непосредственного измерения напряжения ионизации при таких высоких напряжениях при-

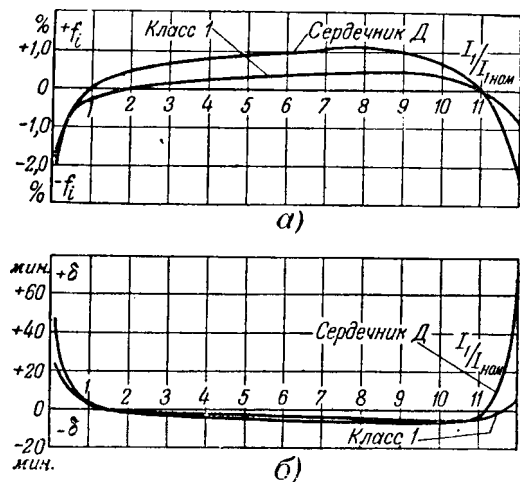


Рис. 4. Расчетные кривые погрешностей трансформатора тока ТФНКД-400 при номинальной нагрузке всех сердечников с $\cos \varphi = 0,8$.

а — токовые погрешности; б — угловые погрешности.

шлось отказаться. Для его определения был применен косвенный метод, основанный на росте угла диэлектрических потерь вследствие повышения интенсивности ионизации и возрастания ионизационных потерь. Этот метод не может претендовать на определение точной величины ионизирующего напряжения, но позволяет установить наличие или отсутствие ионизации при данном приложенном напряжении.

Ионизационные испытания производились на отдельных ступенях трансформатора, включенных параллельно и предварительно нагретых номинальным током. Перед испытанием на обеих ступенях была снята зависимость $\lg \delta = f(U)$ в холодном и нагретом состоянии. Затем на каждую ступень (в нагретом состоянии) подавалось напряжение 160 кВ в течение не менее 24 час с тем, чтобы быть уверенными в отсутствии роста $\lg \delta$. После этого давалось два кратковременных воздействия напряжением 450 кВ (трехкратное по отношению к фазному — уровень возможных перенапряжений) с некоторым интервалом между ними, далее напряжение снижалось до 160 кВ и поддерживалось неизменным в течение 24...48 час.

Во время всего цикла испытания, длившегося около 100 час, $\lg \delta$ оставался практически неизменным. Кривая $\lg \delta = f(U)$, снятая после окончания ионизационных испытаний, почти не отличалась от кривой, снятой перед ионизационными испытаниями. Таким образом, можно считать, что при рабочем напряжении в каскадном трансформаторе тока на 400 кВ, подвергнутом воздействию перенапряжений, равных трехкратному фазному напряжению, ионизационные процессы отсутствуют.

Погрешности. Погрешности двухступенчатого каскадного трансформатора тока складываются из погрешностей обеих его ступеней. Нагрузкой верхней ступени является полное сопротивление нижней ступени вместе с присоединенными при-

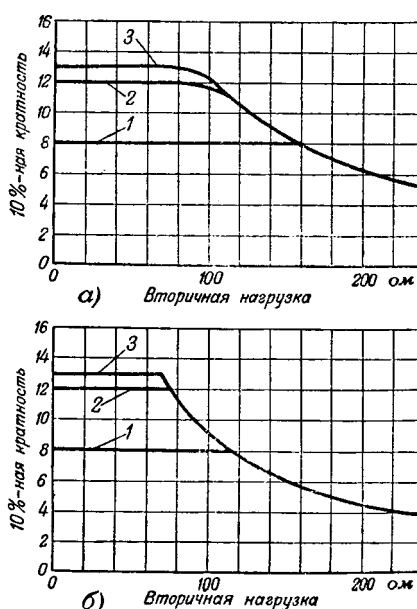


Рис. 5. Кривые зависимости 10-процентной кратности сердечников Д и класса 1 трансформаторов тока ТФНКД-400 от вторичной нагрузки.

а — сердечник класса 1; б — сердечник Д; 1 — нагрузка остальных сердечников 120 + 120 + 120 ом; 2 — то же 75 + 75 + 50 ом; 3 — то же 37,5 + 37,5 + 25 ом.

борами и реле; поэтому погрешности верхней ступени зависят от внешней нагрузки и, таким образом, погрешности каждого сердечника зависят от нагрузки остальных сердечников. Однако практически в пределах 8...10-кратного тока изменение вторичной нагрузки каскада на 50...100 ом мало сказывается по сравнению со значительным индуктивным сопротивлением первичной обмотки нижней ступени. В заводских материалах даются погрешности ТФНКД-400 при номинальной и при нулевой нагрузке всех сердечников.

На рис. 4 приведены расчетные кривые погрешностей сердечников Д и класса 1 до 12-кратного тока при номинальной нагрузке с $\cos \varphi = 0,8$, а на рис. 5 — расчетные кривые 10-процентных кратностей сердечника Д и сердечника класса 1 построены при нагрузке остальных сердечников, равной номинальной¹, половине номинальной и повышенной (3 · 120 ом).

Вследствие взаимной связи сердечников каскада ход кривых 10-процентных кратностей на разных участках определяется характеристиками либо данного сердечника, либо остальных сердечников, либо верхней ступени. При малых кратностях тока (соответствующих большим нагрузкам) суммарные погрешности определяются насыщением нижней ступени, индукция же в верхней ступени невелика и изменение внешней нагрузки нижней ступени сказывается слабо. Поэтому все три кривые, относящиеся к разным нагрузкам, сливаются в одну. При больших кратностях тока суммарные погрешности определяются насыщением верхней ступени, начинает сказываться величина нагрузки, и кривые разделяются. При нагрузке соседних сердечников, равной 120 ом, погрешности определяются насыщением

¹ Нагрузка сердечника Д № 3 в этом расчете принята равной 75 ом, как и для Д № 1 и 2.

этих сердечников, и 10-процентная кратность всего трансформатора ТФНКД-400 определяется 10-процентной кратностью этих сердечников, равной 8.

При номинальной нагрузке всех сердечников 10-процентная кратность ТФНКД-400 равна 12.

Говоря о взаимном влиянии сердечников каскада, следует особо остановиться на случае размыкания одной из вторичных обмоток. В сердечнике с разомкнутой обмоткой индукция возрастает, повышается индуктивное сопротивление сердечника, нагрузка верхней ступени и ее погрешности увеличиваются, в результате повышаются погрешности остальных сердечников.

В табл. 2 приведены значения индукции в сердечнике класса I при размыкании его обмотки, полное вторичное сопротивление верхней ступени при замкнутой и при разомкнутой обмотке сердечника класса I и расчетные погрешности верхней ступени для обоих случаев. Эти данные указаны при разных первичных токах. Мы видим, что при выбранных параметрах каскада размыкание обмотки сердечника класса I заметно влияет на погрешности остальных сердечников только при малых первичных токах, когда особенно велико возрастание индукции, вызванное размыканием обмотки, а также при приближении к насыщению верхней ступени, когда даже небольшое увеличение ее нагрузки значительно увеличивает н. с.

Размыкание обмотки сердечника Д сказывается меньше: при 5-процентах номинального тока расчетная токовая погрешность верхней ступени равна 6%, в то время как при размыкании сердечника класса I она составляет 12,9%.

Опытные кривые погрешностей ТФНКД-400 до 120% номинального тока при среднем качестве стали приведены на рис. 6 и 7. Как правило, сердечник класса I имеет запас по погрешностям;

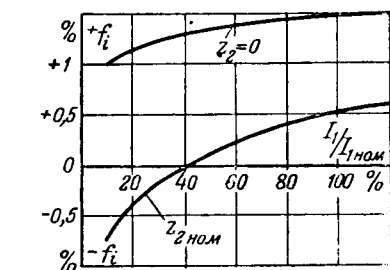


Рис. 6. Опытные кривые погрешностей трансформатора тока ТФНКД-400 (сердечник Д).

а — токовые погрешности; б — угловые погрешности.

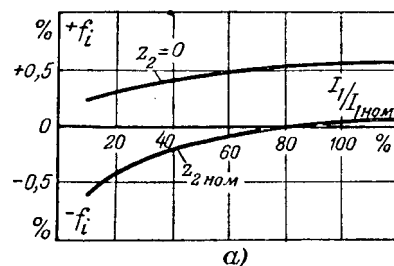


Рис. 7. Опытные кривые погрешностей трансформатора тока ТФНКД-400 (сердечник класса I).

а — токовые погрешности; б — угловые погрешности.

токовые погрешности сердечников Д укладываются в пределы $\pm 2\%$, угловые — в пределы $+60 \dots -20$ мин.

В Ленинградском филиале ВЭИ были проведены погрешности трансформатора ТФНКД-400 до 13-кратного тока при нагрузке всех сердечников Д по 75 ом и сердечника класса I — 50 ом при нагрузке с $\cos \varphi = 0,8$. В пределах 12-кратного тока отрицательные токовые погрешности сердечников Д не превышали $-3,1\%$, сердечника класса I — $1,2\%$, угловая погрешность сердечника Д не превышала 80 мин. При 13-кратном токе отрицательные токовые погрешности сердечников Д были меньше 5%. При синусоидальной форме кривой первичного тока вторичный ток также оставался практически синусоидальным.

Взаимное влияние сердечников иллюстрируется опытными данными, приведенными в табл. 3. При увеличении нагрузки соседних сердечников от нуля до номинальной погрешности сердечников класса I и Д в пределах номинального тока

Таблица 2

Влияние размыкания вторичной обмотки сердечника класса I трансформатора тока ТФНКД-400 на погрешности верхней ступени

$I/I_{ном}, \%$	Максимальные значения индукции в сердечнике класса I, Гс, при вторичной нагрузке, ом		Полная нагрузка верхней ступени, ом		Расчетная токовая погрешность верхней ступени, %	
	50	∞	при номинальной нагрузке всех сердечников	при разомкнутой обмотке сердечника класса I и номинальной нагрузке остальных сердечников	при номинальной нагрузке всех сердечников	при разомкнутой обмотке сердечника класса I и номинальной нагрузке остальных сердечников
5	36	12 800	2,4	51,4	-1,2	-12,9
10	72	15 100	2,4	31,2	-0,7	-7,05
50	358	17 000	2,4	8,9	0,09	-0,8
100	716	17 650	2,4	5,7	0,36	-0,05
500	3 580	18 750	2,4	2,9	0,65	0,54
1 000	7 160	19 600	2,4	2,6	0,6	0,38
1 200	8 600	20 000	2,4	2,6	0,54	-7,6

Таблица 3

Влияние нагрузки соседних сердечников на погрешности испытуемого сердечника

Обозначение сердечника	Внешняя нагрузка, ом		Погрешности при первичном токе, % от номинального									
			5		10		20		50		100	
	испытуемого сердечника	остальных сердечников	$f_i, \%$	$\delta, \%$	$f_i, \%$	$\delta, \%$	$f_i, \%$	$\delta, \%$	$f_i, \%$	$\delta, \%$	$f_i, \%$	$\delta, \%$
Класс 1 (суммарные погрешности)	50	0	-0,32	22,6	-0,12	16,5	0,06	11,5	0,25	5	0,4	2
		Д № 1 — 75 Д № 2 — 75 Д № 3 — 50	-0,45	28	-0,27	21,5	-0,08	13,6	0,15	7	0,3	3
Д № 3 (суммарные погрешности)	75	0	-0,18	42	0,12	31,5	0,48	19,5	0,8	9	1,05	3
		Д № 1 — 75 Д № 2 — 75 Класс 1 — 50	-0,45	43	-0,03	33	0,35	21	0,7	10,5	0,96	4,5
		Д № 2 — 0 Д № 1 — 75 Класс 1 — 50	-0,18	40	0,03	31,5	0,39	20,5	0,74	9,6	0,99	4,5
Верхняя ступень	0		0,26	-0,6	0,36	-1	0,48	-2,5	0,6	-4	0,69	-6
	Д № 1 — 75; Д № 2 — 75; Д № 3 — 50; класс 1 — 50		0,08	4,6	0,225	0,6	0,35	-0,6	0,48	-3,5	0,6	-2,5
	Д № 1 — 150; Д № 2 — 75; Д № 3 — 50; класс 1 — 50		-0,04	9	0,13	3,5	0,24	-1,5	0,44	-2	0,57	-2,3
	Д № 1 — ∞; Д № 2 — 75; Д № 3 — 50; класс 1 — 50		-6,3	45								

изменились (за счет изменения погрешности верхней ступени) на 0,1...0,3% и на 1...5 мин. При дальнейшем увеличении внешней нагрузки каскада на 75 ом погрешности верхней ступени изменяются еще на 0,12% и несколько минут.

При размыкании обмотки сердечника Д токовая погрешность верхней ступени при 5% номинального тока оказалась равной 6,3%, что хорошо согласуется с расчетом.

Напряжение на вторичных обмотках. Величина вторичного тока 1 а, обусловленная заказчиком, при определенных экономических и технических преимуществах имеет ряд недостатков, к которым прежде всего относится большое напряжение на вторичных обмотках. Действительно, при замыкании вторичной обмотки на внешнюю нагрузку 75 ом уже при 12-кратном токе (гарантируемая 10-процентная кратность) напряжение на вторичных зажимах равно 900 в и может быть еще значительно выше при увеличении токов короткого замыкания.

Большой пик напряжения получается при размыкании одной из вторичных обмоток (табл. 4).

Таблица 4

Расчетные значения амплитуды напряжения, $kV_{\max}$, на разомкнутых вторичных обмотках трансформатора тока ТФНКД-400

$I/I_n, \%$	Сердечник класса 1	Сердечник Д	Сердечник верхней ступени
50	14	10	7,5
100	20	13	10

Вопрос о защите от чрезмерного повышения напряжения на разомкнутой вторичной обмотке пока остается открытым. Трудность задачи состоит в том, что защита должна срабатывать от повышения напряжения при размыкании обмотки и в то же время не должна реагировать на повышение напряжения при сквозных токах короткого замыкания. При этом, если защита окажется недостаточно надежной и простой, она сама может вызывать ложные отключения или даже служить источником аварий.

В связи с большими значениями амплитуды напряжения на разомкнутых обмотках приняты меры по усилению междувитковой изоляции. Тем не менее режим работы с разомкнутой обмоткой, конечно, недопустим, и размыкание, если оно произойдет, должно быть ликвидировано в кратчайший срок.

Для защиты обслуживающего персонала от высокого напряжения на обмотках доступ к вторичным зажимам возможен только после замыкания накоротко и заземления обмоток.

Нагрев при длительной работе. Трансформатор тока ТФНКД-400 рассчитан для длительной работы при токе 2000 а. Полностью собранный трансформатор прошел испытание на длительный нагрев током 2000 а в течение 38 час до установившейся температуры. Все части трансформатора тока имели достаточный запас по нагреву.

Устойчивость при токах короткого замыкания. Расчет термической устойчивости трансформатора производился общепринятым методом по кривым адиабатического нагрева для меди. По расчету

Трубчатые разрядники типа РТВ

Инж. Ф. В. БЕЗРУКОВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Для защиты линейной изоляции от атмосферных перенапряжений наибольшее распространение получили фибробакелитовые трубчатые разрядники типа РТ. В этих разрядниках в качестве газогенерирующего материала используется фибра, уплотненная бакелизированной бумагой для придания ей большей механической прочности.

Из опыта эксплуатации фибробакелитовых разрядников известно, что при условии использования высококачественной фибры они обладают вполне достаточными дугогасящими свойствами, однако сильно страдают от поверхностных и межслойных перекрытий, что приводит к частому выходу их из строя. Аварийность фибробакелитовых разрядников растет из года в год, несмотря на все меры, принимаемые эксплуатирующими организациями.

Согласно данным Центральной научно-исследовательской электротехнической лаборатории (ЦНИЭЛ) МЭС, проводившей работы по исследованию опыта эксплуатации грозозащиты энергосистем на протяжении 1947 ... 1953 гг., процент вышедших из строя разрядников по отношению к числу установленных и к количеству работавших увеличился за последние 7 лет соответственно с 0,2 до 0,75 % и с 2 до 4,3 %.

В последние годы в эксплуатацию начинали поступать трубчатые разрядники типа РТВ, разработанные во Всесоюзном ордена Ленина электротехническом институте им. Ленина и выпускаемые заводом «Электроаппарат» МЭП.

В новом типе трубчатых разрядников в отличие от фибробакелитовых в качестве изоляционного и газогенерирующего материала используется полихлорвиниловый пластикат марки «винипласт», освоенный в 1949 г. нашей химической промышленностью.

Винипласт представляет собой термопластичный материал, который при термическом разло-

жении выделяет значительно большее количество газов, чем фибра, является хорошим изоляционным материалом и не изменяет своих изоляционных свойств от долгого пребывания на открытом воздухе.

Вследствие стабильности свойств винипласта и его высокой влагостойкости изготавливаемые из него трубчатые разрядники можно эксплуатировать в течение ряда лет без ежегодного демонтажа, с сохранением их характеристик.

Согласно данным ЦНИЭЛ разрядники типа РТВ имеют сравнительно малый процент (0,25 %) аварийности, причем в этот процент входят аварии, происшедшие при ненормальных условиях работы разрядников.

К недостаткам нового типа трубчатых разрядников относятся содержание соляной кислоты в продуктах разложения полихлорвинила и сравнительно низкая термостойкость винипласта, что создает некоторое ограничение в возможности использования трубчатых разрядников типа РТВ.

Конструктивные особенности разрядников типа РТВ. Трубчатые разрядники типа РТВ на все классы напряжения от 6 до 110 кВ по конструктивному оформлению аналогичны и отличаются только габаритными размерами (рис. 1, табл. 1).

Дугогасительная трубка разрядника, изготовленная из винипласта, армируется в стальные обоймы при помощи винтовой нарезки или обкатки. Внутри дугогасительной трубки помещается стержневой электрод, который крепится при помощи резьбы в хвостовике внешнего электрода, ввернутого на резьбе в обойму закрытого конца разрядника.

На внешнем электроде имеется нарезное отверстие, служащее для крепления удлинителя (рога). Вторым электродом внутреннего дугогасительного промежутка служит шайба с отверстиями в виде звездочки. Таким образом, дости-

при требуемой односекундной термической устойчивости 12 500 кА повышение температуры обмоток с учетом длительного нагрева номинальным током оказалось ничтожно малым.

При расчете электродинамической устойчивости проверялись усилия, возникающие в обмотках, между выводными концами и в некоторых конструктивных узлах. Расчет производился только для верхней ступени, в которой получают значительно большие усилия, так как ее н. с. составляет 2 000 А против 1 200 А для нижней ступени.

Электродинамическая устойчивость верхней ступени проверялась опытным путем в Ленинградском филиале ВЭИ. Испытание проводилось при последовательном и при параллельном соединении первичной обмотки. Трансформатор выдержал без всяких изменений токи короткого замыкания до 43 кА при гарантируемой устойчивости 35 кА. Результаты испытания свидетельствуют о том, что трансформатор может выдержать токи и более 43 кА.

Закключение. Производство трансформаторов тока на 400 кВ конструкции завода «Электроаппарат» освоено на заводах МЭП в 1954 г. К достоинствам этих трансформаторов с точки зрения производства и эксплуатации относятся: надежная конструкция, базирующаяся на положительном многолетнем опыте эксплуатации трансформаторов тока серии ТФН; применение хорошо освоенной производством технологии изоляционных работ, общей с трансформаторами тока на 220 кВ; унификация фарфоровых покрышек и ряда других деталей с трансформаторами тока на 220 кВ; удобство транспортировки благодаря разделению выполнению ступеней.

Недостатками разработанной конструкции являются большие габариты и вес, а также отсутствие запаса по 10-процентной кратности и невозможность ее увеличения.

Работа на заводах МЭП над различными конструкциями трансформаторов тока на 400 кВ продолжается.

[3 6. 1955]



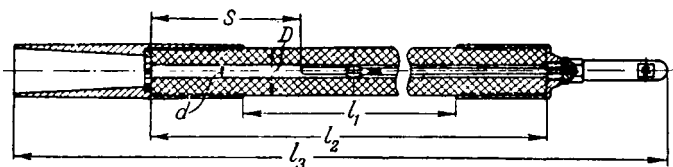


Рис. 1. Трубчатый разрядник типа РТВ. Габаритные размеры указаны в табл. 1.

Таблица 1

Габаритные размеры разрядников типа РТВ
(обозначения указаны на рис. 1)

Тип разрядников	S	d	D	l ₁	l ₂	l ₃
РТВ-6-10 2-15	60	11	45	260	430	672
РТВ-15 2-12	80	11	45	300	470	712
РТВ-20 2-12	100	11	45	350	520	760
РТВ-35 2-10	140	11	45	470	640	882
РТВ-60 2-8	200	11	55	680	850	1125
РТВ-110 2-8	300	14	55	1000	1200	1472

гаются неравномерность электрического поля между электродами, что приводит к понижению разрядного напряжения разрядника при промышленной частоте.

В трубчатых разрядниках РТВ отсутствует явно выраженный газовый резервуар на закрытом конце, имеющийся в разрядниках РТ. Согласно проведенным исследованиям наличие резервуара большого объема приводит к значительному снижению скорости нарастания электрической прочности в дугогасительном канале разрядника после обрыва им тока промышленной частоты, а следовательно, и к понижению его дугогасящей способности. Из рис. 2 видно, что при объеме газового резервуара от 40 до 140 см³ восстанавливающаяся прочность дугового промежутка разрядника постоянна и составляет при-

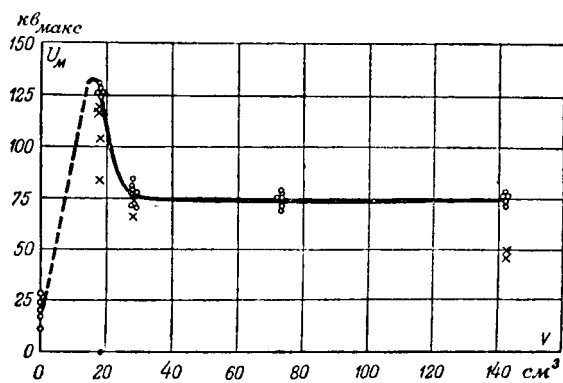


Рис. 2. Зависимость восстанавливающейся прочности дугового промежутка разрядника РТВ-35/2-10 от объема газового резервуара. Отключаемый ток 4200 а.

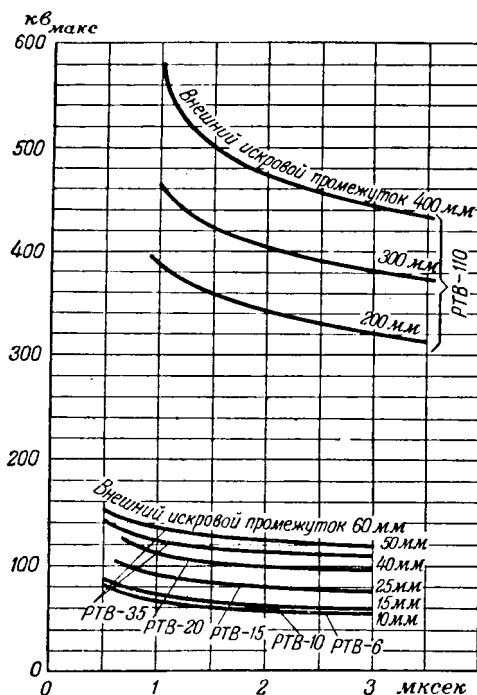


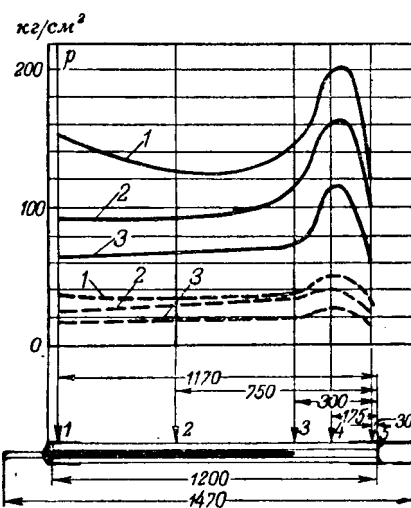
Рис. 4. Вольсекундные характеристики разрядников типа РТВ.

мерно 75 кВ_{макс}, при объеме 20 см³ восстанавливающаяся прочность повышается до 110 кВ_{макс}, а при отсутствии газового резервуара она резко понижается. Таким образом, следует считать, что для нормальной работы разрядника необходим некоторый газовый объем, который должен подпитывать дугогасительный канал во время прохождения тока через нулевое значение, т. е. в момент гашения дуги. В конструкции разрядников типа РТВ этот объем обеспечивается не специальной газовой камерой, расположенной на закрытом конце разрядника, а пространством, заключенным между внутренними стенками дугогасительной трубки и стержневым электродом. Исследования газодинамических процессов в трубчатых разрядниках подтверждают выгодность такого расположения газового объема.

Зависимости распределения давления по длине трубчатого разрядника типа РТВ (рис. 3) по-

Рис. 3. Распределение давления по длине трубчатого разрядника РТВ-110/2-8 в различные моменты времени. Сплошные кривые — давления при отключении токов верхнего предела (8 ка действ), пунктирные — то же для токов нижнего предела (2 ка действ).

1 — максимальные значения давления; 2 — давления в момент максимального значения тока в дуге; 3 — давления в момент нулевого значения тока в дуге.



казывают, что такое расположение газового объема содействует повышению остаточного давления (давление в дугогасительном канале в момент прохождения тока через нулевое значение) до 60% максимального давления в том же сечении против 47% в фибробакелитовых разрядниках. Таким образом, с точки зрения деионизации дугового промежутка в трубчатых разрядниках типа РТВ созданы более благоприятные условия гашения дуги, чем в фибробакелитовых.

Характеристики разрядников типа РТВ. В табл. 2 приведены пределы отключаемых токов трубчатых разрядников типа РТВ на различные классы напряжений. Указанные значения отключаемых токов гарантируются заводом-изготовителем при условии скорости нарастания напряжения в точке установки разрядников, не превышающей 500 в/мксек.

Согласно действующим техническим условиям на трубчатые разрядники типа РТВ их импульсные и 50-периодные характеристики при указанных внешних искровых промежутках должны

удовлетворять значениям, приведенным в табл. 2. Допускаются отклонения от приведенных в таблице значений по импульсным разрядным характеристикам в пределах $\pm 15\%$ и по 50-периодным — на $\pm 10\%$.

На рис. 4 приведены вольтсекундные характеристики разрядников типа РТВ. Следует отметить, что время запаздывания импульсного пробоя разрядников при стандартной волне 1,5/40 мксек не превышает 4 мксек.

Регистрация зон выхлопа трубчатых разрядников производилась путем фотографирования работы разрядника. На рис. 5 приведена фотография работы разрядника, из которой резко видны очертания зоны выхлопа. В табл. 3 приведены размеры зон выхлопа для каждого типа разрядника при отключении токов верхнего предела.

Пользуясь данными, приведенными в табл. 3, не следует предполагать, что потенциал открытого конца разрядника переносится на край зоны выхлопа, в связи с чем следует предусматривать

Таблица 2

Сводная таблица характеристик трубчатых разрядников типа РТВ

Тип разрядников	Рабочее напряжение разрядника, кВ	Величина внешнего искрового промежутка, мм	Величина внутреннего искрового промежутка, мм	Пределы отключаемых разрядником токов, кА		Импульсные разрядные напряжения при волне 1,5/40 мксек, кВ макс				Разрядные напряжения при промышленной частоте, кВ	
				нижний	верхний	Отрицательная полярность		Положительная полярность		сухое	мокрое
						минимальное	при 2 мксек	минимальное	при 2 мксек		
РТВ- $\frac{6-10}{0,5-5}$	6	10	60	0,5	5	57	58	54	55	35,5	32
РТВ- $\frac{6-10}{2-15}$				2	15	61	62	58	59	42	40
РТВ- $\frac{6-10^*}{5-20}$				5	20						
РТВ- $\frac{15}{2-12}$	15	25	80	2	12	74	79	69	74	55	50
РТВ- $\frac{20}{2-12}$	20	40	100	2	12	94	98	88	92	70	65
РТВ- $\frac{35}{2-10}$	35	50	140	2	10	107	113,5	102	110	82	80
РТВ- $\frac{35^*}{5-20}$		60		5	20	118	123,5	112	120	89	86
РТВ- $\frac{110^*}{2-8}$	110	200 300 400	300	2	8	300 370 430	335 400 470	285 350 405	305 380 450	234 286 336	200 250 300
РТВ- $\frac{110^*}{5-15}$	110		2×150**	5	15	—	—	—	—	—	—
РТВ- $\frac{154^*}{2-8}$	154	400 500 600	2×200**	2	8	550 600 660	580 630 690	—	—	520 560 600	480 500 580
РТВ- $\frac{220^*}{2-8}$	220	500 600 700	2×300**	2	8	1 020 1 040 1 070	1 040 1 080 1 120	—	—	620 720 780	580 640 760

* Типы разрядников, еще не освоенные промышленностью.

** Разрядники, состоящие из двух дугогасительных трубок.

Таблица 3

Зоны выхлопа трубчатых разрядников типа РТВ
(обозначения указаны на рис. 5)

Тип разрядника	Размеры зоны выхлопа, м	
	а	б
РТВ- $\frac{6-10}{0,5-5}$	0,7	1,2
РТВ- $\frac{6-10}{2-15}$	1,0	2,0
РТВ- $\frac{6-10}{5-20}$	1,3	2,5
РТВ- $\frac{15}{2-12}$	1,3	2,3
РТВ- $\frac{20}{2-12}$	1,5	2,5
РТВ- $\frac{35}{2-10}$	1,8	2,8
РТВ- $\frac{35}{5-20}$	2,0	3,2
РТВ- $\frac{110}{2-8}$	2,2	3,5

дополнительное расстояние между зонами выхлопа, исходя из электрической прочности при промышленной частоте. Приведенные в таблице размеры зон выхлопа ионизированных газов предполагают их возможное сопротивление.

Исследования импульсной пропускной способности трубчатых разрядников указывают на то, что их разрушение при прохождении импульсных токов происходит не в результате повышения давления в дугогасительном канале разрядника (вследствие газогенерации его стенок), а в результате повышения давления в объеме, окружающем канал искры. Следовательно, импульсная пропускная способность трубчатых разрядников не зависит от класса напряжения, а только от диаметра дугогасительного канала, т. е. от пределов отключаемых разрядником токов. Согласно техническим условиям импульсная прочность трубчатых разрядников оценивается в 50 ка.

Срок службы трубчатых разрядников всецело зависит от величин токов, которые он обрывает, так как от обрываемого им тока зависит разработка (увеличение) диаметра дугогасительного канала.

На основании проведенных исследований следует заключить, что нижние пределы отключаемых разрядником токов обеспечиваются в том случае, если диаметр дугогасительного канала увеличен не более чем на 3 мм относительно первоначального диаметра. Верхний предел отключаемых токов при этом увеличивается примерно на 10%. Износ дугогасительного канала на 3 мм соответствует трем-четырем отключениям тока верхнего предела, обозначенного на выхлопной обойме разрядника. Согласно техническим условиям гарантируется отключение разрядником

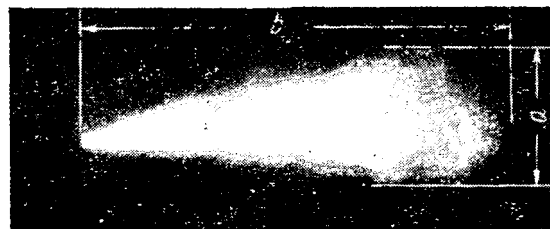


Рис. 5. Зона выхлопа разрядника типа РТВ.
Размеры зон выхлопа указаны в табл. 3.

3 раза токов верхнего предела, затем 2 раза токов нижнего предела и затем снова 2 раза токов верхнего предела.

Некоторые рекомендации по эксплуатации трубчатых разрядников типа РТВ. Монтаж разрядников на напряжение от 6 до 35 кВ должен соответствовать требованиям руководящих указаний по защите от перенапряжений установок переменного тока 3 ... 220 кВ. Разрядники на напряжение 110 кВ должны монтироваться под углом не менее 65 ... 70° к горизонту в связи с сравнительно низкой термостойкостью винипласта. Желателен монтаж 110-кВ разрядников в вертикальном положении.

При производстве ревизий в практику эксплуатации трубчатых разрядников вошла проверка их 50-периодных разрядных напряжений. Проверка этих характеристик на разрядниках типа РТВ затруднительна и нецелесообразна в связи со специфическими требованиями, вытекающими из малой дугостойкости винипласта, а потому нами не рекомендуется.

Проведенные нами обследования довольно большого количества разрядников типа РТВ после их пятилетней эксплуатации указывают на полную стабильность их импульсных и 50-периодных характеристик.

Ревизию трубчатых разрядников нами рекомендуется проводить только в том случае, если зарегистрированы три-четыре случая срабатывания разрядника, или в том случае, если замечена ненормальность в его работе.

В ВЭИ проведена разработка разрядников типа РТВ на напряжениях от 6 до 220 кВ с различными диапазонами обрываемых ими токов. Все разработки для освоения переданы на завод «Электроаппарат» МЭП. Однако в настоящее время заводом освоены и выпускаются разрядники этого типа лишь на следующие верхние пределы обрываемых токов: 6 ... 10 кВ — до 15 ка; 15 ... 20 кВ — до 12 ка; 35 кВ — до 10 ка.

К освоению разрядников данного типа на напряжение 110 кВ и выше предприятия электротехнической промышленности вообще не приступали. Министерству электротехнической промышленности следует принять меры к срочному освоению и выпуску трубчатых разрядников с более высокими верхними пределами обрываемых токов для обеспечения все возрастающих мощностей энергосистем.

[6 5. 1955]

Трансформаторы напряжения и трансформаторы тока

Доктор техн. наук, проф. А. Е. КАПЛЯНСКИЙ

Ленинград

Введение. В руководствах по электроизмерительной технике теория измерительных трансформаторов напряжения и трансформаторов тока обычно излагается раздельно: для каждого из этих видов трансформаторов строится своя векторная диаграмма и пишутся свои уравнения [Л. 1]. Между тем и трансформатор напряжения и трансформатор тока в принципе устроены совершенно одинаково и их изучение целесообразно вести на основе общей теории трансформатора. В дальнейшем мы будем пользоваться известным из теоретических основ электротехники способом приведения вторичной обмотки трансформатора к числу витков первичной и эквивалентной трансформатору Т-образной схемой (рис. 1).

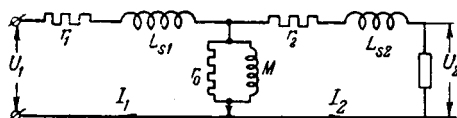


Рис. 1.

Обобщим известный вывод этой схемы на нелинейный случай, т. е. на трансформатор со стальным сердечником, но без потерь. Уравнения равновесия напряжений для первичной и вторичной его цепей в очевидных обозначениях имеют вид:

$$\begin{aligned} u_1 &= i_1 r_1 + \frac{d(L_1 i_1)}{dt} + \frac{d(M i_2)}{dt}; \\ -u_2 &= i_2 r_2 + \frac{d(L_2 i_2)}{dt} + \frac{d(M i_1)}{dt}. \end{aligned}$$

Прибавив и отняв в правой части первого уравнения член $\frac{d(M i_1)}{dt}$, а второго $\frac{d(M i_2)}{dt}$, после приведения подобных членов получим:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 r_1 + \frac{d[(L_1 - M) i_1]}{dt} + \frac{d[M(i_1 + i_2)]}{dt}; \\ -u_2 &= i_2 r_2 + \frac{d[(L_2 - M) i_2]}{dt} + \frac{d[M(i_1 + i_2)]}{dt}. \end{aligned} \right\} (*)$$

В трансформаторе с $\omega_1 = \omega_2$, который мы и будем рассматривать в дальнейшем, коэффициенты $L_1 - M$ и $L_2 - M$ равны соответственно индуктивностям рассеяния L_{s1} и L_{s2} первичной и вторичной обмоток.

Уравнения (*) справедливы и для схемы рис. 1, следовательно, она эквивалентна трансформатору. Для полного соответствия в схему рис. 1 добавлено сопротивление r_0 , потребляющее мощность, равную потерям в стали.

Таким образом, продольные сопротивления эквивалентной схемы r_1 , r_2 , ωL_{s1} , ωL_{s2} равны соответственно активным и реактивным сопротивлениям первичной и вторичной обмоток трансформатора, поперечная („намагничивающая“) ветвь состоит из сопротивления r_0 и

индуктивности, равной взаимной индуктивности M обмоток. В трансформаторах обычной конструкции основной составляющей магнитного сопротивления потоков рассеяния является постоянное сопротивление пути по воздуху. Поэтому для таких трансформаторов L_{s1} и L_{s2} могут считаться величинами постоянными, тогда как величина M , определяемая магнитным сопротивлением магнитопровода вследствие нелинейности кривой намагничивания — переменная; очевидно, что здесь сопротивление $\omega M \gg \omega L_{s1}$ и $\omega M \gg \omega L_{s2}$.

Как ясно из вывода, схема рис. 1 эквивалентна трансформатору только в том случае, если в ней выбрано направление первичного тока I_1 противоположное вторичному току I_2 ,

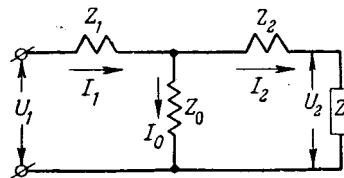


Рис. 2.

что отражает правило Ленца о направлении индуктированного тока. Но при анализе эквивалентной схемы, очевидно, более удобно выбрать „естественное“ — совпадающее с I_1 — направление тока I_2 (рис. 2). Это соответствует повороту векторной диаграммы для вторичной цепи трансформатора на 180° , к чему обычно и прибегают в классическом методе изложения теории трансформатора. В дальнейшем будем оперировать со схемой рис. 2. Для того чтобы получить правильные фазы векторов напряжения и тока вторичной цепи, необходимо повернуть на 180° векторы, полученные из схемы рис. 2.

Трансформатор напряжения. Основная особенность трансформатора напряжения заключается в том, что он работает в режиме заданного первичного напряжения U_1 . Задачей схемы, эквивалентной трансформатору напряжения с $\omega_1 = \omega_2$, является получение вторичного напряжения U_2 , возможно близкого по величине и по фазе к U_1 . Как видно из рис. 2,

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - \dot{I}_2 Z_2.$$

Отсюда следует, что для уменьшения погрешностей и по напряжению и по углу трансформатор напряжения должен работать при малых токах I_1 и I_2 , т. е. в режимах, близких к режиму холостого хода. При конструировании трансформатора напряжения, очевидно, надо стремиться к уменьшению сопротивлений Z_1 и Z_2 — активных сопротивлений обмоток r_1 и r_2 и индуктивностей рассеяния L_{s1} и L_{s2} . В принципе уменьшению погрешностей будет способствовать и увеличение сопротивления Z_0 за счет

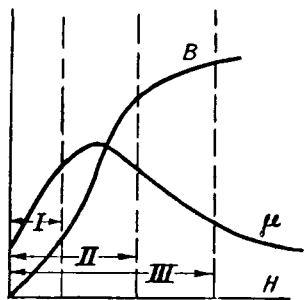


Рис. 3.

ной нагрузке и обычной стали $I_0 \ll I_2$ и складывается с I_2 под большим углом. Поэтому целесообразно выбирать рабочую точку при сравнительно больших индукциях, т. е. в зоне II максимальной магнитной проницаемости кривой намагничивания (рис. 3).

Из эквивалентной схемы рис. 2 также видно, что при активно-индуктивной нагрузке, что характерно для цепи напряжения измерительных приборов, погрешности возрастают при уменьшении сопротивления нагрузки по мере приближения к короткому замыканию. Этот режим является к тому же для трансформатора напряжения аварийным, так как токи I_1 и I_2 по малости Z_1 и Z_2 будут весьма большими.

Из эквивалентной схемы рис. 2 можно сделать еще ряд очевидных выводов о зависимости угловой погрешности от сдвига фаз в нагрузке, о частотной погрешности и т. д., но мы ограничиваемся изложенным.

Трансформатор тока. Основная особенность трансформатора тока заключается в том, что он работает в режиме заданного первичного тока I_1 . Задачей схемы, эквивалентной трансформатору тока с $\omega_1 = \omega_2$, является получение вторичного тока I_2 , возможно близкого по величине и по фазе к I_1 . Из эквивалентной схемы рис. 2 видно, что $I_1 = I_2 + I_0$. Ясно, что для уменьшения погрешностей и по току и по углу трансформатор тока должен работать в режиме, близком к короткому замыканию, когда сопротивление $Z_2 + Z$ нагрузочной ветви мало по сравнению с сопротивлением Z_0 намагничивающей ветви и $I_0 \ll I_2$. При конструировании трансформатора тока надо, очевидно, стремиться к уменьшению Z_2 . Сопротивление Z_1 первичной обмотки не влияет на погрешности трансформатора тока; этим объясняется возможность выполнения трансформаторов тока проходного типа, у которых рассеяние первичной обмотки значительно.

В отличие от задачи расчета трансформатора напряжения основной задачей конструктора трансформатора тока является уменьшение намагничивающего тока I_0 , что достигается выбором рабочей точки в начальной зоне I кривой намагничивания при малой индукции (рис. 3). Большой эффект дает здесь применение специальных сортов стали с большой магнитной проницаемостью.

Из схемы рис. 2 очевидно, что погрешности

выбора малых значений индукции или применения специальных сортов стали. При этом уменьшается намагничивающий ток I_0 , но большого эффекта это мероприятие не даст, так как вектор $I_1 = I_2 + I_0$ и, следовательно, $I_1 Z_1$ уменьшаются при этом незначительно: при нормальной

возрастают по мере приближения к режиму холостого хода. Этот режим является для трансформатора тока аварийным, так как вследствие большого значения Z_0 вторичное напряжение $U_{20} = I_1 Z_0$ и соответствующий ему поток в сердечнике будут весьма большими. Насыщение сердечника приводит к трапециoidalной форме кривой потока с быстрым его изменением у точки прохождения через нуль, что создает пикообразный характер кривой вторичного напряжения с очень большой амплитудой.

Предлагаемая методика исследования измерительных трансформаторов при помощи эквивалентных Т-схем очень удобна также при рассмотрении сложных схем их включения и специфических конструкций этих трансформаторов. Несколько подобных задач рассмотрено ниже.

Универсальный измерительный трансформатор. В ампервольтваттметре — переносном универсальном приборе переменного тока, разработанном автором [Л. 2], был применен встроенный в прибор малогабаритный измерительный трансформатор с относительно большим коэффициентом трансформации ($k > 100$). В схеме вольтметра он включается как понизительный трансформатор напряжения, в схеме амперметра его первичная и вторичная обмотки меняются местами и он включается как понизительный трансформатор тока. Этот пример подтверждает положение, высказанное в начале статьи, о идентичности обоих трансформаторов и различии лишь в их режимах работы.

Правда, подобный малогабаритный универсальный трансформатор не обладает высокими параметрами; например, будучи насыщенным и в режиме трансформатора тока, он имеет значительные погрешности. Но в данном случае, когда прибор работает всегда с одним и тем же измерительным трансформатором, эти погрешности встраиваются в шкалу и тем самым устраняются. При измерении мощности погрешности сохраняются; для их снижения в ампервольтваттметре, выпускаемом нашей промышленностью, применен трансформатор тока с сердечником из пермаллоя.

Измерение тока третьей фазы. Иногда, например в универсальных приборах трехфазного тока, применяется измерение токов в трехфазной цепи при помощи двух трансформаторов тока путем включения амперметра сначала на трансформатор фазы А, затем на трансформатор фазы В и, наконец, на оба трансформатора параллельно, так как

$$|I_C| = |I_A + I_B|.$$

Применим метод наложения к эквивалентной схеме рис. 4 при заданных токах I_A и I_B . Считая сначала существующим ток I_A при разомкнутой фазе В, получим, что ток I_A разветвляется на три цепи (амперметр и две намагничивающие ветви), тогда как при измерении только тока I_A он разветвляется на две цепи—

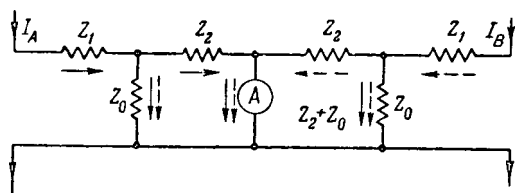


Рис. 4.

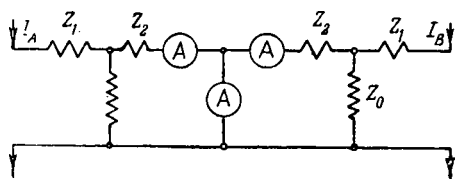


Рис. 5.

амперметр и одну намагничивающую ветвь. Аналогичная картина получается для тока I_B . Следовательно, при измерении тока I_C при помощи двух трансформаторов тока показание будет меньше суммы $|I_A + I_B|$. Например, при одинаковой нагрузке фаз показание амперметра для фазы C будет меньшим, чем для фаз A и B.

Поэтому для получения точных результатов необходимо при измерении токов I_A и I_B включать параллельно амперметру сопротивление, равное, очевидно, $Z_2 + Z_0$ и отключать его при измерении тока I_C . Тогда все три измерения будут иметь одинаковую погрешность, устраняемую при градуировке прибора совместно с трансформаторами.

Часто применяется одновременное включение трех амперметров на два трансформатора тока (рис. 5). Погрешность, увеличенную за счет появления третьей ветви, будут давать все три амперметра, но и она может быть устранена за счет градуировки.

Параллельное или последовательное включение вторичных цепей разных трансформаторов тока. В самовозбуждающейся синхронной машине [Л. 3] на трех сопротивлениях необходимо получить трехфазную систему векторов напряжений и каждый должен зависеть от токов двух фаз генератора. Для этой цели были применены трансформаторы тока. Возникла дискуссия о том, следует ли вторичные обмотки двух одинаковых или разных трансформаторов, включенных в разные фазы, соединять между собой и с упомянутым выше сопротивлением параллельно или последовательно [Л. 4].

Из эквивалентной схемы для параллельного соединения (рис. 6,а), совершенно аналогичной только что разобранный схеме рис. 4, видно, что при малом относительном значении сопротивления r по сравнению с сопротивлениями намагничивающих ветвей трансформаторов (это и имеет место в данном случае), в нем суммируются почти целиком токи обеих фаз; оба трансформатора работают в режиме, близком к короткому замыканию, и, следовательно, вносят в цепи фаз малые сопротивления.

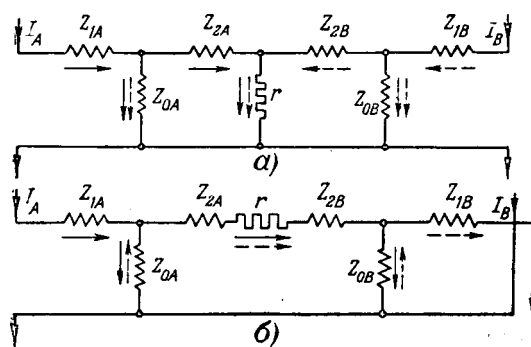


Рис. 6.

Применяя метод наложения к эквивалентной схеме для последовательного соединения (рис. 6,б), получим, что фаза A пошлет в сопротивление r только часть своего тока. В случае, например, одинаковых трансформаторов ($Z_{0A} = Z_{0B}$) ток I_A между ветвью с сопротивлением r и ветвью Z_{0A} распределится приблизительно одинаково, так как $|Z_{0B}| \gg |r + Z_{2A} + Z_{2B}|$. Как видно из стрелок на рис. 6,б, в ветви с r пойдет сумма токов, которая в симметричной трехфазной системе, как известно, равна каждому из слагающих токов в отдельности. В намагничивающих ветвях пойдет разность токов, которая в симметричном случае в $\sqrt{3}$ больше слагающих токов; этим большим токам придется преодолеть большое сопротивление намагничивающих ветвей. Поэтому оба трансформатора тока будут работать в режиме, близком к холостому ходу, и вносить большие сопротивления в цепи фаз. Кроме того, в случае разных трансформаторов тока сопротивления Z_{0A} и Z_{0B} намагничивающих ветвей различны, сопротивление r получит разные доли токов I_A и I_B и отнюдь не будет обтекаться током, пропорциональным сумме этих токов.

Таким образом, в данном случае целесообразным является параллельное, а не последовательное соединение вторичных обмоток трансформаторов тока. Аналогично решается задача для трансформаторов напряжения, нагруженных относительно большим сопротивлением. Используя те же эквивалентные схемы рис. 6, но задаваясь не первичными токами, а напряжениями $\dot{U}_A$ и $\dot{U}_B$, легко показать, что в данном случае более целесообразно последовательное соединение вторичных обмоток и нагрузочного сопротивления (рис. 6,б).

Последовательное включение двух трансформаторов тока. Подобное включение применяется в случае большой нагрузки во вторичной цепи (рис. 7,а). Для анализа можно воспользоваться той же эквивалентной схемой рис. 6,б и только что проведенным ее обсуждением, но при условии $I_A = I_B$. В этом случае разность токов, протекающая в намагничивающих ветвях, будет мала, а сумма токов, протекающих по ветви с нагрузкой r , близка к первичному току, так как со-

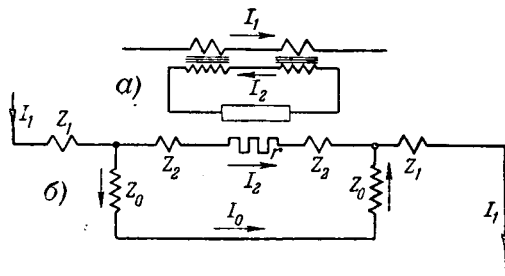


Рис. 7.

гласно установленному выше каждая из составляющих равна примерно половине этого тока.

Более наглядно только что сказанное представлено на рис. 7,б, в котором выход первичной цепи левого трансформатора соединен со входом правого и тем самым осуществлена эквивалентная схема последовательного соединения двух трансформаторов тока. Здесь первичный ток I_1 почти целиком проходит по ветви с нагрузкой r , имеющей малое сопротивление, и лишь незначительная часть его ответвляется в намагничивающие ветви, которые в этом случае оказываются включенными последовательно.

Отсюда следует, что последовательное соединение вторичных обмоток одинаковых трансформаторов тока, противопоказанное для случая различных по величине или по фазе первичных токов, вполне целесообразно при одинаковом токе.

Компенсированные трансформаторы тока. Эти трансформаторы, выпускаемые нашей промышленностью, имеют пониженные погрешности, меньший объем стали и меньшее число витков, хотя их сердечники выполняются из обычной электротехнической стали.

В трансформаторах, выполненных по методу МЭИ [Л. 5, 6], вторичная обмотка разделена на две последовательно соединенные катушки ω'_2 и ω''_2 , расположенные на разных стержнях, а между ними установлен магнитный шунт (рис. 8). Поток рассеяния Φ''_2 катушки ω''_2 и поток Φ'_2 катушек ω_1 и ω'_2 создаются, если пренебречь $I_0\omega_1$, н. с. одинакового значения $I_2\omega_2$, но обратными по фазе, поэтому потоки проходят по стержням в разных направлениях, но совпадают в шунте. Появление значительных потоков рассеяния отражается на параметрах эквивалентной схемы трансформатора тока (рис. 2) следующим образом:

1. Индукция в сердечнике увеличивается, и он переходит в зону II максимальной магнитной проницаемости (рис. 3), что влечет за собой увеличение сопротивления Z_0 намагничивающей ветви.

2. Так как потоки рассеяния замыкаются теперь по стали, сопротивления Z_1 и Z_2 эквивалентной схемы увеличиваются за счет роста индуктивности и появления активного сопротив-

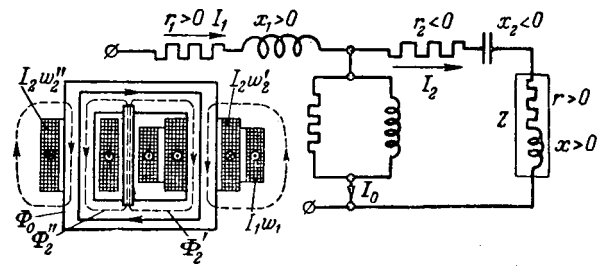


Рис. 8.

ления, обусловленного потерями в стали. Как показано выше, рост Z_1 не отражается на погрешности трансформатора.

3. Почти противоположными по фазе потоками Φ'_2 и Φ''_2 в катушках ω'_2 и ω''_2 индуктируются э. д. с. также почти противоположные по фазе, что эквивалентно отрицательному знаку у индуктивности рассеяния катушки ω'_2 , а также у активного сопротивления этой катушки, обусловленного потерями в стали от потока рассеяния. Как показано в [Л. 6], результирующее реактивное сопротивление вторичной обмотки может стать отрицательным, что эквивалентно емкостному сопротивлению; отрицательным может стать и активное сопротивление; отрицательным они останутся и при приведении к первичной обмотке. Заметим, что величина эквивалентных сопротивлений r_2 и x_2 зависит от нагрузки трансформатора. Эквивалентная схема компенсированного трансформатора изображена на рис. 8, где нагрузочное сопротивление Z (прибор) показано как индуктивное. В результате полное сопротивление $Z_2 + Z$ нагрузочной ветви эквивалентной схемы трансформатора значительно уменьшается.

Увеличение сопротивления намагничивающей ветви и уменьшение сопротивления ветви нагрузки перераспределяет ток I_1 в пользу нагрузки, что уменьшает погрешность трансформатора. Значительное уменьшение I_0 и необходимой н. с. обмоток позволяет конструктору уменьшить габариты трансформатора. Необходимо заметить, что при полной нагрузке трансформатора магнитный шунт насыщается, следовательно, компенсационный эффект метода МЭИ проявляется лишь при малых нагрузках.

Еще один из значительного числа методов компенсации погрешностей трансформаторов тока рассматривается ниже.

Трансформатор тока, компенсирующий квадратичный характер шкалы амперметра. В ампервольтваттметре электро- или ферродинамической системы при равномерной шкале ваттметра шкала амперметра и вольтметра получается квадратичной. Так как измерения в этом приборе производятся при помощи встроенного в прибор трансформатора тока, можно исправить шкалу амперметра, если придать этому трансформатору такую характеристику, при которой рост вторичного тока происходит медленнее роста первичного тока. Другими словами, этот трансформатор должен

¹ Φ'_2 лишь условно может быть назван также потоком рассеяния.

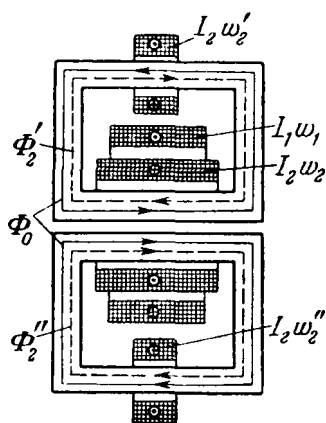


Рис. 9.

иметь резко возрастающую кривую отрицательной погрешности; угловая погрешность при измерении тока значения не имеет. Вместе с тем этот же трансформатор тока должен иметь малые погрешности и по току и по углу при использовании прибора в качестве ваттметра.

Можно решить поставленную задачу, взяв в основу компенсированный трансформатор тока с двойным магнитопроводом [Л. 1]. В этом трансформаторе (рис. 9) оба внутренних стержня охватываются обмотками первичной w_1 и главной вторичной w_2 , последовательно с которой включены расположенные на наружных стержнях добавочные катушки w_2' и w_2'' . Они намагничивают оба сердечника таким образом, чтобы их потоки Φ_2' и Φ_2'' были равны и проносили основные обмотки w_1 и w_2 во встречных направлениях; тогда суммарный поток будет равен нулю, и никаких дополнительных э. д. с. от потоков Φ_2' и Φ_2'' в основных обмотках не возникает. Роль этих потоков заключается лишь в увеличении индукции в сердечниках. В каждом сердечнике в отдельности поток будет создаваться суммой н. с. основных обмоток w_1 и w_2 и н. с. катушки w_2' или w_2'' . Результирующая больших н. с. обмоток w_1 и w_2 мала, так как они действуют навстречу друг другу, относительно же малые н. с. катушек w_2' и w_2'' дадут значительный эффект, так как их действие не сопровождается появлением встречных н. с.

Эквивалентная схема компенсированного трансформатора будет той же (рис. 2), но ее параметры изменятся следующим образом:

1. Вследствие увеличения индукции сердечник переходит в зону II максимальной проницае-

мости (рис. 3), что влечет за собой увеличение сопротивления Z_0 намагничивающей ветви.

2. Несколько увеличивается сопротивление Z_2 , так как во вторичную цепь включены добавочные сопротивления Z_2' и Z_2'' катушек w_2' и w_2'' , имеющих повышенные индуктивное и реактивное сопротивления за счет стальных сердечников.

Вследствие относительной малости числа витков w_2' и w_2'' увеличение Z_2 не окажет существенного влияния; благодаря значительному увеличению сопротивления Z_0 ток I_1 перераспределяется в пользу цепи нагрузки и погрешности трансформатора уменьшатся. Подобно трансформатору МЭИ здесь также возможно уменьшение габаритов трансформатора. Заметим, что компенсирующее действие добавочных катушек зависит от их н. с. и, следовательно, будет незначительно при малых нагрузках.

В трансформаторе тока, компенсирующем квадратичность шкалы, необходимо лишь несколько увеличить число витков добавочных катушек w_2' и w_2'' с тем, чтобы они перевели сердечник в зону насыщения III (рис. 3). Тогда с ростом тока сопротивление Z_0 намагничивающей ветви эквивалентной схемы (рис. 2) будет падать, отводя все большую часть тока от ветви нагрузки и тем самым осуществляя требуемую компенсацию. В схеме универсального прибора придется предусмотреть переключение добавочных катушек с большого числа витков на меньшее при переходе с измерения тока на измерение мощности.

В заключение автор считает своим долгом поблагодарить доктора техн. наук, проф. Г. Н. Петрова и инженера завода „Электроаппарат“ А. А. Юдицу за ценные советы.

Литература

1. Под ред. А. В. Фремаке. Электрические измерения. Госэнергоиздат, 1954.
2. А. Е. Каплянский. Универсальный прибор переменного тока. Электричество, № 10, 1945.
3. С. Г. Таманцев. Синхронный генератор с самовозбуждением от механического выпрямителя и автоматическим регулированием напряжения. Электричество, № 3, 1952.
4. А. Е. Каплянский и С. Г. Таманцев. Электричество, № 12, 1953.
5. Г. Н. Петров и С. С. Окунь. Трансформаторы тока с компенсацией погрешностей по методу МЭИ. Электричество, № 12, 1952.
6. Г. Н. Петров и С. С. Окунь. Об отрицательном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора. Электричество, № 5, 1950.

[3. 6. 1954]



Расчет короткого замыкания при продольной несимметрии

Инж. В. А. СЕТАРОВ

Мосэнергопроект

В электрических сетях высокого напряжения могут возникать неполнофазные режимы. Появление таких режимов стало возможно в связи с пофазным ремонтом линий электропередачи и применением устройств однофазного отключения и автоматического повторного включения, получивших широкое распространение в энергосистемах Советского Союза. Само собой разумеется, что короткие замыкания могут появляться и при неполнофазных режимах.

На линиях электропередачи большой протяженности находят применение устройства продольной емкостной компенсации, снабженные специальными разрядниками, шунтирующими конденсаторные батареи при протекании сверхтоков по линии электропередачи. Возникновение несимметричных коротких замыканий приводит к пробоем шунтирующих разрядников на отдельных фазах и появлению продольной несимметрии при наличии короткого замыкания.

Для анализа действия устройств релейной защиты и электроавтоматики возникает необходимость в расчете указанных режимов. В советской электротехнической литературе методике этих расчетов уделено большое внимание. Первые работы, посвященные расчетам коротких замыканий при неполнофазных режимах, относятся к 1935 г. [Л. 1, 2]. После этого в печати неоднократно опубликовывались работы, освещающие этот вопрос. С целью облегчения расчетов ряд авторов применял для замещения схем обратной и нулевой последовательностей пассивные четырехполюсники. В настоящее время имеется возможность дальнейшего развития методики расчета путем использования теории активного многополюсника, общие основы которой имеются в работах Н. Н. Щедрина, Р. А. Воронова, Э. В. Зеляха и Н. А. Мельникова [Л. 3, 4, 5, 6].

Основные положения предлагаемого метода состоят в следующем.

Схема прямой последовательности замещается активным многополюсником, а схемы обратной и нулевой последовательностей пассивными многополюсниками. В качестве зажимов многополюсников служат места коротких замыканий и продольной несимметрии. В зависимости от вида повреждений, многополюсники отдельных последовательностей соответствующим образом соединяются между собой при помощи трансформаторных связей. Полная комплексная схема замещения одним четырехполюсником или шестиполюсником, по уравнениям которого определяются токи или напряжения в местах короткого замыкания и продольной несимметрии.

Данный метод нашел практическое применение в Мосэнергопроекте, где он был неоднократно проверен и дал положительные результаты. Метод позволяет использовать модели постоянного и переменного тока, на которых определяются параметры многополюсников и измеряются токи и напряжения отдельных последовательностей.

На рис. 1 изображена электрическая система с двумя местами продольной несимметрии и одним коротким замыканием. Приняты следующие обозначения:

$I_H^{(M)}, I_H^{(P)}$ — токи нагрузки, протекающие в фазах при нормальном режиме в месте предполагаемой продольной несимметрии;

$\dot{U}_H^{(K)}$ — напряжение при нормальном режиме в точке K до возникновения короткого замыкания и продольной несимметрии.

В частном случае размыкание фазы в электрической системе (рис. 1) может быть в одном месте ($M-N$ или $P-Q$). При этом задача будет сводиться к рассмотрению соединений четырехполюсников. При размыкании фаз в двух местах необходимо рассматривать соединения шестиполюсников.

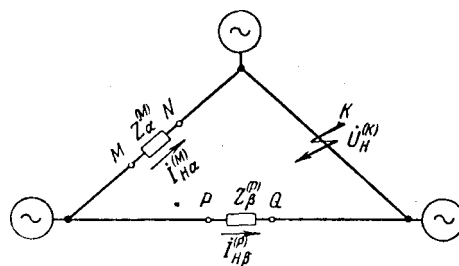


Рис. 1.

Граничными условиями для места короткого замыкания служат соотношения:

при замыкании на землю фазы A

$$I_1^{(K)} = I_2^{(K)} = I_0^{(K)}, \quad \dot{U}_1^{(K)} + \dot{U}_2^{(K)} + \dot{U}_0^{(K)} = 0; \quad (1)$$

при замыкании на землю фаз B и C

$$I_1^{(K)} + I_2^{(K)} + I_0^{(K)} = 0, \quad \dot{U}_1^{(K)} = \dot{U}_2^{(K)} = \dot{U}_0^{(K)}; \quad (2)$$

при замыкании между двумя фазами B и C

$$I_1^{(K)} + I_2^{(K)} = 0, \quad \dot{U}_1^{(K)} = \dot{U}_2^{(K)}. \quad (3)$$

По месту короткого замыкания многополюсники соединяются следующим образом: при замыкании на землю одной фазы — последовательно; при замыкании на землю двух фаз — параллельно; при замыкании между двумя фазами параллельно соединяются только четырехполюсники прямой и обратной последовательностей.

Граничными условиями для места продольной несимметрии служат соотношения:

при $Z_B = Z_C = 0$ и $Z_A \neq 0$,

$$I_A = I_1 + I_2 + I_0, \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_0 = \frac{1}{3} I_A Z_A; \quad (4)$$

при $Z_A = Z_C = 0$ и $Z_B \neq 0$

$$I_B = a^2 I_1 + a I_2 + I_0, \quad a^2 \dot{U}_1 = a \dot{U}_2 = \dot{U}_0 = \\ = \frac{1}{3} I_B Z_B; \quad (5)$$

при $Z_B = Z_A = 0$ и $Z_C \neq 0$

$$I_C = a I_1 + a^2 I_2 + I_0, \quad a \dot{U}_1 = a^2 \dot{U}_2 = \dot{U}_0 = \\ = \frac{1}{3} I_C Z_C. \quad (6)$$

Зажимы многополюсников по месту продольной несимметрии соединяются параллельно через трансформаторы связи. Коэффициент трансформации трансформаторов связи по месту короткого замыкания равен единице, а по месту продольной несимметрии будет определяться в зависимости от фазы, в которую включено сопротивление, согласно таблице.

Условия несимметрии	Коэффициенты трансформации		
	$\dot{n}_1$	$\dot{n}_2$	$\dot{n}_0$
$Z_B = Z_C = 0; Z_A \neq 0$	1	1	1
$Z_A = Z_C = 0; Z_B \neq 0$	a^2	a	1
$Z_A = Z_B = 0; Z_C \neq 0$	a	a^2	1

Под коэффициентом трансформации трансформатора связи понимается следующее соотношение:

$$\dot{n}^{(M)} = \frac{I}{I^{(M)}} = \frac{\dot{U}}{\dot{U}^{(M)}}; \quad \dot{n}^{(P)} = \frac{I}{I^{(P)}} = \frac{\dot{U}}{\dot{U}^{(P)}}, \quad (7)$$

где $I^{(M)}, I^{(P)}, \dot{U}^{(M)}, \dot{U}^{(P)}$ — токи и напряжения со стороны многополюсника;

I, U — ток и напряжение на вторичной стороне трансформатора связи.

Короткое замыкание при продольной несимметрии в одном месте. Задача решается для более общего случая, когда сопротивление продольной несимметрии $Z_a^{(M)}$ включено в любую фазу. Размыкание фазы рассматривается как частный случай, когда $Z_a^{(M)} = \infty$. Рассмотрим случай замыкания на землю фазы A .

В соответствии с граничными условиями четырехполюсники соединяются последовательно по месту короткого замыкания и параллельно по месту продольной несимметрии (рис. 2, а). Коэффициенты трансформации трансформаторов связи определяются из таблицы.

Воспользуемся уравнением четырехполюсника формы D [Л. 4].

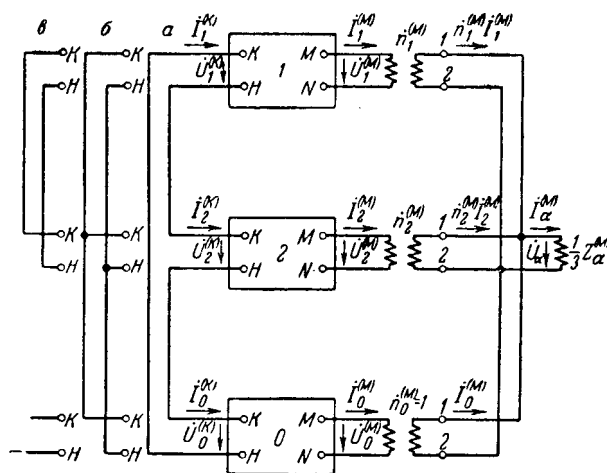


Рис. 2. Эквивалентные схемы замещения для случая продольной несимметрии в одной точке.

а — при замыкании на землю фазы A ; б — при замыкании на землю фаз B и C ; в — при замыкании фаз B и C .

Уравнение активного четырехполюсника $KHMN$ прямой последовательности в матричной форме запишется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}^{(K)} \\ I^{(M)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}^{(M)} \\ I^{(K)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ i_d \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Для пассивных четырехполюсников обратной и нулевой последовательностей второй член правой части равен нулю.

Параметры D четырехполюсников $KHMN$ определяются общеизвестным способом из режима короткого замыкания и холостого хода при равенстве нулю e_d и i_d .

Автономные параметры e_d и i_d находятся из режима короткого замыкания на зажимах $M-N$ и холостого хода на зажимах $K-H$. Этому режиму соответствует нормальная работа электрической системы без короткого замыкания и при отсутствии продольной несимметрии. Следовательно,

$$e_d = \dot{U}_H^{(K)}; \quad i_d = I_H^{(M)}, \quad (9)$$

где $\dot{U}_H^{(K)}$ — напряжение в точке K и $I_H^{(M)}$ — ток на участке $M-N$ в нормальном режиме работы системы.

Для четырехполюсников $KH12$ можно написать следующие уравнения в матричной форме:

для прямой последовательности

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(K)} \\ \dot{n}_1^{(M)} I_1^{(M)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\dot{n}_1^{(M)}} D_{11(1)} & D_{12(1)} \\ D_{21(1)} & \dot{n}_1^{(M)} D_{22(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_0^{(M)} \\ I_1^{(K)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{H(A)}^{(K)} \\ \dot{n}_1^{(M)} I_{H(A)}^{(M)} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

для обратной последовательности

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_2^{(K)} \\ \dot{n}_2^{(M)} \dot{I}_2^{(M)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{\dot{n}_2^{(M)}} D_{11(2)} & D_{12(2)} \\ D_{21(2)} & \dot{n}_2^{(M)} D_{22(2)} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{U}_0^{(M)} \\ \dot{I}_2^{(K)} \end{vmatrix}; \quad (11)$$

для нулевой последовательности

$$\begin{vmatrix} \dot{U}_0^{(K)} \\ \dot{I}_0^{(M)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_{11(0)} & D_{12(0)} \\ D_{21(0)} & D_{22(0)} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{U}_0^{(M)} \\ \dot{I}_0^{(K)} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Суммируя уравнения четырехполюсников отдельных последовательностей и используя граничные условия, получаем уравнение эквивалентного четырехполюсника:

$$\begin{vmatrix} 0 \\ 3\dot{U}_0^M \\ \dot{Z}_a^M \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{U}_0^{(M)} \\ \dot{I}_1^{(K)} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \dot{U}_{H(A)}^{(K)} \\ \dot{n}_1^{(M)} \dot{I}_{H(A)}^{(M)} \end{vmatrix}, \quad (13)$$

где

$$D_{11} = \frac{1}{\dot{n}_1^{(M)}} D_{11(1)} + \frac{1}{\dot{n}_2^{(M)}} D_{11(2)} + D_{11(0)};$$

$$D_{12} = D_{12(1)} + D_{12(2)} + D_{12(0)};$$

$$D_{21} = D_{21(1)} + D_{21(2)} + D_{21(0)} - \frac{3}{\dot{Z}_a^{(M)}};$$

$$D_{22} = \dot{n}_1^{(M)} D_{22(1)} + \dot{n}_2^{(M)} D_{22(2)} + D_{22(0)}.$$

Ток фазы, в которую включено сопротивление продольной несимметрии $\dot{Z}_a^{(M)}$:

$$\dot{I}_a^{(M)} = \dot{n}_1^{(M)} \dot{I}_1^{(M)} + \dot{n}_2^{(M)} \dot{I}_2^{(M)} + \dot{I}_0^{(M)}.$$

Напряжение продольной несимметрии

$$\dot{U} = \dot{U}_0^{(M)} = \frac{1}{3} \dot{I}_a^{(M)} \dot{Z}_a^{(M)}.$$

Решая уравнение (13) относительно тока в месте короткого замыкания и напряжения продольной несимметрии, получим:

$$\dot{I}_1^{(K)} = \dot{I}_2^{(K)} = \dot{I}_0^{(K)} = \frac{D_{21} \dot{U}_{H(A)}^{(K)} - D_{11} \dot{n}_1^{(M)} \dot{I}_{H(A)}^{(M)}}{D_{11} D_{22} - D_{12} D_{21}}, \quad (14)$$

$$\dot{U}_0^{(M)} = \frac{D_{12} \dot{n}_1^{(M)} \dot{I}_{H(A)}^{(M)} - D_{22} \dot{U}_{H(A)}^{(K)}}{D_{11} D_{22} - D_{12} D_{21}}. \quad (15)$$

Токи в месте продольной несимметрии и напряжения в месте короткого замыкания отдельных последовательностей легко определяются из уравнений четырехполюсников (10), (11) и (12).

При наличии расчетной модели постоянного или переменного тока по значениям $\dot{I}^{(K)}$ и $\dot{U}^{(M)}$ могут быть найдены остальные искомые величины путем непосредственных измерений в схемах замещения отдельных последовательностей.

При размыкании фазы следует принять $\dot{Z}^{(M)} = \infty$. Пример расчета для данного случая короткого замыкания приведен в приложении I.

Для остальных видов короткого замыкания вывод формул производится аналогично, при этом используются уравнения четырехполюсника формы Y.

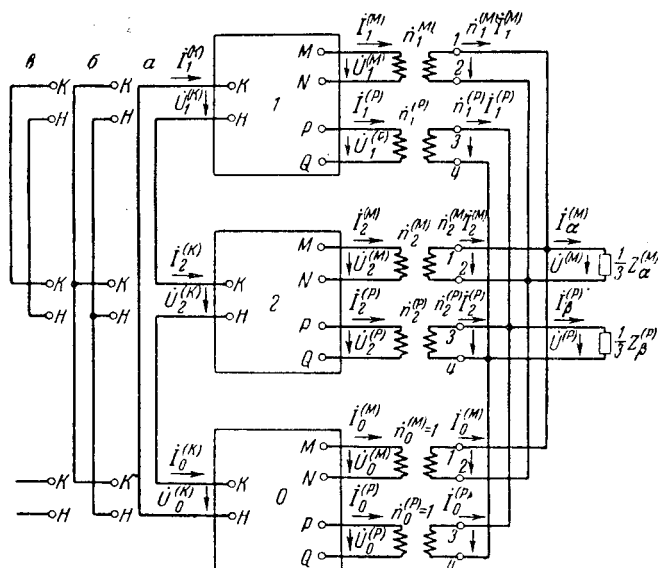


Рис. 3. Эквивалентные схемы замещения для случая продольной несимметрии в двух точках.

а — при замыкании на землю фазы А; б — при замыкании на землю фаз В и С; в — при замыкании фаз В и С.

Короткое замыкание при продольной несимметрии в двух местах. Задача рассматривается для случая включения в любую фазу сопротивлений продольной несимметрии $\dot{Z}_a^{(M)}$ на участке М—N и $\dot{Z}_p^{(P)}$ на участке Р—Q. При размыкании фаз следует принимать $\dot{Z}_a^{(M)} = \dot{Z}_p^{(P)} = \infty$. Комплексные схемы рассматриваемого режима для разных видов короткого замыкания представлены на рис. 3.

Задача расчета режимов короткого замыкания при наличии продольной несимметрии в двух точках решается так же, как аналогичная задача при продольной несимметрии в одной точке. При этом используются уравнения шестиполюсников формы D и Y.

В результате расчета задача может быть сведена к решению трех уравнений эквивалентного шестиполюсника с тремя неизвестными.

Вывод расчетных уравнений в настоящей статье не производится, а сами расчетные формулы приводятся в приложении II.

Конкретные расчеты должны начинаться с определения параметров шестиполюсников отдельных последовательностей аналитически или на расчетной модели. Затем определяются параметры эквивалентного шестиполюсника, по уравнениям которого находятся первые три искомые величины. Остальные неизвестные определяются или путем аналитического расчета по уравнениям шестиполюсника или на расчетной модели.

Выводы. 1. Метод охватывает все случаи режимов короткого замыкания с продольной несимметрией, встречающиеся в практике эксплуатации электрических сетей, включая сети с продольной емкостной компенсацией. Задача сводится к решению двух уравнений при продольной несимметрии в одном месте и трех уравнений при продольной несимметрии в двух местах.

2. Метод дает возможность широкого использования моделей постоянного и переменного тока, на которых определяются расчетные параметры многополюсников и измеряются токи и напряжения в отдельных ветвях.

Приложение I. Расчет короткого замыкания на землю фазы А в сети 110 кВ (рис. 4) с продольной несимметрией.

Исходные данные:

$$Z_A = \infty, Z_B = Z_C = 0;$$

напряжение в точке К при нормальном режиме $\dot{U}_H^{(K)} = 63\,500$ в; нагрузка трансформаторов $I_H^{(M)} = 0$.

Схемы отдельных последовательностей заменяем четырехполюсниками (рис. 4), параметры D которых определяются из режима короткого замыкания и холостого хода. В результате измерений на модели или аналитических расчетов по готовым матрицам [Л. 5], получим:

для четырехполюсников прямой и обратной последовательностей

$$\begin{vmatrix} D_{11(1)} & D_{12(1)} \\ D_{21(1)} & D_{22(1)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_{11(2)} & D_{12(2)} \\ D_{21(2)} & D_{22(2)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & Z_1 \\ -Y_2 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & j6 \\ j0,01 & 1 \end{vmatrix},$$

для четырехполюсника нулевой последовательности

$$\begin{vmatrix} D_{11(0)} & D_{12(0)} \\ D_{21(0)} & D_{22(0)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} Z_1 & 1 \\ Z_1 + Z_2 & -Y_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,88 & j6,06 \\ j0,0177 & 0,88 \end{vmatrix}.$$

Параметры эквивалентного четырехполюсника:

$$D_{11} = D_{22} = D_{11(1)} + D_{11(2)} + D_{11(0)} = 1 + 1 + 0,88 = 2,88,$$

$$D_{12} = D_{12(1)} + D_{12(2)} + D_{12(0)} = j(6 + 6 + 6,06) = j18,06,$$

$$D_{21} = D_{21(1)} + D_{21(2)} + D_{21(0)} = j(0,01 + 0,01 + 0,0177) = j0,0377,$$

$$|D| = D_{11}D_{22} - D_{12}D_{21} = 2,88^2 - j18,06 \cdot j0,0377 = 9.$$

Подставив в выражение (14) и (15) $I_H^{(M)} = 0$, получим:

$$I_1^{(K)} = I_2^{(K)} = I_0^{(K)} = \frac{D_{21}\dot{U}_H^{(K)}}{|D|},$$

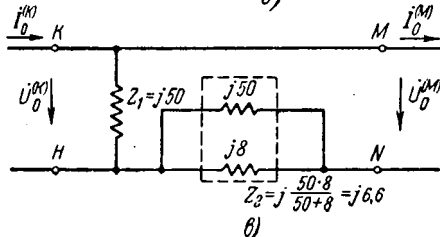
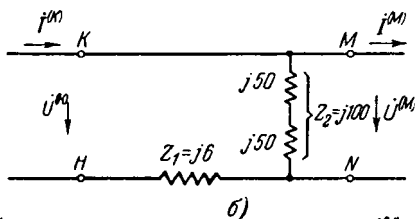
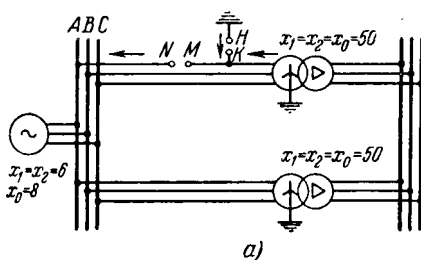


Рис. 4. Сеть 110 кВ с обрывом и коротким замыканием фазы А.

а — исходная схема; б — четырехполюсник положительной и отрицательной последовательностей; в — четырехполюсник нулевой последовательности.

$$\dot{U}_0^{(M)} = \frac{-D_{22}\dot{U}_H^{(K)}}{|D|}.$$

Напряжения продольной несимметрии

$$\dot{U}_1^{(M)} = \dot{U}_2^{(M)} = \dot{U}_0^{(M)} = -20\,400 \text{ в.}$$

Ток в месте короткого замыкания

$$I_1^{(K)} = I_2^{(K)} = I_0^{(K)} = j268 \text{ а.}$$

Токи на участке с продольной несимметрией находятся из уравнений четырехполюсников отдельных последовательностей:

$$I_0^{(M)} = D_{21(0)}\dot{U}_0^{(M)} + D_{22(0)}I_0^{(K)} = j410 \text{ а;}$$

$$I_2^{(M)} = D_{21(2)}\dot{U}_2^{(M)} + D_{22(2)}I_2^{(K)} = j64 \text{ а;}$$

$$I_1^{(M)} = I_A - (I_2^{(M)} + I_0^{(M)}) = 0 - (j64 + j410) = -j474 \text{ а.}$$

Приложение II. Расчетные формулы для случая продольной несимметрии в двух местах.

При замыкании на землю фазы А

$$\begin{vmatrix} D_{11}D_{12}D_{13} \\ D_{21}D_{22}D_{23} \\ D_{31}D_{32}D_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{U}_0^{(M)} \\ I_1^{(K)} \\ U_0^{(P)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\dot{U}_{H(A)}^{(K)} \\ -I_{H(A)}^{(K)} \\ -I_{H(B)}^{(P)} \end{vmatrix};$$

$$I_1^{(K)} = I_2^{(K)} = I_0^{(K)};$$

$$\dot{U}_1^{(M)} = \frac{1}{n_1^{(M)}}\dot{U}_0^{(M)}; \dot{U}_2^{(M)} = \frac{1}{n_2^{(M)}}\dot{U}_0^{(M)};$$

$$U_1^{(P)} = \frac{1}{n_1^{(P)}}\dot{U}_0^{(P)}; \dot{U}_2^{(P)} = \frac{1}{n_2^{(P)}}\dot{U}_0^{(P)};$$

$$D_{11} = \frac{1}{n_1^{(M)}}D_{11(1)} + \frac{1}{n_2^{(M)}}D_{11(2)} + D_{11(0)};$$

$$D_{21} = D_{21(1)} + D_{21(2)} + D_{21(0)} - \frac{3}{Z_a^{(M)}};$$

$$D_{31} = \frac{n_1^{(P)}}{n_1^{(M)}}D_{31(1)} + \frac{n_2^{(P)}}{n_2^{(M)}}D_{31(2)} + D_{31(0)};$$

$$D_{12} = D_{12(1)} + D_{12(2)} + D_{12(0)};$$

$$D_{22} = \frac{n_1^{(M)}}{n_1^{(M)}}D_{22(1)} + \frac{n_2^{(M)}}{n_2^{(M)}}D_{22(2)} + D_{22(0)};$$

$$D_{32} = \frac{n_1^{(P)}}{n_1^{(M)}}D_{32(1)} + \frac{n_2^{(P)}}{n_2^{(M)}}D_{32(2)} + D_{32(0)};$$

$$D_{13} = \frac{1}{n_1^{(P)}}D_{13(1)} + \frac{1}{n_2^{(P)}}D_{13(2)} + D_{13(0)};$$

$$D_{23} = \frac{n_1^{(M)}}{n_1^{(P)}}D_{23(1)} + \frac{n_2^{(M)}}{n_2^{(P)}}D_{23(2)} + D_{23(0)};$$

$$D_{33} = D_{33(1)} + D_{33(2)} + D_{33(0)} - \frac{3}{Z_\beta^{(P)}}.$$

При замыкании на землю фаз В и С

$$\begin{vmatrix} Y_{11}Y_{12}Y_{13} \\ Y_{21}Y_{22}Y_{23} \\ Y_{31}Y_{32}Y_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \dot{U}_1^{(K)} \\ \dot{U}_0^{(M)} \\ \dot{U}_0^{(P)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -I_A^{(K3)} \\ -I_a^{(M3)} \\ -I_\beta^{(P3)} \end{vmatrix};$$

$$I_1^K + I_2^K + I_0^K = 0.$$

Формулы для напряжений имеют тот же вид, что и для случая замыкания на землю фазы А

$$Y_{11} = Y_{11(1)} + Y_{11(2)} + Y_{11(0)};$$

$$Y_{21} = \frac{n_1^{(M)}}{n_1^{(M)}}Y_{21(1)} + \frac{n_2^{(M)}}{n_2^{(M)}}Y_{21(2)} + Y_{21(0)};$$

$$Y_{31} = \frac{n_1^{(P)}}{n_1^{(M)}}Y_{31(1)} + \frac{n_2^{(P)}}{n_2^{(M)}}Y_{31(2)} + Y_{31(0)};$$

$$Y_{12} = \frac{1}{\dot{n}_1^{(M)}} Y_{12(1)} + \frac{1}{\dot{n}_2^{(M)}} Y_{12(2)} + Y_{12(0)};$$

$$Y_{22} = Y_{22(1)} + Y_{22(2)} + Y_{22(0)} - \frac{3}{Z_\alpha^{(M)}};$$

$$Y_{32} = \frac{\dot{n}_1^{(P)}}{\dot{n}_1^{(M)}} Y_{32(1)} + \frac{\dot{n}_2^{(P)}}{\dot{n}_2^{(M)}} Y_{32(2)} + Y_{32(0)};$$

$$Y_{13} = \frac{1}{\dot{n}_1^{(P)}} Y_{13(1)} + \frac{1}{\dot{n}_2^{(P)}} Y_{13(2)} + Y_{13(0)};$$

$$Y_{23} = \frac{\dot{n}_1^{(M)}}{\dot{n}_1^{(P)}} Y_{23(1)} + \frac{\dot{n}_2^{(M)}}{\dot{n}_2^{(P)}} Y_{23(2)} + Y_{23(0)};$$

$$Y_{33} = Y_{33(1)} + Y_{33(2)} + Y_{33(0)} - \frac{3}{Z_\beta^{(P)}}.$$

При замыкании между фазами *B* и *C* уравнение эквивалентного шестиполюсника для данного случая имеет тот же вид, что и для случая замыкания на землю фаз *B* и *C*:

$$I_1^{(K)} + I_2^{(K)} = 0.$$

Формулы для напряжений в данном случае имеют тот же вид, что и в случае замыкания по земле фазы *A*.

$$Y_{22} = Y_{22(1)} + Y_{22(2)} + D_{22(0)} - \frac{3}{Z_\alpha^{(M)}};$$

$$Y_{23} = \frac{\dot{n}_1^{(M)}}{\dot{n}_1^{(P)}} Y_{23(1)} + \frac{\dot{n}_2^{(M)}}{\dot{n}_2^{(P)}} Y_{23(2)} + D_{23(0)};$$

$$Y_{32} = \frac{\dot{n}_1^{(P)}}{\dot{n}_1^{(M)}} Y_{32(1)} + \frac{\dot{n}_2^{(P)}}{\dot{n}_2^{(M)}} Y_{32(2)} + D_{32(0)};$$

$$Y_{33} = Y_{33(1)} + Y_{33(2)} - \frac{3}{Z_\beta^{(P)}}.$$

Остальные параметры шестиполюсника в данном случае равны соответствующим параметрам шестиполюсника для случая замыкания на землю фаз *B* и *C* без третьих членов.

Условные обозначения:

$\dot{U}_{H(A)}^{(K)}$ — напряжение фазы *A* в точке *K* нормального режима при отсутствии короткого замыкания и продольной несимметрии;

$\dot{U}_{H(\alpha)}^{(K)}$ — то же, фазы α ;

$\dot{U}_{H(\beta)}^{(K)}$ — то же, фазы β ;

$I_{H(\alpha)}^{(M)}$ — ток фазы α на участке *M* — *N* нормального режима при отсутствии короткого замыкания и продольной несимметрии;

$I_{H(\beta)}^{(M)}$ — то же, фазы β на участке *P* — *Q*;

$I_A^{(K3)} = -Y_{11(1)} \dot{U}_{H(A)}^{(K)}$ — ток фазы *A* в месте трехфазного короткого замыкания при отсутствии продольной несимметрии;

$I_\alpha^{(M3)} = I_{H(\alpha)}^{(M)} - Y_{21(1)} \dot{U}_{H(\alpha)}^{(K)}$ — ток фазы α на участке *M* — *N* при трехфазном коротком замыкании и отсутствии продольной несимметрии;

$I_\beta^{(P3)} = I_{H(\beta)}^{(M)} - Y_{31(1)} \dot{U}_{H(\beta)}^{(K)}$ — то же, фазы β на участке *P* — *Q*;
 α, β — фазы *A, B* или *C*, в которые включены сопротивления соответственно $Z_\alpha^{(M)}$ или $Z_\beta^{(P)}$.

Литература

1. Н. Н. Щедрин. Токи короткого замыкания электрических систем, стр. 454, ОНТИ, 1935.

2. И. М. Маркович. Применение метода суперпозиции к расчету токов короткого замыкания при одновременном обрыве провода. Электричество, № 17, 1935.

3. Р. А. Воронов. Общая теория четырехполусников, стр. 191, Госэнергоиздат 1951.

4. Э. В. Зелях. Основы общей теории линейных электрических схем, стр. 334, Издательство Академии наук СССР, 1951.

5. Н. А. Мельников. Расчеты режимов работы сетей электрических систем, стр. 175, Госэнергоиздат, 1950.

6. Н. Н. Щедрин. К теории сложных несимметричных режимов электрических систем. Электричество, № 5, 1946.

[14.1.1955]

Автоматизация регулирования частоты и активной мощности

Инж. Н. В. ПАУТИН

Энергетический институт АН СССР

Инж. А. Ф. ЯКОВЛЕВ

Днепровская гЭС имени В. И. Ленина

На крупной гидроэлектростанции регулирование графика нагрузки и частоты мощной объединенной энергосистемы происходит длительное время. Число часов, когда станция регулирует частоту, доходит до 7 000 в год. Для регулирования частоты, как правило, недостаточно мощности одного гидроагрегата, и, кроме того, требование поддержания наиболее экономичного режима работы станции вызывает необходимость равномерного распределения нагрузки между всеми работающими агрегатами.

Перед гидростанцией, на которой уже была осуществлена автоматика пуска и остановки агрегатов и введена в действие телемеханизация, возникла задача расширить автоматизацию ряда операций и процессов управления. В первую очередь это касалось автоматизации процесса регулирования частоты и распределения нагрузок между агрегатами.

В дальнейшем предполагалось осуществить схему пуска и остановки агрегатов от автооператора в целях поддержания оптимального к. п. д. всей электростанции, а также схему группового управления реактивной мощностью гидрогенераторов.

Перечисленный комплекс работ имеет целью создание законченной схемы группового управления, дающей диспетчеру возможность управлять электростанцией как единым целым.

Задача осложнялась тем, что схема станции расчленена на три секции, как правило, электрически связанные между собой, но с возможностью разделения на две-три несинхронно работающие части. В этом случае было необходимо осуществлять регулирование частоты в каждом из несинхронных участков системы. Для увеличения оперативности диспетчерского телеуправления требовалось также создать схему, позволяющую

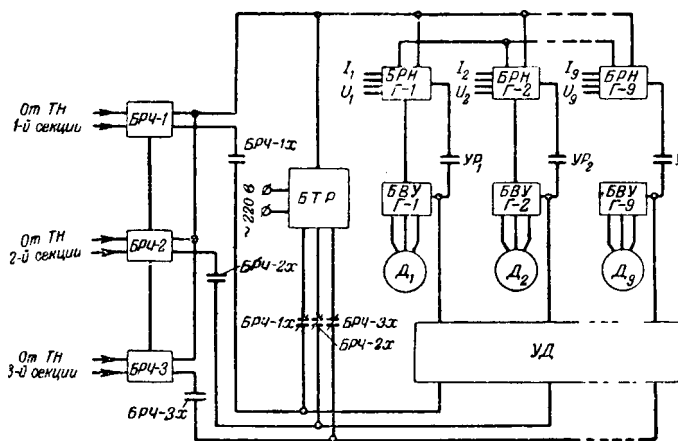


Рис. 1.

A — двигатели механизмов изменения скорости вращения агрегатов; БРЧ — х — контакты реле включения соответствующего БРЧ и подключения устройства телеуправления к агрегату.

диспетчеру управлять как суммарной мощностью станции, так и мощностью каждой секции при разделении.

Существовавшие схемы автоматики и телеуправления пуском агрегатов ограничивали процесс пуска включением агрегата в сеть. Загрузка агрегата активной мощностью не была автоматизирована и производилась персоналом вручную. Исключение составляла операция перевода агрегата из режима синхронного компенсатора в генераторный режим, так как при этом загрузка агрегата осуществлялась за счет заранее заданной, повышенной уставки механизма изменения числа оборотов регулятора скорости.

Для решения вышеуказанных задач было применено устройство автоматического регулирования частоты и мощности¹, состоящее из регулятора частоты и распределителя нагрузок, разработанных Энергетическим институтом АН СССР совместно с ЦКБ «Электропривод».

В устройстве были использованы три измерительных элемента частоты, включенных по схеме, позволяющей осуществлять регулирование частоты в трех несинхронно работающих участках системы. Устройство распределения нагрузок, включенное по схеме, копирующей основную схему коммутации электростанции, позволило осуществлять равное распределение активных нагрузок как между агрегатами каждой секции, так и между всеми агрегатами, работающими на электрически связанные секции.

Осуществленная на гэс схема позволила, кроме того, автоматизировать процесс набора нагрузки на вновь включаемом агрегате независимо от способа его пуска — с центрального пульта управления, телемеханически с диспетчерского пункта, от автооператора или от устройства автоматического пуска при понижении частоты в энергосистеме.

Разработка описываемого комплексного

устройства и схемы включения была выполнена в сравнительно короткий срок, чему способствовало активное творческое содружество организаций, принимавших участие в этой работе.

Блок-схема комплексного устройства (рис. 1). Устройство состоит из следующих основных блоков и узлов:

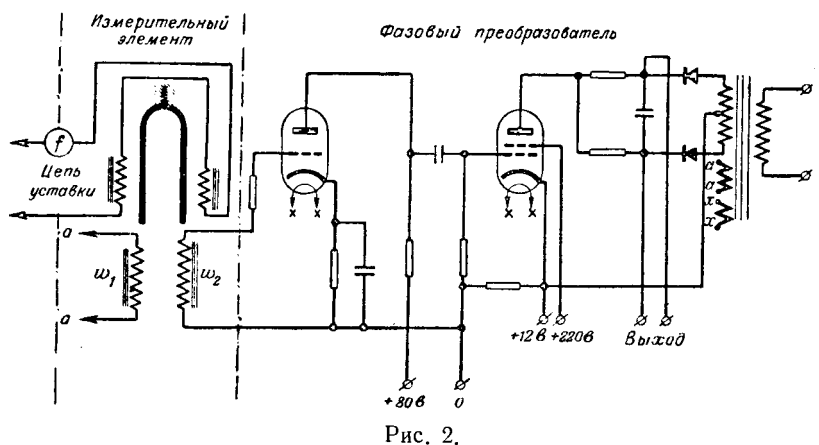
1. Блоков регулирования частоты (БРЧ), предназначенных для регулирования частоты энергосистемы любым числом агрегатов гэс. Число блоков регулирования частоты выбрано в соответствии с возможностями деления схемы первичной коммутации станции. Уставка заданного значения частоты одинакова для всех блоков и может осуществляться как с диспетчерского пункта, так и с пульта гэс при помощи блока изменения уставки.
2. Блоков распределения нагрузки (БРН), предназначенных для измерения активной нагрузки агрегатов. Число блоков распределения нагрузки равно числу агрегатов электростанции. Собранные по специальной схеме в узел распределения нагрузки БРН позволяют выявлять отклонение нагрузки каждого агрегата от среднего значения. Полученные значения отклонений используются для выравнивания нагрузок.
3. Блоков выходного усиления (БВУ), предназначенных для усиления сигналов управления и регулирования до значения, достаточного для питания двигателей механизма изменения скорости вращения.
4. Узла деления (УД). Узел деления копирует схему первичной коммутации гэс и осуществляет автоматическое деление схемы устройства при делении станции на несинхронные части.
5. Блока телеуправления (БТУ), который предназначен для диспетчерского телеуправления суммарной мощностью гэс или суммарной мощностью каждой из ее секций.

Кроме перечисленных основных блоков и узлов, схема устройства включает в себя два вспомогательных узла: узел ограничения регуляторного диапазона каждого из агрегатов и узел защиты и сигнализации.

Рассмотрим более подробно работу отдельных узлов устройства.

Автоматическое регулирование частоты. Автоматическое регулирование частоты осуществляется блоками регулирования частоты (БРЧ) по принципу непрерывного пропорционального регулирования. Устройство включает в себя три БРЧ, по одному на каждой секции гэс. Принципиальная схема блока регулирования частоты приведена на рис. 2. Измерение отклонений частоты осуществляется измерительными элементами БРЧ. В измерительном элементе БРЧ (рис. 2) частота системы сравнивается с эталоном частоты — камертоном. При отклонениях частоты от заданного значения изменяется фаза напряжения на выходной обмотке камертона ω_2 . Изменения фазы преобразуются в свою очередь в изменения напряжения постоянного тока при помощи схемы фазового преобразования. Внешняя характери-

¹ ЦКБ «Электропривод» освоил серийное производство автоматических регуляторов частоты и мощности типа КРЧ разработанных на основе описываемого устройства.



стика блока регулирования частоты приведена на рис. 3.

Полученные на выходе БРЧ слабые сигналы постоянного тока, пропорциональные отклонению частоты, подаются на вход блоков БВУ (рис. 1), где они подвергаются последующему усилению до значения, достаточного для управления двигателями механизма изменения скорости вращения (Д).

В БВУ в качестве выходных усилителей использованы двухкаскадные дроссельные магнитные усилители, включенные по дифференциальной схеме.

В нормальном режиме работы системы все три блока регулирования частоты включаются на параллельную работу и могут осуществлять регулирование частоты любым числом агрегатов станции. Схема позволяет оставлять для регулирования один из трех или два БРЧ при выводе остальных БРЧ для ревизии или ремонта. При этом не исключается возможность регулировать частоту системы любым числом агрегатов станции.

При делении энергосистемы каждый блок БРЧ осуществляет независимое от других БРЧ регулирование частоты на отделившейся секции с прежней уставкой по частоте. Раздельное регулирование частоты на каждой из отделившихся частей станции дает возможность ускорить синхронизацию отделившихся частей и тем самым ускорить ликвидацию аварии, так как блоки регулирования частоты автоматически выравнивают частоту на каждой из секций. Наличие БРЧ на каждой секции облегчает процесс синхронизации также и в случае, когда вследствие недостатка активной мощности в одной из отделившихся частей системы БРЧ не может поднять ее частоту до прежнего значения.

Автоматическое регулирование нагрузок. Во всех режимах регулирования частоты как при параллельной, так и при раздельной работе каждого БРЧ на своей секции осуществляется автоматическое распределение активной нагрузки между регулирующими агрегатами. Необходимость в автома-

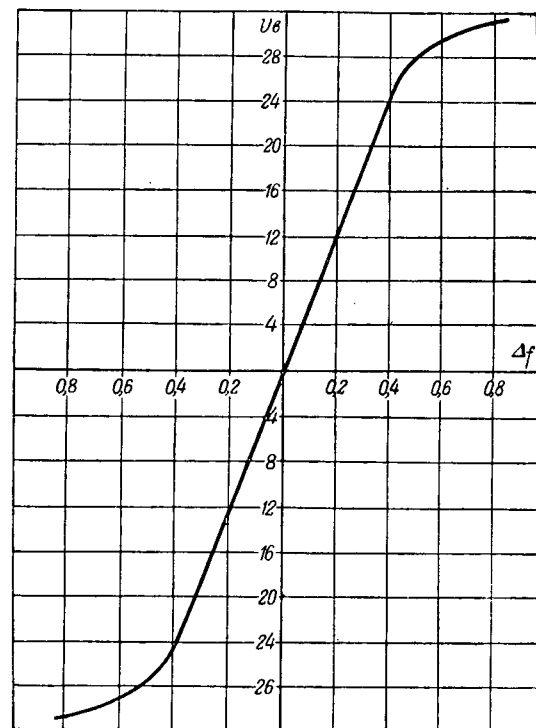


Рис. 3.

тического распределения нагрузок обусловлена различием характеристик регуляторов скорости даже у однотипных агрегатов. При регулировании частоты многими агрегатами это приводит к значительным расхождениям между нагрузками регулирующих агрегатов и к неэкономичной работе гидростанции. При однотипных агрегатах целесообразно уравнивание нагрузок на агрегатах, а при неоднотипных может оказаться желательным неравномерное распределение нагрузки между отдельными регулирующими агрегатами. Автоматический распределитель активной нагрузки, способный осуществлять описанные функции равномерного и долевого распределения нагрузок, состоит из блоков распределения нагрузки (БРН) (рис. 4) по числу агрегатов станции. Каждый блок состоит из измерительного элемента активной нагрузки и промежуточного усилителя.

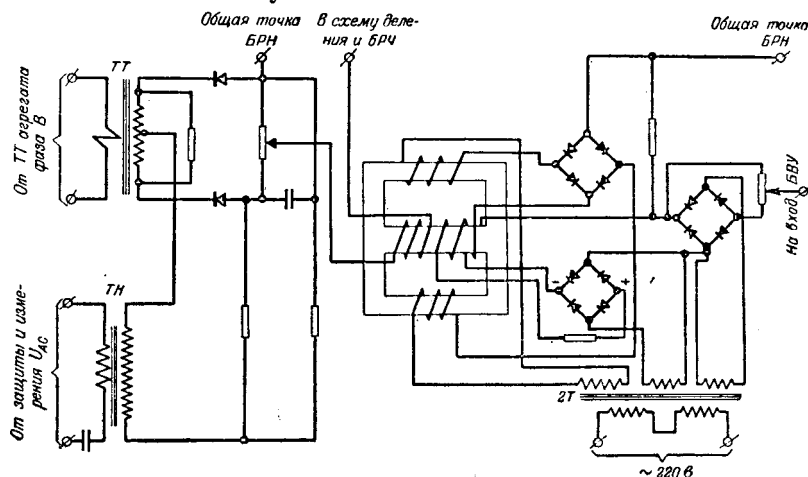


Рис. 4.

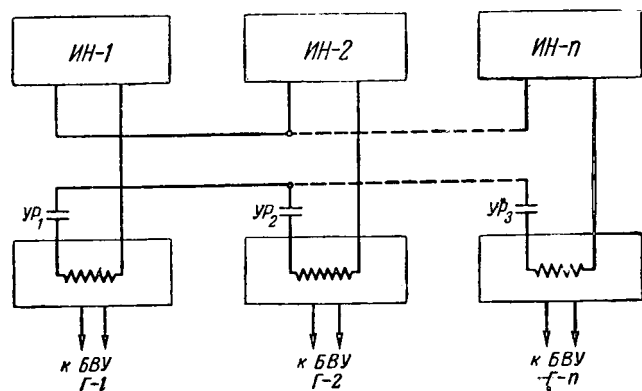


Рис. 5.

ИН — измерительные элементы БРН, УР — контакты реле подключения устройства регулирования.

Измерительные элементы БРН соединяются по схеме, позволяющей измерять отклонение нагрузки каждого агрегата от среднего или заданного значения.

Схема для измерения отклонений нагрузки от заданного значения приведена на рис. 5. В качестве суммирующих сопротивлений использованы управляющие обмотки магнитных усилителей ($У_1$, $У_2$ и т. д.).

Применение магнитных усилителей для усиления токов на выходе БРН, пропорциональных отклонению нагрузки агрегатов от заданного значения, дает возможность выполнить измерительные элементы нагрузки каждого агрегата с весьма малым потреблением: до 3 *ва* в цепях напряжения и до 2,5 *ва* в цепях тока.

Выходные сигналы БРН подаются на обмотки управления выходных магнитных усилителей соответствующих агрегатов.

Таким образом, через управляющую обмотку каждого выходного усилителя (БВУ) протекают два тока. Один, пропорциональный отклонению частоты от заданного значения, и другой — пропорциональный отклонению нагрузки агрегата от среднего (или заданного) значения.

В результате взаимодействия этих двух устройств удается осуществлять автоматическое регулирование частоты с распределением нагрузок с точностью до 3...6% от номинальной, а частота системы поддерживается с точностью до 0,1 *гц*.

Автоматический распределитель нагрузок может быть также использован для выполнения ряда других операций.

Телеуправление суммарной нагрузкой гЭС. В процессе эксплуатации может оказаться необходимым быстрое изменение активной нагрузки в энергосистеме. Дистанционное управление нагрузкой с центрального диспетчерского пункта является наиболее оперативным, так как исключает потерю времени на передачу диспетчером распоряжения на пульт управления станцией. Схемы местного управления активной нагрузкой агрегатов электростанции к тому же не дают возможности одному человеку осуществлять одновременное изменение нагрузки на группе агрегатов. Устройство автоматического регулирования

гЭС позволяет осуществлять управление нагрузкой всей станции или группы агрегатов станции без вмешательства персонала гЭС.

Для этой цели используется блок телеуправления гЭС, состоящий из трех делителей напряжения, каждый из которых питается от однофазного двухполупериодного селенового выпрямителя. Напряжение, снимаемое с каждого из делителей, примерно равно максимальному напряжению на выходе БРЧ. Сигналы управления на каждую секцию гЭС передаются с центрального диспетчерского пункта при помощи ключей «выше» — «ниже» через телеустановку. При воздействии на ключ управления нагрузкой данной секции напряжение от блока телеуправления подается на вход выходных усилителей (БВУ). Степень изменения нагрузки определяется длительностью импульса, посылаемого диспетчером. Распределение нагрузки между агрегатами, управляемыми с центрального диспетчерского пункта, осуществляется так же, как и при регулировании частоты, узлом автоматического распределения нагрузок. В нормальном режиме предусмотрена возможность управления нагрузкой всех агрегатов станции, подключенных к устройствам автоматического регулирования. При этом предварительно должны быть выведены из работы все три БРЧ.

При делении системы управление активной нагрузкой можно осуществить на каждой из отделившихся секций. При этом отключается БРЧ только той секции, на которую передаются сигналы телеуправления. Кроме телеуправления нагрузкой гЭС, диспетчер может телемеханически включать или отключать блоки регулирования частоты, а также управлять их уставкой.

Автоматический набор нагрузки на агрегате. Устройство автоматического регулирования может осуществлять автоматический набор нагрузки на агрегате при пуске или переводе агрегата из режима синхронного компенсатора в генераторный режим.

Автоматический набор нагрузки осуществляется как при местном или телепуске агрегата, так и при работе схемы автоматического пуска агрегата при понижении частоты или автооператора. В этих случаях устройство вступает в работу автоматически после синхронизации агрегата и отведения ограничителя открытия. При выводе агрегата из режима синхронного компенсатора устройство вступает в работу после отведения ограничителя открытия.

Если вывод агрегата из режима синхронного компенсатора или пуск агрегата осуществляется в процессе регулирования частоты, нагрузка на всех регулирующих агрегатах, в том числе и на том агрегате, на котором был произведен автоматический набор нагрузки, выравнивается и имеет уровень, соответствующий требованиям поддержания нормального значения частоты в энергосистеме. Если же при наборе нагрузки на агрегате было включено только устройство распределения нагрузки, а блоки регулирования частоты отключены, на агрегатах установится равная нагрузка без учета требований поддержания

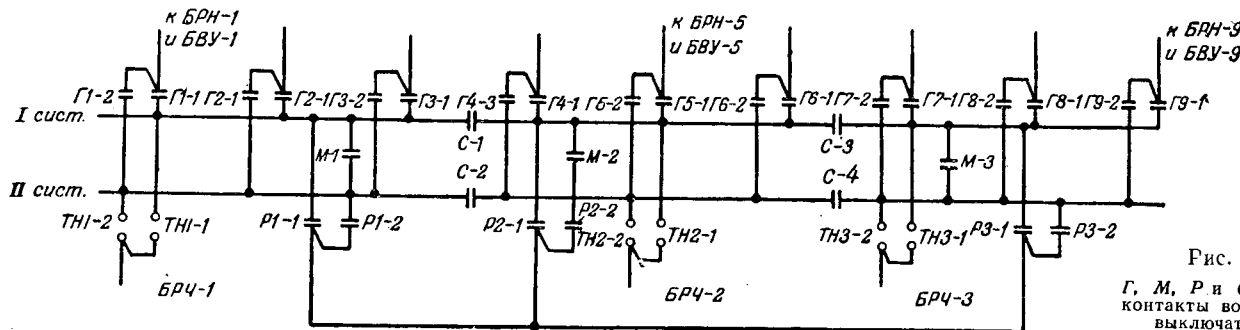


Рис. 6.

Г, М, Р и С — блок-контакты воздушных выключателей.

частоты. Устройство автоматического регулирования может осуществлять автоматический набор нагрузки на агрегате только в том случае, если к нему был предварительно подключен хотя бы один агрегат, несущий активную нагрузку. Из сказанного следует, что во всех режимах работы станции устройство автоматического регулирования целесообразно оставлять включенным независимо от того, регулирует данная электростанция частоту или несет базисную нагрузку. В последнем случае должны быть выведены только блоки БРЧ.

Как указывалось выше, выходные сигналы измерительных элементов блоков распределения нагрузок подвергаются дополнительному усилению при помощи магнитных усилителей. В случае необходимости характеристики этих усилителей могут быть перестроены таким образом, что при достижении тока управления на понижение нагрузки, соответствующего примерно току трогания двигателя механизма регулирования скорости вращения, ток выхода усилителя резко уменьшается, стремясь при дальнейшем увеличении тока управления к нулю. Указанный характер изменения тока на выходе усилителя дает возможность избежать сброса нагрузки на всех регулирующих агрегатах при аварийном сбросе на одном из агрегатов, так как в этом случае сигнал на понижение нагрузки оказывает воздействие на органы управления агрегатом только в сумме с сигналом БРЧ и оказывается недостаточным для уменьшения нагрузки на агрегате без действия БРЧ. Применение таких характеристик усилителей БРН, обеспечивая необходимую точность распределения нагрузки, полностью исключают возможность аварийных сбросов на регулирующих агрегатах.

Узел деления. Специфика схемы первичной коммутации гас и расположение ее в центре объединенной энергосистемы допускает возможность деления схемы первичной коммутации на несколько несинхронных частей. В связи с этим для осуществления регулирования частоты и распределения активной нагрузки в послеаварийном режиме при делении системы необходимо осуществить аналогичное деление схемы регулирования и распределения нагрузок.

Устройство, осуществляющее деление схемы регулирования, называется «узел деления» (рис. 6).

Схема узла деления содержит шесть шин, повторяющих шесть систем шин станции. В соответствии со схемой первичной коммутации эти

шины связываются между собой повторителями реакторных, междушинных и секционных выключателей, осуществляющих коммутацию станции. Блоки распределителя нагрузок подключаются к шинам схемы деления через повторители разъединителей. Следует отметить, что повторители выключателей и разъединителей имелись в коммутации гас до ввода описываемой схемы. Таким образом, схема узла деления является точной копией схемы первичной коммутации станции, в которой генераторы заменены на блоки БРН, а воздушные выключатели и разъединители — на их повторители. При производстве операций в первичной схеме деления автоматически копирует эти операции, соответствующим образом коммутируя схему суммирования автоматического распределения нагрузки.

При делении системы на части, когда первичная схема электростанции делится на несколько независимых частей, узел деления соответствующим образом делит на такое же число частей узел распределения нагрузок, разрывая общий провод схемы суммирования. При этом сохраняется распределение нагрузки только между агрегатами внутри каждой из отделившихся секций.

Для обеспечения возможности регулирования частоты на каждой из отделившихся секций в схеме устройства предусмотрены три блока регулирования частоты (БРЧ). Выбор трех БРЧ определяется тем, что, как правило, станция делится на две или три части².

Выходы всех трех БРЧ связаны с блоками выходных усилителей ВВУ через ту же схему суммирования. Каждый БРЧ получает питание от той секции и системы шин, регулирование частоты которой ему поручается при делении.

В нормальном режиме работы станции узел деления представляет собой единое целое, и все БРЧ оказываются включенными на параллельную работу. При делении системы в результате работы узла деления каждый БРЧ остается подключенным только к агрегатам той секции, от которой питается его измерительный элемент. Регулирование частоты на каждой из отделившихся частей станции осуществляется независимо. Применение узла деления дает возможность значительно ускорить процесс ликвидации аварии, так как БРЧ и распределители нагрузки на

² В редких случаях возможно деление и на большее число частей, в этом случае одна-две машины останутся не подключенными в БРЧ.

каждой из отделившихся секций восстанавливают частоту, поддерживая равную нагрузку на агрегатах каждой секции. Телерегулирование нагрузки агрегатов гЭС при делении осуществляется путем замены сигнала БРЧ сигналом телеуправления. Отключая соответствующий БРЧ, диспетчер имеет возможность осуществлять телерегулирование нагрузки на каждой из отделившихся секций.

Узел защиты и сигнализации. Устройство регулирования частоты снабжено комплектом аппаратуры, исключающим его ложные действия и сигнализирующим о неисправностях схемы. В комплект входит устройство защиты от ложной работы блока регулирования частоты, выполненное для БРЧ каждой секции на случай неправильного действия регулятора частоты вследствие неисправностей в его схеме. Защита выводит регулятор частоты из работы и подает об этом сигнал дежурному персоналу при: 1) снижении частоты ниже определенных пределов и действии регулятора на снижение нагрузки агрегатов вместо ее подъема; 2) повышении частоты выше определенных пределов и действии регулятора частоты на подъем нагрузки вместо ее снижения.

Принципиальная схема устройства защиты приведена на рис. 7. В комплект защиты для каждого блока регулирования частоты входят два реле: индукционное реле частоты $PЧ$, срабатывающее при повышении частоты до 50,5 гц (контакты $PЧ_1$) или снижении ее до 49,3 гц ($PЧ_2$); дифференциальное реле $ДР$ с двумя обмотками $ДР_1$ и $ДР_2$. Обмотка $ДР_2$ подключена к выходу БРЧ данной секции. Обмотка $ДР_1$ имеет среднюю точку. Питание на ту или иную половину этой обмотки поступает от источника постоянного напряжения 220 в при замыкании соответствующих контактов реле частоты $PЧ_1$ или $PЧ_2$.

Дифференциальное реле рассчитано таким образом, что если под током находится только одна или обе его обмотки, но при противоположном направлении токов, контакты реле остаются разомкнутыми. Лишь при одинаковом направлении тока в обеих обмотках контакты реле замыкаются и создают цепь на выходное реле с ручным возвратом, которое выводит из работы БРЧ данной секции и подает предупредительный сигнал дежурному персоналу.

При достижении частоты 50,5 гц замыкается контакт $PЧ_1$ и через левую половину обмотки $ДР_2$ течет ток, однако недостаточный для создания необходимого для замыкания контактов потока. Если при этом ток от БРЧ по обмотке реле $ДР_1$ соответствует набору нагрузки на агрегатах, то потоки обеих катушек сложатся, и реле $ДР$ замкнет свои контакты. Если же ток от БРЧ течет в обратную сторону — на снижение нагрузки, то потоки вычтутся один из другого, и контакты реле не смогут замкнуться. При протекании тока только от БРЧ реле также не в состоянии замкнуть своих контактов. Таким образом, работу дифференциального реле можно представить в следующей таблице:

Частота, гц	Подача сигнала на	Действие реле
Выше 50,5	Подъем нагрузки	Замкнет контакт
Выше 50,5	Снижение нагрузки	Не работает
Ниже 49,4	Подъем нагрузки	Не работает
Ниже 49,3	Снижение нагрузки	Замкнет контакт

Действие устройства автоматического регулирования частоты и активной мощности агрегатов прекращается в случае исчезновения питания этого устройства оперативным током 220 в, переменным током 220 в, переменным током 115 в от ТН подстанции.

Уведомление дежурного персонала о выходе из строя схемы регулирования осуществляется при помощи реле минимального напряжения. Одно реле замыкает свои контакты при исчезновении питания на соответствующем БРЧ от ТН подстанции и действует на выходное реле защиты, выводящее БРЧ полностью из работы. Остальные реле действуют только на сигнал «нарушение режима».

В комплекс защитных устройств входит также схема ограничения пределов регулирования, осуществляемая на блок-контактах штока сервомотора гидротурбины.

Перед вводом в работу все элементы устройства регулирования частоты и мощности были тщательно проверены и отрегулированы; было налажено взаимодействие всех элементов и частей схемы. В наладке возникли затруднения, вызванные несовершенством регуляторов скорости гидротурбин. Персонал гидростанции внес ряд упрощений и изменений в схему регулятора скорости турбины, что повысило качество его работы.

Принципиальное требование к регулятору скорости заключается в том, что он должен с достаточной чувствительностью реагировать на отклонение частоты. Регулятор же частоты должен компенсировать остающуюся степень неравномерности регулятора скорости гидротурбины, перемещая его характеристику. Набор нагрузки на генератор после его включения в сеть происходит очень медленно, с последующим резким переуправлением, если масляный катаракт регулятора скорости не выводится из работы немедленно после включения выключателя агрегата. Особенно это недопустимо при аварийном включении агрегата в случае снижения частоты в системе. Это обстоятельство вынудило станцию осуществить электромагнитную схему выво-

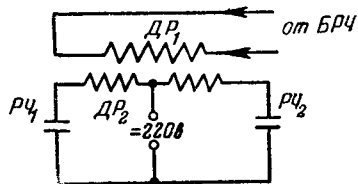


Рис. 7.

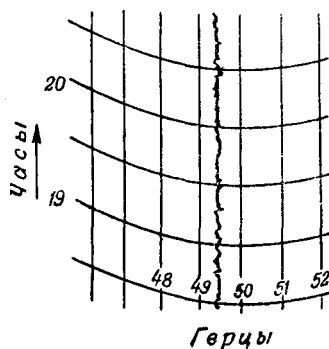


Рис. 8.

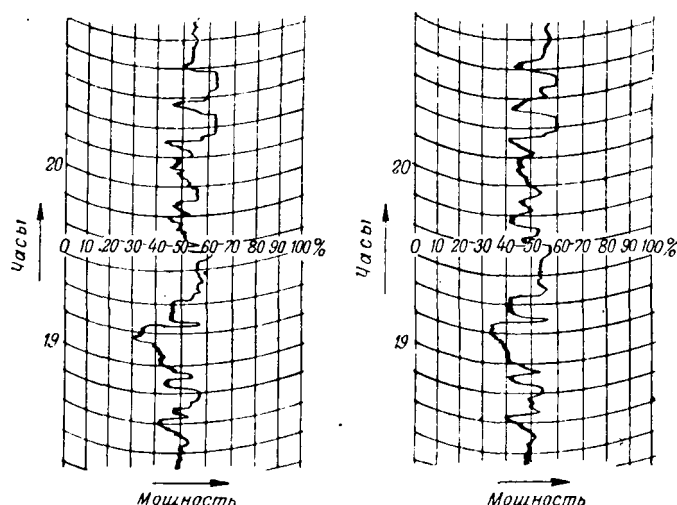


Рис. 9.

да катаракта при включении агрегата в сеть в отличие от заводской схемы, при которой катаракт выводится механической блокировкой при определенном открытии направляющего аппарата.

Много усилий потребовала наладка механизмов изменения скорости вращения регуляторов скорости, главным образом редукторов двигателей управления. Этот узел явно не удовлетворяет требованиям непрерывного регулирования частоты, но завод-изготовитель недостаточно работает над созданием более совершенной конструкции. Станция исключила также из электрической схемы регулятора скорости микровыключатели, как ненадежные в работе, заменив их ртутными прерывателями-переключателями, модернизированными работниками станции.

Работа по упрощению и наладке регуляторов скорости дала хороший результат: все агрегаты, включенные в сеть, чувствительно реагируют на отклонения частоты изменением нагрузки в пределах, обусловленных остающейся степенью неравномерности. При относительно малых изменениях графика нагрузки системы регуляторы скорости гидрогенераторов более часа автоматически поддерживали частоту в пределах $\pm 0,2$ гц.

Описанное выше комплексное устройство регулирования частоты и мощности было испытано как по специальной программе, так и в длительной работе. Испытанием установлено, что при внезапном сбросе до 20% нагрузки станции частота снижалась не более чем на 0,3 гц, восстанавливаясь уже через 40 сек. При этом явление перерегулирования не наблюдалось, а распределение нагрузок между агрегатами, оставшимися в работе в переходном режиме, было не более 10...12%, а в установившемся — не более 3...5%. Опыты показали также, что при разгрузке одного из агрегатов другие агрегаты не сбрасывают нагрузку, а продолжают поддерживать частоту в нормальных пределах.

После более трехлетней эксплуатации устройства было установлено, что регулирование частоты

при нормальных изменениях нагрузок в системе происходит, как правило, с отклонениями не более $\pm 0,1$ гц, а отклонение нагрузки агрегатов, участвующих в регулировании, от среднего значения не выходит за пределы 3...6%. На рис. 8 приведены записи частоты в энергетической системе при регулировании частоты агрегатами гЭС, а на рис. 9 записи мощности этих агрегатов.

Устройство регулирования частоты было использовано также для автоматической разгрузки транзитной линии, связывающей две энергосистемы. Это было выполнено следующим образом: при внезапном отключении одной из двух транзитных линий и перегрузке оставшейся в работе подается импульс на повышение уставки регулятора частоты в той части энергосистемы, куда направлен переток мощности и где имеется резерв мощности. При регулировании частоты с повышенной уставкой автоматически разгружается транзитная линия с последующим выравниванием нагрузок и частоты по указанию диспетчера.

Выводы. 1. Созданы комплексное устройство и схемы, позволившие автоматизировать следующие процессы:

а) регулирование частоты в объединенной энергосистеме любым количеством агрегатов гидростанции;

б) распределение нагрузок между работающими агрегатами;

в) регулирование частоты в энергосистеме, разделенной на несинхронные участки;

г) телеуправление с центрального диспетчерского пункта нагрузкой электростанции или ее отдельных секций;

д) набор нагрузки на агрегат, включаемый в работу на гЭС, а также при пуске его с центрального пункта или от схемы пуска при понижении частоты в системе;

е) разгрузку транзитной линии.

2. Устройство показало высокую надежность в работе и хорошее качество регулирования частоты с точностью до $\pm 0,1$ гц и распределения нагрузок между агрегатами с точностью до 3...6%.

3. Устройство позволяет перейти к завершающей стадии в автоматизации станции — регулированию и распределению реактивных нагрузок и вводу в действие автооператора.

Литература

1. А. Ф. Яковлев. Усовершенствование автоматического управления агрегатами станции. Электрические станции, № 5, 1953.

2. П. К. Ляпин и В. М. Митроковский. Автоматический пуск резервного гидрогенератора при понижении частоты. Электрические станции, № 9, 1952.

3. М. И. Песочин. Работы по телемеханизации в крупной энергосистеме. Электрические станции, № 9, 1954.

4. А. Р. Кондрус. Универсальное ртутное реле оборотов. Электрические станции, № 12, 1952.

[14. 10. 1955]



Влияние емкостной проводимости линий на работу высокочастотной дифференциально-фазной защиты

Кандидат техн. наук Е. Д. САПИР

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

Дифференциально-фазная высокочастотная защита применяется в СССР на линиях электропередачи как малой, так и большой протяженности. С 1954 г. защита применяется на линиях 220 кВ протяженностью до 260 км.

Применительно к линиям большой протяженности анализ поведения фильтровых высокочастотных защит — как направленной, так и дифференциально-фазной — необходимо проводить с учетом емкостной проводимости линии. Ниже рассмотрено влияние емкостной проводимости линии на работу дифференциально-фазной защиты типа ДФЗ-2 [Л. 1, 2], предназначенной для применения на линиях 110... 220 кВ, при различных режимах работы линии и при коротких замыканиях. Приводимые данные должны учитываться главным образом применительно к длинным линиям 220 кВ, так как даже при одинаковых длинах их емкостные токи примерно в 2 раза превосходят емкостные токи линий 110 кВ.

Нормальный симметричный режим. При нормальном симметричном режиме работы электропередачи емкостная проводимость может вызывать заметный сдвиг по фазе между токами на концах защищаемой линии. Это необходимо учитывать при проверке током нагрузки линии правильности включения трансформаторов тока и защиты во время ее наладки, а также при оценке результатов ежедневной проверки исправности высокочастотного канала, когда передатчики пускаются на обоих концах линии.

Влияние емкостной проводимости на сдвиг по фазе между токами на концах линии при нормальном режиме может быть рассмотрено при помощи рис. 1, а, где линия представлена Т-образной схемой замещения. Для практических расчетов можно принять:

$$Z_T = \frac{Z_A}{2}; Y_T = jbl,$$

где Z_A — полное сопротивление линии без учета ее емкостной проводимости;

b — емкостная проводимость 1 км линии (для линий 220 кВ $b = 2,7 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{ом км}}$);

l — длина линии, км.

При принятых на рис. 1, а условных положительных направлениях токи $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ на концах линии связаны следующим выражением:

$$\dot{I}_n = \dot{I}_m - \dot{I}_c,$$

где $\dot{I}_c$ — емкостный ток линии.

Сдвиг по фазе между токами $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ будет приближаться к максимальному при совпадении по фазе тока с напряжением в середине линии, что в случае линий большой протяженности обычно близко к действительности и соответствует передаче по линии почти только активной мощности. Из векторной диаграммы для этого слу-

чая (рис. 2, а) следует, что если ток $\dot{I}_m$ совпадает по фазе с напряжением U_N , то при изменении по величине тока $\dot{I}_m$ конец вектора тока $\dot{I}_n$ будет скользить по прямой MM' . Угол сдвига по фазе φ между токами $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ будет уменьшаться при возрастании мощности, передаваемой по линии, т. е. при возрастании тока $\dot{I}_m$, так как при неизменном напряжении и данной длине линии $I_c = \text{const}$. Так, например, для линий 220 кВ длиной 200 км ($I_c = 70 \text{ а}$) угол φ будет составлять 13° при токе $\dot{I}_m = 300 \text{ а}$ и 25° при токе $\dot{I}_m = 150 \text{ а}$.

При проверке исправности канала высокочастотные импульсы на концах линии могут быть сдвинуты по фазе под влиянием емкостного тока на угол, отличный от 180° , что может быть при-

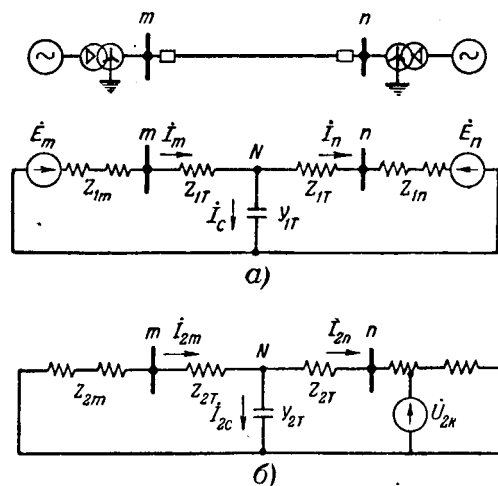


Рис. 1. Схемы замещения электропередачи с учетом емкостной проводимости линии.

а — нормальный симметричный режим; б — расчетная схема для составляющих обратной последовательности при внешнем несимметричном коротком замыкании.

$$\text{Для одноцепной линии } Z_{2T} = Z_{1T} = \frac{Z_{1A}}{2}; Y_{2T} = j b_1 l;$$

$$\text{для двухцепной линии } Z_{2T} = Z_{1T} = \frac{Z_{1A}}{4}; Y_{2T} = j 2 b_1 l.$$

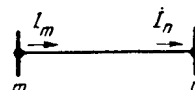


Рис. 2. Векторные диаграммы токов на концах линии с учетом ее емкостной проводимости.

а — нормальный симметричный режим; б — внешнее симметричное короткое замыкание.

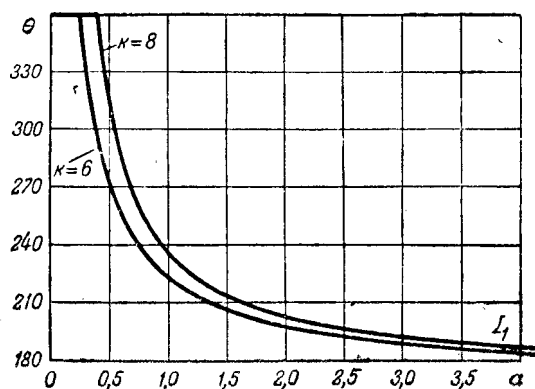


Рис. 3. Зависимость длительности высокочастотных импульсов (в электрических градусах при промышленной частоте) от тока прямой последовательности на входе комбинированного фильтра $I_1 + kI_2$.

чиной неполного закрытия выходной лампы приемника. На указанный сдвиг фаз будет влиять также наличие запаздывания α в передаче фазы тока с одного конца линии на другой, обусловленное конечной скоростью распространения высокочастотного сигнала ($\alpha = 6^\circ$ на каждые 100 км длины линии). При этом на одном из концов линии сдвиг по фазе между высокочастотными импульсами на входе приемника увеличивается по сравнению со сдвигом по фазе между токами, а на другом уменьшается [Л. 2]. Кроме того, необходимо учитывать, что при малых величинах напряжения на выходе органа манипуляции высокочастотного передатчика, что имеет место при передаче по линии небольшой мощности, длительность высокочастотных импульсов будет превышать полпериода промышленной частоты. Это вызывает более полное закрытие выходной лампы приемника при проверке исправности высокочастотного канала. Кривые зависимости длительности высокочастотных импульсов от тока прямой последовательности на входе комбинированного фильтра $I_1 + kI_2$ приведены на рис. 3.

С учетом приведенных факторов в рассматриваемом случае токи в обмотках реле органов сравнения фаз токов будут соответствовать по фазной характеристике защиты следующим эквивалентным углам ψ сдвига по фазе между вторичными токами трансформаторов тока на концах линии:

$$\psi_n = \theta - \varphi + \alpha;$$

$$\psi_m = \theta - \varphi - \alpha,$$

где θ — длительность высокочастотных импульсов одного передатчика;

φ — сдвиг по фазе между первичными токами на концах линии.

На приемной подстанции (индекс n) вторичный ток опережает тот же ток противоположного конца линии на угол $180^\circ - \varphi$. На приемном конце линии сдвиг по фазе между высокочастотными импульсами будет меньше, чем на другом конце линии, на угол 2α . Со стороны приемной подстанции будет поэтому иметь место

более полное закрытие выходной лампы приемника. Протекание тока в анодной цепи этой лампы возможно только при $\psi < 180^\circ$. Значения $\psi > 180^\circ$ могут иметь место за счет увеличения длительности высокочастотных импульсов при протекании небольших токов по линии ($\theta > 180^\circ$). При этом ток в анодной цепи выходной лампы приемника будет отсутствовать, так как на входе приемника будет действовать непрерывный высокочастотный сигнал.

Из приведенных данных следует, что емкостные токи линии будут меньше влиять на результаты проверки исправности высокочастотного канала при меньшем напряжении на выходе органа манипуляции передатчика, т. е. при более высоких коэффициентах трансформации трансформаторов тока и при использовании в комбинированном фильтре тока коэффициента $k = 8$, наибольшего из принятых в защите.

Внешние короткие замыкания. В отличие от нормального нагрузочного режима при внешних коротких замыканиях первичные токи на концах линии практически совпадают по фазе. Последнее иллюстрируется векторной диаграммой при внешнем симметричном коротком замыкании у шин подстанции n , приведенной на рис. 2, б, где ток I_m принят сдвинутым по фазе относительно э. д. с. генераторов на 90° , что на линиях 220 кВ близко к действительности. Исключение из сказанного составляет только случай короткого замыкания на одной из параллельных цепей линии при равенстве напряжений на ее концах, когда с обеих сторон неповрежденной линии протекают только емкостные токи, фазы которых соответствуют повреждению в защищаемой зоне [Л. 3]. Однако применительно к защите типа ДФЗ-2 такой случай не должен рассматриваться, так как используемые в защите токовые пусковые органы на неповрежденной линии при этом срабатывать не будут.

Влияние емкостного тока линии при внешних коротких замыканиях удобно проследить в общем виде по отношению токов на обоих концах линии. Отношение токов обратной последовательности $\frac{I_{2m}}{I_{2n}}$ может быть определено из схемы, показанной на рис. 1, б:

$$I_{2m} = -\frac{I_{2c}}{Y_{2r}Z_2};$$

$$I_{2n} = I_{2m} - I_{2c} = -I_{2c} \left(\frac{1}{Y_{2r}Z_2} + 1 \right),$$

где

$$Z_2 = Z_{2m} + Z_{2r},$$

откуда

$$\frac{I_{2m}}{I_{2n}} = \frac{1}{1 + Y_{2r}Z_2} = re^{j\varphi}.$$

Из полученного выражения следует, что при отсутствии активных сопротивлений в элементах схемы угол φ сдвига по фазе между токами I_{2m} и I_{2n} равен нулю. Для случая электропередачи,

приведенной на рис. 4, а, при внешнем несимметричном коротком замыкании за шинами подстанции n

$$\frac{I_{2m}}{I_{2n}} = \frac{1}{1 + j540 \cdot 10^{-6} \cdot j433} = 1,3.$$

Отношение токов нулевой последовательности $\frac{I_{0m}}{I_{0n}}$ будет значительно меньшим, так как в соответствии с рис. 4, б

$$Y_{0r} < Y_{2r} \text{ и } Z_0 < Z_2.$$

Абсолютные значения отношений $\frac{I_{2m}}{I_{2n}}$ и $\frac{I_{0m}}{I_{0n}}$ могут получаться настолько большими, что при внешних коротких замыканиях появляется вероятность пуска защиты только на одном из концов линии. На таких линиях защита типа ДФЗ-2 не может быть использована без специальных устройств для компенсации емкостных токов линии в пусковом органе. Применение таких устройств усложнило бы защиту, в связи с чем она в настоящее время не предусматривается для применения на линиях протяженностью свыше 300 км.

Включение линии под напряжение. На длинных линиях 220 кВ сравнительно больших величин могут достигать емкостные токи обратной и нулевой последовательностей при включении под напряжение одной или двух фаз линии. Указанные токи в установившемся режиме могут быть определены из соответствующих комплексных схем замещения. Результаты расчетов для 100-км линии 220 кВ без учета активного и индуктивного сопротивлений приведены в таблице.

Под напряжение включены	Емкостные токи, а (на 100 км линии 220 кВ)	
	I_2	$3I_0$
Одна фаза	10	30
Две фазы	12,6	26,2

В переходном процессе, возникающем при включении линии, емкостный ток обычно содержит составляющие высших гармоник, которые по величине оказываются больше приведенных в таблице. При пуске защиты только от токов обратной последовательности токи в обмотках реле пускового органа по опытным данным не отличаются, однако, от токов установившегося режима, что объясняется наличием простейшего фильтра высших гармоник в виде емкости, подключенной параллельно вторичной обмотке трансформатора 1ТН₂ [Л. 2]. В общем случае при использовании для пуска защиты составляющих обратной и нулевой последовательностей токи срабатывания реле пускового органа достаточно принять в 1,5... 2 раза большими токов, приведенных в таблице, что обеспечивает надежную отстройку от емкостных токов переходного процесса.

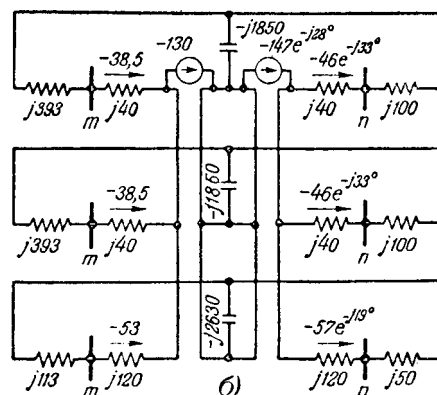
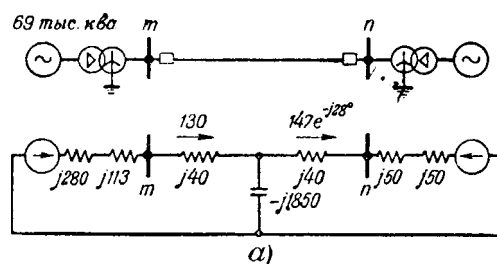


Рис. 4. Токораспределение на линии 220 кВ длиной 200 км при передаче мощности 50 тыс. кВт.

а — нормальный режим; б — режим работы двумя фазами;
 $I_{1m} = 130 - 38,5 = 91,5$ а; $I_{1n} = 147e^{-j28^\circ} - 46e^{-j33^\circ} = 102e^{-j25^\circ}$ а.

Работа линии двумя фазами. При автоматическом переводе линии в режим работы двумя фазами после однофазного короткого замыкания пусковые органы защиты могут не вернуться в исходное положение под влиянием появляющихся токов обратной и нулевой последовательностей. Блокировка защиты будет при этом осуществляться благодаря непрерывной посылке в линию токов высокой частоты. Надежность блокировки будет определяться в этом случае, как и при внешних коротких замыканиях, сдвигом по фазе между токами $I_1 + kI_2$ на концах линии.

При переводе линии в неполнофазный режим работы фазы токов прямой и обратной последовательностей будут определяться током предшествующего полнофазного режима нагрузки. Сдвиг по фазе между токами $I_1 + kI_2$ на концах линии может быть определен при этом наложением на токи нормального нагрузочного режима токов, полученных из комплексной схемы замещения с двумя разрывами в одной фазе, составленной с учетом емкостной проводимости линии [Л. 4].

Так же как при полнофазном режиме работы линии, сдвиг по фазе между токами $I_1 + kI_2$ на ее концах при работе двумя фазами будет возрастать при уменьшении тока нагрузки. Наиболее неблагоприятным является случай, при котором по линии, работающей двумя фазами, протекают токи обратной и нулевой последовательностей, близкие к току возврата реле пускового органа цепей отключения защиты. При меньших токах поведение защиты не должно рассматриваться, так как после возврата пускового органа

возможность срабатывания защиты под влиянием неблагоприятных фазных соотношений между токами на концах линии исключается. Из сказанного следует, что при прочих равных условиях надежность блокировки защиты при работе линии двумя фазами тем выше, чем выше ток возврата реле пускового органа цепей отключения. Для повышения надежности блокировки защиты после отключения одной фазы необходимо вместе с тем добиваться высокого коэффициента возврата поляризованного реле органа сравнения фаз токов. При уставке зоны блокировки в 60° можно обеспечить возврат указанного реле при сдвиге по фазе между высокочастотными импульсами обоих концов линии в $135^\circ \dots 140^\circ$.

В качестве примера на рис. 4,б приведено токораспределение по схемам отдельных последовательностей при отключении одной фазы на обоих концах линии для случая параллельной работы с энергосистемой одного гидрогенератора 69 тыс. *кВА* по линии 220 *кВ* длиной 200 *км*. Из данных рис. 4 можно сделать вывод, что на линиях 220 *кВ* протяженностью примерно до 200 *км* обычно обеспечивается надежная блокировка защиты при работе линии двумя фазами независимо от предшествующего режима нагрузки. Последнее обусловлено тем, что при токах обратной и нулевой последовательностей, приведенных на рис. 4,б, обычно обеспечивается возврат как пускового органа защиты, так и реле органа сравнения фаз токов. При токах предшествующего режима нагрузки, превышающих приведенные на рис. 4,а, когда пусковые органы могут не вернуться в исходное положение после перевода линии в режим работы двумя фазами, защита будет надежно блокироваться благодаря уменьшению сдвига по фазе между токами на концах линии по сравнению с указанными на рис. 4,б.

При увеличении протяженности линии надежность блокировки защиты при передаче небольшой мощности по двум фазам одновременно уменьшается в связи с необходимостью использования более чувствительных уставок пускового органа и благодаря большему сдвигу по фазе между токами $I_1 + kI_2$ в местах установки защиты из-за увеличения емкостной проводимости линии. На линиях 220 *кВ* протяженностью порядка 200 *км* и выше, оборудованных однофазным автоматическим повторным включением, может поэтому оказаться целесообразным использовать устройство для компенсации емкостного тока линии в органе манипуляции высокочастотного передатчика одного из полуккомплектов защиты. Такие устройства, подключаемые к цепям трансформаторов напряжения, используются в дифференциально-фазной защите линий 400 *кВ* [Л. 5].

При использовании указанного устройства напряжения на выходах органов манипуляции высокочастотных передатчиков обоих концов линии будут сдвинуты по фазе при работе линии двумя фазами на 180° независимо от величины передаваемой мощности. Однако использование такого устройства возможно только при подклю-

чении трансформаторов напряжения непосредственно к линии, так как только в этом случае устройство может правильно отличать режим отключения фазы с одной стороны линии от режима ее отключения на обоих концах линии. В защите типа ДФЗ-2 достаточно компенсировать только емкостные токи обратной последовательности. Компенсирующее устройство получается при этом весьма простым и состоит из активно-емкостного фильтра напряжения обратной последовательности малой мощности и одного промежуточного трансформатора.

Выводы. 1. Емкостная проводимость линии ограничивает область применения дифференциально-фазной высокочастотной защиты типа ДФЗ-2 линиями 220 *кВ* протяженностью примерно 300 *км*. При использовании в защите специальных устройств для компенсации емкостных токов возможно ее применение и на линиях большей протяженности.

2. Уставки пускового органа защиты на длинных линиях необходимо выбирать с учетом разницы в величинах токов на концах линии при внешних коротких замыканиях в минимальном режиме работы электропередачи и емкостных токов при включении под напряжение одной или двух фаз линии.

3. Емкостная проводимость практически не влияет на надежность блокировки защиты типа ДФЗ-2 при внешних коротких замыканиях с точки зрения фазных соотношений между токами на концах линии. Наличие сдвига по фазе между указанными токами в нормальном симметричном режиме не может влиять на работу защиты, но должно учитываться при оценке результатов проверки исправности высокочастотного канала.

4. На длинных линиях 220 *кВ*, оборудованных однофазным автоматическим повторным включением, необходимо учитывать сдвиг по фазе между токами на концах линии в режиме ее работы двумя фазами. На линиях 220 *кВ* протяженностью примерно 200 *км* и выше, для которых предусматривается возможность длительной или кратковременной работы двумя фазами, может оказаться целесообразным использовать устройство для компенсации емкостных токов обратной последовательности в органе манипуляции высокочастотного передатчика одного из полуккомплектов защиты.

Литература

1. А. М. Федосеев. Релейная защита электрических систем. Госэнергоиздат, 1952.
2. Е. Д. Сапир. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110—220 *кВ*. Электричество, № 6, 1955.
3. Е. Д. Сапир и М. И. Царев. Релейная защита и линейная автоматика линий 400 *кВ*. Труды ЦНИЭЛ, вып. 2. Госэнергоиздат, 1954.
4. А. Б. Чернин. Короткие замыкания при неполнофазных режимах на линиях 400 *кВ*. Электричество, № 3, 1955.
5. Я. Н. Лугинский, Е. Д. Сапир и Г. Г. Якубовсон. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 400 *кВ*. Труды ЦНИЭЛ, вып. 2. Госэнергоиздат, 1954.

[11. 7. 1955]

Защитная арматура гирлянд изоляторов воздушных линий

Инж. А. К. ГЕРЦИК, кандидат техн. наук Е. В. КАЛИНИН, кандидат техн. наук А. В. КОРСУНЦЕВ, инж. С. Д. МЕРХАЛЕВ

Научно-исследовательский институт постоянного тока

В довольно обширной литературе, посвященной выбору защитной арматуры гирлянд изоляторов, имеется целый ряд противоречивых и ошибочных положений. Ошибки имелись и в практике применения этой арматуры. В связи с этим целесообразно проанализировать основные требования, которые должны быть предъявлены к защитной арматуре, и возможности, заложенные в ее использовании.

В разное время предполагалось, что защитная арматура позволяет разрешить следующие задачи: 1) предотвратить каскадный разряд, т. е. такой разряд, при котором путь перекрытия плотно прилегает к поверхности изолятора; 2) отвести рабочую дугу от поверхности изолятора и этим защитить фарфор от термического воздействия дуги; 3) повысить разрядное напряжение гирлянды при импульсных напряжениях и напряжениях промышленной частоты; 4) разгрузить наиболее перегруженные изоляторы путем более равномерного распределения напряжения по гирлянде и этим предотвратить коронирование на изоляторах, увеличить срок их службы и устранить радиопомехи.

Задача настоящей статьи рассмотреть, в какой мере необходима постановка перечисленных задач и возможно ли их разрешение путем применения практически приемлемых конструкций защитной арматуры. Исследования, необходимые для решения этой задачи, были проведены в лаборатории техники высоких напряжений Научно-исследовательского института постоянного тока.

Предотвращение каскадного разряда. Так называемая «кривая Торока», долгое время прини-

мавшаяся за достоверную, создавала ложное впечатление о возможности предотвращения каскадного разряда при сравнительно приемлемых соотношениях размеров защитной арматуры. Однако уже в 1938 г. А. В. Калантаров и П. Л. Краснов [Л. 1] доказали ошибочность кривой Торока и показали, что предотвращение каскадного разряда является трудной задачей, особенно при импульсных напряжениях положительной полярности.

Работы, проведенные в Научно-исследовательском институте постоянного тока, показали, что при промышленной частоте перекрытие гирлянды носит каскадный характер даже в том случае, когда расстояние между элементами защитной арматуры таково, что разрядное напряжение гирлянды снижено почти на одну треть. При перекрытии же под дождем разряд является каскадным и при большем сближении электродов защитной арматуры. Примеры таких разрядов приведены на рис. 1 и 2.

Импульсный разряд при практически приемлемых размерах защитной арматуры и положительной полярности носит почти всегда каскадный характер. При отрицательной полярности импульсный разряд также всегда каскадирует, если напряжение на несколько процентов выше минимального импульсного; по воздуху иногда проходит только разряд на хвосте волны. Характерно, что каскадный характер разряда сохраняется и при расстоянии между электродами защитной арматуры, намного меньшем длины гирлянды. Например, из фотографии, приведенной на рис. 3, видно, что каскадный импульсный раз-

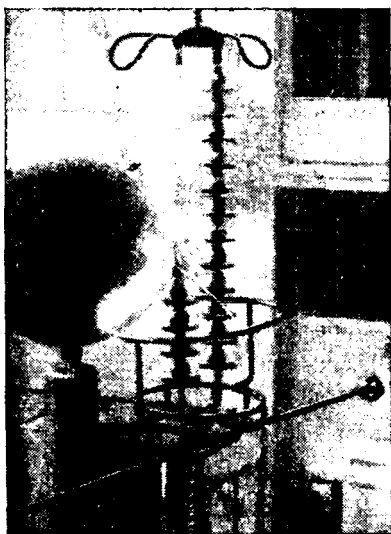


Рис. 1. Каскадный разряд при мокроразрядном испытании гирлянды из 12 элементов ПЦ-7. Длина гирлянды 2 220 мм, расстояние между арматурами 1 780 мм.



Рис. 2. Каскадный разряд при сухоразрядном испытании гирлянды из 12 элементов ПЦ-7. Длина гирлянды 2 220 мм, расстояние между арматурами 1 940 мм.



Рис. 3. Каскадный разряд по сдвоенной гирлянде из 12 элементов ПЦ-7 с защитной арматурой при импульсе положительной полярности ($U_{раз} = 1\ 820\ кВ$). Длина гирлянды 2 220 мм, расстояние между арматурами 1 740 мм. Минимальное разрядное напряжение 1 040 кВ.



Рис. 4. Фотоснимок разряда в момент короткого замыкания на поддерживающей гирлянде из 22 элементов ПЦ-7 с защитной арматурой ($I_{к.з} = 4\ 500\ a$).

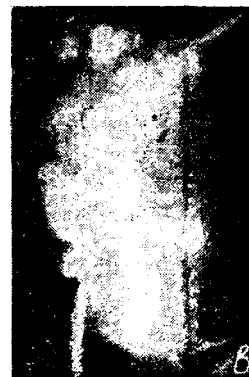


Рис. 5. Фотоснимки разряда при коротком замыкании на поддерживающей гирлянде из 22 элементов ПЦ-7 с защитной арматурой ($I_{к.з} = 880\ a$). а — момент зажигания дуги; б — через 0,12 сек после зажигания; в — через 0,5 сек после зажигания.

ряд охватывает элементы гирлянды, расположенные значительно ниже кольца защитной арматуры.

Таким образом, следует считать установленным, что применение защитной арматуры, имеющей сколько-нибудь практически приемлемую конфигурацию, не может предотвратить каскадный разряд по гирлянде изоляторов ни при промышленной частоте, ни при импульсных напряжениях.

Отвод силовой дуги. Путем применения защитной арматуры соответствующих конфигураций и размеров можно создать благоприятные условия для отвода от поверхности фарфора силовой дуги, возникшей после каскадного перекрытия. Однако экспериментальные исследования показывают, что отвод дуги наступает через относительно большой промежуток времени.

На рис. 4 приведен фотоснимок силовой дуги на гирлянде из 22 изоляторов ПЦ-7 с защитной арматурой при токе короткого замыкания, спадающем за время выдержки защиты (0,12 сек) с 4 500 до 3 900 а. Арматура была выполнена в виде V-образно изогнутого овала $2\ 600 \times 750\ мм$ из труб диаметром 48 мм. Для улучшения отвода дуги от поверхности изоляторов овал крепился к однолапчатому ушку непосредственно под стержнем выше линейного зажима. На заземленном конце гирлянды арматуры не было. Дуга зажигалась каскадно тонкой проволокой диаметром 0,1 мм, опутывающей изоляторы гирлянды.

На протяжении всего времени горения дуги, т. е. 0,12 сек, она окутывала изоляторы гирлянды так, как видно на рис. 4, и не отдалялась от гирлянды, несмотря на наличие на ее нижнем конце защитной арматуры. Такой же результат был получен и при токе короткого замыкания, спадающем с 7 300 до 5 000 а.

На рис. 5 приведены три фотоснимка, дающих представление о развитии разряда в другом опыте при токе короткого замыкания, спадающем с 880 до 520 а, и длительности дуги 0,5 сек. На этих фотоснимках видно, что даже через длительное время дуга все еще частично захватывает отдельные изоляторы. Аналогичные результаты получены и в других работах [Л. 2 и 3].

Таким образом, отвод дуги при помощи защитной арматуры может быть эффективно осуществлен только в сетях с компенсированной нейтралью, защиты которых имеют большие выдержки времени, существенно превышающие 0,5 сек. На современных высоковольтных линиях, оснащенных, как правило, быстродействующими защитами, дугоотводящие свойства защитной арматуры не могут быть использованы.

Следует отметить, что при выдержках времени защиты линий, не превышающих 0,5 ... 0,7 сек, нет оснований опасаться действия силовой дуги. В Институте постоянного тока несколько изоляторов было подвергнуто четырехкратному воздействию силовой дуги при токе 500 ... 1 000 а. Каждое воздействие продолжалось около 1 сек. Хотя многие из подвергшихся испытанию изоляторов имели сильные ожоги, их электрические и механические характеристики остались практически без изменений. Аналогичные результаты получены и в других работах [Л. 4 и 5] при исследовании электрических и механических характеристик обожженных дугой изоляторов, снятых с линии электропередачи 220 кв.

Повышение разрядного напряжения. Защитная арматура может оказать влияние на величину разрядного напряжения гирлянды изоляторов только за счет улучшения распределения напряжения по ней. Однако при промышленной частоте и даже сухой гирлянде разряду предшествуют столь большие ионизационные токи, что распределение напряжения по элементам гирлянды в момент, предшествующий разряду, практически равномерно. В этом случае защитная арматура не может оказать существенного влияния на разрядное напряжение. Это подтверждается тем фактом, что, несмотря на большую начальную неравномерность распределения напряжения по

гирлянде без защитной арматуры, мокроразрядное напряжение, по мере увеличения числа элементов в гирлянде, растет приблизительно по линейному закону. На кривой рис. 6 показано полученное в Институте постоянного тока изменение величины сухоразрядного напряжения гирлянды в процентах при различных размерах и положениях защитной арматуры. Как видно из этой кривой, неблагоприятное соотношение размеров защитной арматуры может привести к заметному снижению разрядного напряжения; при наиболее благоприятных размерах арматуры величина разрядного напряжения гирлянды практически не превышает разрядного напряжения этой же гирлянды без защитной арматуры.

По распространенному до настоящего времени представлению импульсное разрядное напряжение гирлянд считалось всегда ниже при положительной полярности, чем при отрицательной. Однако исследования, проведенные в Институте постоянного тока, показали, что это представление верно только для сравнительно коротких гирлянд. С увеличением длины гирлянды (без защитной арматуры) ее вольтсекундные характеристики для положительной и отрицательной полярностей сначала сближаются, а затем при длине порядка 4 м и выше положительная характеристика поднимается заметно выше отрицательной.

Это можно объяснить тем, что при положительной полярности в тех случаях, когда для перекрытия гирлянд необходимо высокое напряжение, на проводе и ближайшем к нему конце гирлянды развивается сильно выраженный стримерный процесс, образующий значительную область положительного объемного заряда. Этот объемный заряд, как бы имитируя собой защитную арматуру, в значительной степени выравнивает распределение напряжения по гирлянде. При отрицательной полярности этого явления практически не наблюдается, так как область объемных зарядов значительно меньше по размерам и содержит заряды обоих знаков, действие которых во внешнем поле нейтрализуется.

Влияние защитной арматуры на выравнивание напряжения при положительной полярности скажется слабее по сравнению с влиянием объемных зарядов и, следовательно, существенно не отразится на величине разрядного напряжения. При отрицательной полярности, напротив, защитная арматура заметно улучшит распределение напряжения по гирлянде и этим повысит разрядное напряжение.

Таким образом, ориентировочно можно считать, что существенный эффект от применения защитной арматуры может быть получен лишь в том случае, если разрядное напряжение гирлянды при отрицательной полярности заметно ниже, чем при положительной. Действительно, как показали опыты, при отрицательной полярности 50-процентные разрядные напряжения гирлянд из 22 элементов с защитной арматурой повышаются на 60 ... 70% (с 1 500 до 2 500 кв), а при положительной — незначительно (с 2 000 до 2 200 кв). Следовательно, защитный уровень линии, определяемый для гирлянды без защитной арматуры

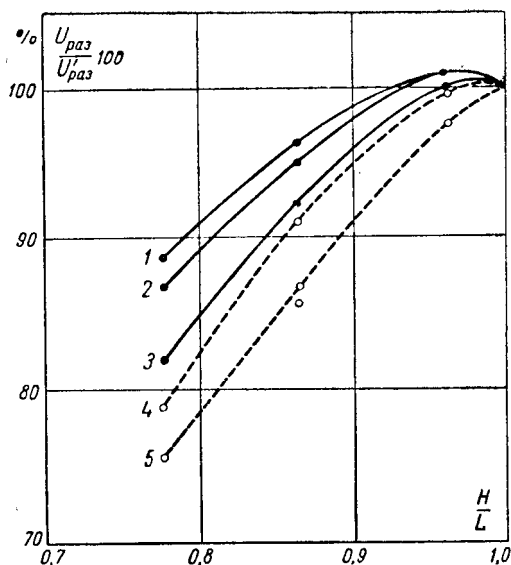


Рис. 6. Изменение сухоразрядного напряжения поддерживающей гирлянды из 12 изоляторов ПЦ-7.

$U_{раз}$ — сухоразрядное напряжение при наличии арматуры; $U_{раз}$ — то же, без арматуры; L — длина гирлянды; H — расстояние между арматурами в свету. Арматура выполнена в виде овала следующих размеров: 1 — 1 600×1 100 мм; 2 — 2 000×1 500 мм; 3 — 1 000×1 500 мм; 4 — 2 000×1 500 мм; 5 — 1 300×800 мм. 1, 2 и 3 кривые относятся к двойной гирлянде, 4 и 5 — к одиночной.

отрицательной, а с арматурой — положительной характеристикой, повышается с 1 500 до 2 200 кв, т. е. примерно на 50%.

У более коротких гирлянд, разрядное напряжение которых при отсутствии защитной арматуры оказывается более высоким при отрицательной полярности, результирующее влияние защитной арматуры на величину расчетного разрядного напряжения практически не сказывается. Так, 50-процентное разрядное напряжение гирлянды из 14 элементов ПЦ-7 после установки защитной арматуры при отрицательной полярности повысилось с 1 370 до 1 500 кв, а при положительной понизилось с 1 470 до 1 350 кв. Следовательно, минимальное разрядное напряжение осталось неизменным, причем при отсутствии защитной арматуры оно определялось отрицательной полярностью, а при ее наличии — положительной.

Таким образом, применение защитной арматуры оказывает существенное влияние на величину импульсного разрядного напряжения только при относительно длинных гирляндах, соответствующих номинальному напряжению линии 400 кв. При сравнительно коротких гирляндах, в частности гирляндах, применяемых на линиях 220 кв, защитная арматура не оказывает существенного влияния на величину разрядного напряжения при импульсах.

Распределение напряжения по элементам гирлянды. Как известно, имеет место резко неравномерное распределение напряжения по элементам гирлянды изоляторов. Наибольшее напряжение приходится на ближайшие к проводу элементы. Доля приложенного к гирлянде напряжения, приходящаяся на первый от провода изолятор, мало зависит от длины гирлянды и для гирлянд с це-

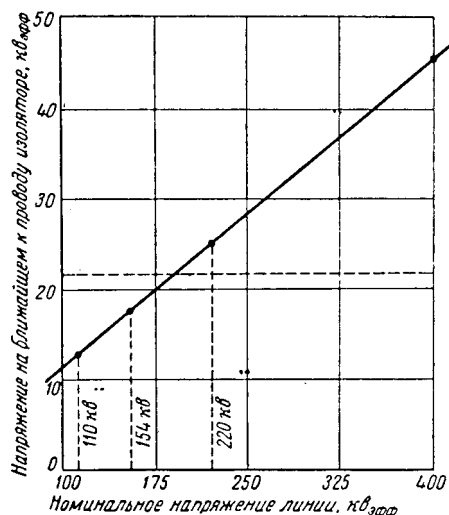


Рис. 7. Определение рабочих напряжений линий электропередачи, при которых требуется применение защитной арматуры для предотвращения коронирования стержней изоляторов.

ментной заделкой стержней и числом элементов 10...25, как правило, колеблется в пределах 18...20%. Допустимым на единичный изолятор следует считать такое напряжение, при котором поверхность стержня еще не коронирует.

Коронирование поверхности стержня изолятора в рабочем режиме следует считать недопустимым, так как образующиеся при этом окислы азота приводят к образованию на поверхности металла пленок азотной кислоты и разрушению оцинковки, а в дальнейшем и стальной части стержня. Случаи такого разрушения арматуры наблюдались в эксплуатационной практике.

Таким образом, в тех случаях, когда распределение напряжения по гирлянде без защитной арматуры приводит к появлению на стержне изолятора градиентов, превышающих коронные, должны быть приняты меры к разгрузке отдельных изоляторов путем улучшения распределения напряжения по гирлянде. Это обстоятельство является основным при решении вопроса о применении защитной арматуры.

Поскольку доля напряжения, приходящаяся на первый изолятор, мало зависит от длины гирлянды, можно в первом приближении считать, что напряжение на первом изоляторе находится в линейной зависимости от рабочего напряжения линии. Такая зависимость для поддерживающей гирлянды приведена на рис. 7. Горизонтальной пунктирной линией показана полученная экспериментально величина напряжения, при которой на поверхности стержней изоляторов П-4,5 и ПЦ-7 начинается видимая корона. Как видно из рис. 7, на линиях 110 и 154 кВ защитной арматуры не требуется. На линиях 220 кВ желательно применение защитной арматуры на поддерживающих гирляндах. Натяжные гирлянды линий 220 кВ имеют более благоприятное распределение на-

пряжения и опасность коронирования стержней изоляторов этих гирлянд исключается.

Следует отметить, что корона во внутренней полости изолятора первоначально возникает не на стержне, а на границе цементной заделки, соприкасающейся с фарфором, благодаря чему место возникновения короны отдалается от стержня. Поэтому расчетное коронное напряжение выбрано с некоторым запасом.

Исследования, проведенные в Институте постоянного тока, показали, что защитная арматура из металла специальных профилей (корытное железо, овалы, трубы больших диаметров и т. п.) не дает никаких преимуществ. В связи с этим для линий электропередачи 400 кВ Куйбышевская ГЭС — Москва была разработана защитная арматура в виде овала размером 1200×800 мм, сделанного из обычного полосового железа размером 50×4 мм.

Выводы. 1. Применения защитной арматуры как на поддерживающих, так и на натяжных гирляндах линий электропередачи 35, 110 и 154 кВ не требуется. Нет необходимости применять ее и на натяжных гирляндах линий 220 кВ. Что же касается поддерживающих гирлянд линий 220 кВ, то для полного исключения вероятности возникновения короны на стержнях изоляторов применение защитной арматуры на этих гирляндах желательно. Однако, учитывая весьма слабую интенсивность короны на стержнях изоляторов линий 220 кВ, отказ от применения защитной арматуры и в этом случае, повидимому, не окажет какого-либо влияния на надежность работы и срок службы изоляторов¹.

2. Безусловно необходима защитная арматура на гирляндах линий напряжением выше 220 кВ. В частности, на линиях 400 кВ защитная арматура обеспечивает снижение напряжения на ближайших к проводу изоляторах с 47 до 19 кВ и существенно повышает разрядное напряжение при импульсах, что позволяет сократить необходимое число изоляторов в гирлянде с 24 до 20, т. е. до числа, определяемого уровнями внутренних перенапряжений.

Литература

1. А. В. Калантаров и П. Л. Краснов. Исследование каскадирования разряда. Электричество, № 2, 1939.
2. А. Б. Громбчевский и Е. В. Калинин. Защитные арматуры изоляторов при мощных дугах, Электрические станции, № 1, 1937.
3. Б. И. Егудин. Испытание защитных колец для линий 220 кВ. Электрические станции, № 10, 1936.
4. А. В. Калантаров. Влияние ожога на электрические характеристики изоляторов. Электрические станции № 1, 1937.
5. П. А. Юриков. Повреждение изоляции линий 220 кВ при грозовых перекрытиях. Электрические станции, № 9, 1951.

[11.7.1955]

¹ Опыт эксплуатации линий электропередачи 220 кВ в ряде энергосистем подтверждает, что нет необходимости применять защитную арматуру и на поддерживающих гирляндах линий 220 кВ (прим. редакции).



Новая схема электропривода эскалаторов московского метрополитена

Кандидат техн. наук, доц. Г. П. ХАЛИЗЕВ

Всесоюзный заочный политехнический институт

В настоящее время все действующие предприятия Советского Союза с установленной мощностью от 100 kva и выше обязаны разработать и реализовать мероприятия по повышению $\cos \varphi$ своих установок до величины 0,92.

Около половины установленной мощности асинхронных двигателей, присоединенных к шинам понизительных подстанций метрополитена, приходится на двигатели эскалаторов, работающих с весьма низким $\cos \varphi$.

Мощность двигателя эскалатора выбирается, исходя из наиболее тяжелого пуска эскалатора на подъем. Однако, как показали испытания, проведенные Московским институтом инженеров городского строительства совместно с метрополитеном, в течение дня двигатели эскалаторов работают с очень большими недогрузками. Так, при работе на подъем нагрузка двигателя колеблется в пределах от 15 до 60% номинальной, повышаясь иногда до номинальной лишь в часы утреннего и вечернего пиков. При работе же на спуск нагрузка двигателя эскалатора еще меньше и колеблется в пределах от +15% до -35% номинальной. Здесь следует отметить, что при работе на спуск с нагрузкой двигатель эскалатора работает в генераторном режиме, обусловленном весом опускаемых пассажиров.

Эти специфические условия работы эскалаторов и являются причиной низкого $\cos \varphi$ приводных двигателей, который в среднем при работе двигателей на подъем равен всего 0,47, а при работе на спуск 0,24.

С целью уменьшения мощности компенсирующих устройств Электротехническим отделом Метрогипротранса совместно с автором была разработана схема, предусматривающая переключение обмотки статора с треугольника на звезду при напряжении сети 380 в . При значительных нагрузках двигатель работает с обмоткой, соединенной в треугольник; при малых нагрузках обмотка статора автоматически переключается на звезду.

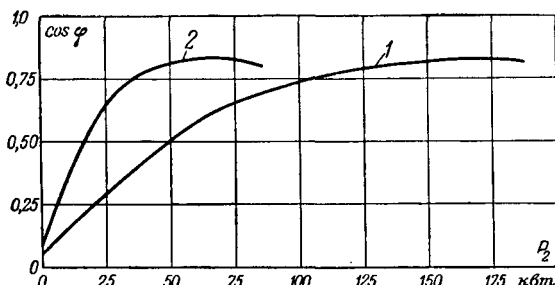


Рис. 1. Экспериментальные кривые зависимости $\cos \varphi$ двигателя АМЭМ-137-10 от мощности на валу P_2 .
1 — при соединении обмотки статора в треугольник;
2 — при соединении обмотки статора в звезду.

На рис. 1 приведены экспериментальные кривые зависимости $\cos \varphi$ асинхронного двигателя АМЭМ-137-10 150 kвт , 380 в , $\eta = 0,93$ от мощности на валу при соединении обмотки статора в треугольник и звезду. Кривые сняты при напряжении сети 380 в и хорошо согласуются с теоретическими.

На рис. 2 для этого же двигателя приведены экспериментальные кривые зависимости токов статора от мощности на валу.

На рис. 3 приведена принципиальная схема узла переключения статора с треугольника на звезду. В процессе пуска на подъем независимо от величины нагрузки статор должен быть включен в треугольник (включен контактор $1K$). Это требование обеспечивается тем, что катушка $1K$ питается через нормально закрытый контакт $3Y$. Таким образом, после включения двигателя на подъем (замкнуты контакты B) обмотка его статора соединена в треугольник до окончания процесса пуска. После этого схема включения статора будет определяться нагрузкой двигателя и работой реле $2P$ и $1P$.

Допустим, что нагрузка значительна и реле $1P$ включено. В этом случае остается включенным контактор $1K$, так как возбуждено реле РПП.

Если после окончания пуска эскалатора нагрузка невелика, реле $1P$ не возбуждено, и обмотка статора двигателя переключится на звезду. При переключении с треугольника на звезду возникает кратковременный бросок тока, который может вызвать срабатывание $2P$ и повторное включение $1K$. Для избежания этого последова-

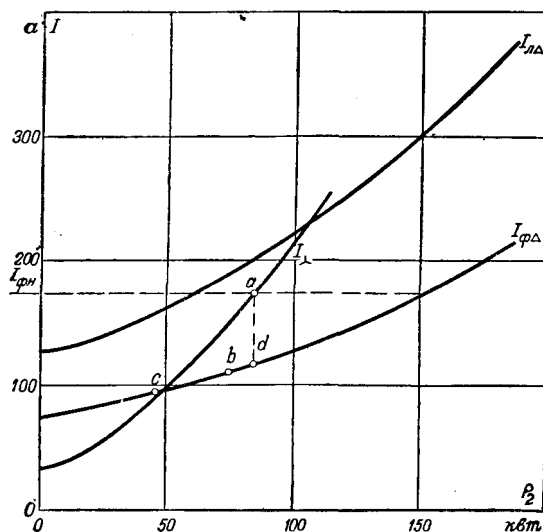


Рис. 2. Экспериментальные кривые зависимости токов статора двигателя АМЭМ-137-10 от мощности на валу.
 I_{Δ} , $I_{\phi\Delta}$ — линейный и фазный ток при соединении обмотки статора в треугольник; I_{Δ} — ток при соединении обмотки статора в звезду.

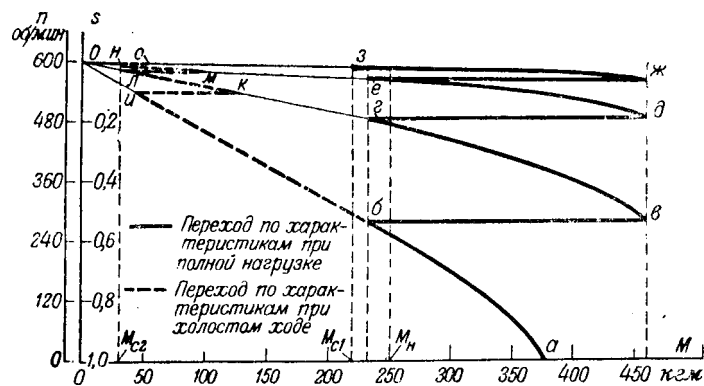


Рис. 4. Механические характеристики двигателя при пуске эскалатора на подъем.

M_{c1} — статический момент при полной нагрузке; M_{c2} — статический момент при холостом ходе; M_n — номинальный момент двигателя.

ствует ускорению системы. Здесь следует отметить, что уже на первой пусковой ступени двигатель достигает сверхсинхронной скорости, а переход его на третью ступень и естественную характеристику сопровождается уменьшением скорости. Это теоретическое положение подтверждается экспериментально.

Величины ускорения при работе по новой схеме не превышают $0,528 \text{ м/сек}^2$ и лежат в пределах допустимых.

Как показал расчет, средневзвешенный $\cos \varphi$ при работе по новой схеме двигателей двух эскалаторных лент, одна из которых работает на

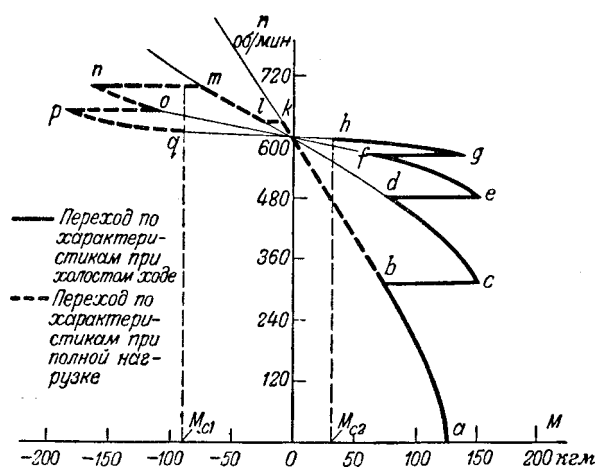


Рис. 5. Механические характеристики двигателя при пуске эскалатора на спуск.

M_{c1} — статический момент при полной нагрузке; M_{c2} — статический момент при холостом ходе.

подъем, а вторая на спуск, составляет 0,71 против 0,36 при старой схеме. Это дает существенное уменьшение реактивной мощности и значительно уменьшает мощность компенсирующих устройств. Кроме того, при работе по новой схеме уменьшается потребление и активной мощности вследствие улучшения к. п. д. двигателя при работе его с малыми нагрузками при пониженном напряжении.

[21. 12. 1955]

По страницам технических журналов

ЗАРУБЕЖНОЕ СИЛОВОЕ КОНДЕНСАТОРОСТРОЕНИЕ



Рис. 1. Рост общей мощности Q , установленных в США, за период с 1928 по 1954 г.

Применение силовых бумажных конденсаторов достигло наибольших масштабов в США, особенно в годы второй мировой войны и в послевоенный период. Промышленное производство силовых конденсаторов в этой стране начало развиваться в 20-х годах нашего столетия; к 1928 г. общая установленная мощность конденсаторов составляла 260 тыс. квар; к началу второй мировой войны она достигла значения порядка 1,5 млн. квар, а по данным 1954 г. составляла уже 30 млн. квар. Только в 1953 г. конденсаторных батарей было установлено на общую мощность 3 млн. квар. Характер нарастания установленной мощности силовых конденсаторов в США за период времени с 1928 по 1954 г. показан на рис. 1 [Л. 1, 2, 10]. Параллельно с расширением производства силовых конденсаторов улучшалось их качество и повышалась надежность в работе. Значение

удельного объема и веса американских силовых конденсаторов, начиная с 1924 г., показаны в табл. 1 [Л. 3, 10].

Данные табл. 1 показывают, что за 30 лет удельные показатели силовых конденсаторов были улучшены в 10 раз. Для американской практики изготовления силовых конденсаторов типичным являлось применение небольших значений реактивной мощности в единице. Только в последнее время появились конденсаторы мощностью 25 квар; ранее американские фирмы выпускали конденсаторы мощностью не выше 10...15 квар в единице.

Первым типом американского силового конденсатора являлся бумажно-масляный конденсатор. Этот тип приме-

Таблица 1

Удельные характеристики американских силовых конденсаторов

Год выпуска	Мощность в единице, квар	Удельный вес, кг/квар	Удельный объем, дм ³ /квар
1924	2	15	9,5
1926	5	6	3,7
1930	10	2,8	1,8
1935	10	1,9	1,05
1944	10	1,9	1,05
1954	15	1,5	0,66
1954	25	1,5	0,6

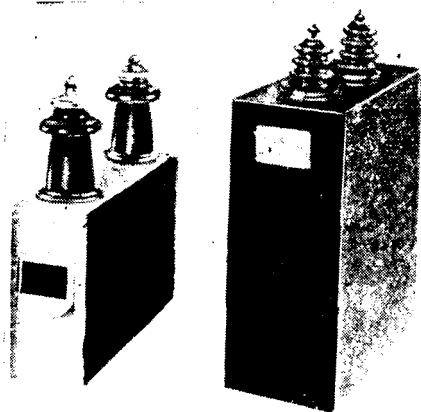


Рис. 2. Сравнение размеров американских силовых конденсаторов.

Справа — пропитанный маслом, слева — пропитанный хлордифенилом; в обоих случаях мощность равна 10 квар.

нялся в США до конца 30-х годов, но, повидимому, был признан недостаточно надежным. В целях повышения надежности силового конденсатора одна из фирм в 1931 г. начала выпускать бумажные конденсаторы, в которых пропитка маслом была заменена наполнением конденсатора после его сушки сжатым азотом [Л. 4]. Такие конденсаторы изготовлялись на рабочее напряжение 2,3 и 4,6 кв с реактивной мощностью в единице от 20 до 120 квар. Для заполнения конденсаторов применялся азот при давлении 15 ат, что заставляло использовать тяжелую конструкцию корпуса; диэлектрическая проницаемость бумаги при отсутствии жидкой пропитки была заметно сниженной. Это приводило к недостаточно удовлетворительным удельным характеристикам конденсаторов, наполненных азотом; удельный вес составлял 3,6...5 кг/квар, а удельный объем лежал в пределах 3...4 дм³/квар. Можно также полагать, что такие конденсаторы имели пониженную импульсную прочность. Потери в конденсаторах этого типа были ниже, чем у бумажных, и составляли менее 0,25%.

Выпуск бумажных тазонаполненных конденсаторов продолжался в течение нескольких лет, но затем был прекращен, так как эти конденсаторы уступали бумажным конденсаторам, пропитанным полярной хлорированной массой. В производстве силовых конденсаторов в США ее начали применять в конце 30-х годов, причем под различными фирменными названиями: «пиранол» у фирмы Джернерал Электрик, «инертин» фирмы Вестингауз, «ароклор» фирмы Белл и т. д. Во всех случаях состав массы был один и тот же — пятихлористый дифенил (у нас эта пропиточная масса известна под названием «свовол»).

Одно из первых сообщений фирмы Вестингауз о характеристиках конденсаторов, пропитанных пятихло-

ристым дифенилом, появилось уже в 1936 г. [Л. 5]. Основным преимуществом этой пропиточной массы по сравнению с маслом явилась повышенная диэлектрическая проницаемость, позволявшая повысить емкость конденсаторов более чем на 50%. Снижение удельного объема и веса конденсаторов в период 1930—1935 гг. (табл. 1) следует объяснить именно внедрением в производство хлорированной пропиточной массы этого типа. Другими преимуществами пятихлористого дифенила явились: негорючесть, взрывобезопасность и повышенная стойкость к окислению; позже было также показано, что эта пропиточная масса имеет по сравнению с нефтяным маслом резко улучшенную устойчивость к старению в электрическом поле (устойчивость к ионизации), а потому допускает некоторое повышение рабочей напряженности поля в бумажном диэлектрике и резко увеличивает надежность конденсаторов в условиях эксплуатации [Л. 6]. Сравнение размеров американских силовых конденсаторов равной реактивной мощности при пропитке маслом и при пропитке пятихлористым дифенилом дано на рис. 2 [Л. 1].

Статистические исследования результатов наблюдения за поведением конденсаторов с данным типом пропитки показали, что надежность конденсаторов не уступает надежности любого другого типа высоковольтного оборудования; одна из фирм давала гарантию в том, что преждевременные пробои в условиях эксплуатации могут иметь место не более чем у 0,2% от всего числа установленных конденсаторов.

Особенностью конденсаторов, пропитанных пятихлористым дифенилом, является снижение их емкости на морозе, обусловленное отвердеванием пропиточной массы и связанным с этим снижением диэлектрической проницаемости (рис. 3). Ранее это считалось не опасным, так как было показано, что благодаря повышенным потерям в замороженном конденсаторе он после включения под переменное рабочее напряжение саморазогревается и относительно быстро повышает свою емкость до нормального значения (рис. 4). Однако впоследствии было установлено, что в ряде случаев при включении под напряжение замороженных конденсаторов наблюдались их пробои. В частности, и у нас на Урале был зарегистрирован массовый пробой американских конденсаторов в зимнее время. Позже было показано, что это связано с резким снижением ионизирующего напряжения конденсаторов при замерзании пятихлористого дифенила [Л. 6]. В 1954 г. фирма Элемекс сообщила, что достаточно быстрый саморазогрев обычных силовых конденсаторов, исключающий возможность их пробои при включении, имеет место только при температурах не ниже —18°С; при более низких температурах и выдержке на морозе перед включением порядка нескольких часов пробой при включении весьма вероятен. Поэтому в рекламе фирмы указывается, что для пропитки конденсаторов начато применение синтетической низкотемпературной жидкости, допускающей безопасное применение конденсаторов до температуры —40°С. Можно полагать, что новая пропиточная масса представляет собой пятихлористый дифенил, разбавленный полихлорэтилбензолом [Л. 7]. Сравнение температурной зависимости электриче-

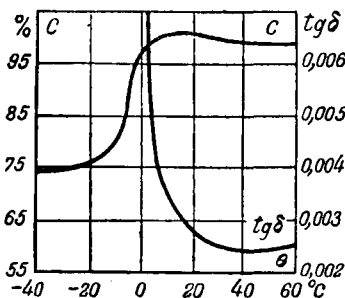


Рис. 3. Зависимость емкости и угла потерь бумажного конденсатора, пропитанного хлордифенилом, от температуры.

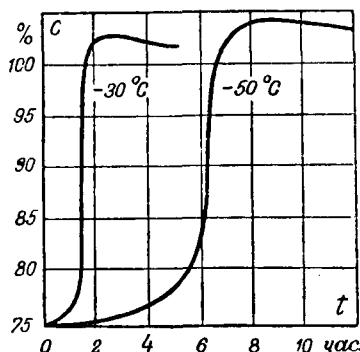


Рис. 4. Возрастание емкости со временем за счет саморазогрева для конденсаторов, замороженных при —30° и —50°С.

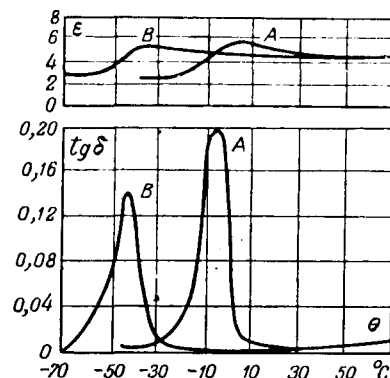


Рис. 5. Зависимость диэлектрической проницаемости и угла потерь от температуры (при частоте 60 гц) для обычного (А) и для специального (В) хлордифенилов.

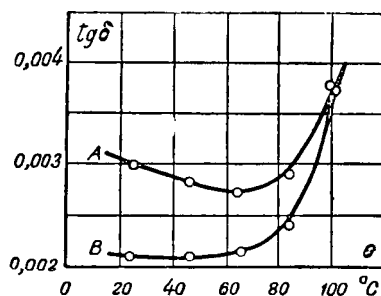


Рис. 6. Зависимость угла потерь от температуры (60 гц) для конденсаторов, пропитанных хлордифенилом.

А — обычная бумага; В — новый сорт бумаги с пониженными потерями.

ских характеристик этой массы и обычного хлордифенила дано на рис. 5.

Последним американским достижением в области силового конденсаторостроения, о котором сообщалось в печати, явилось внедрение в производство нового сорта конденсаторной бумаги с пониженным углом потерь [Л. 8] (рис. 6). Уменьшение потерь в диэлектрике улучшило тепловой баланс в конденсаторе и позволило перейти на повышенное значение мощности в единице, равное 25 квар (табл. 1).

Таблица 2

Некоторые данные о конструкции силовых конденсаторов в США

Рабочее напряжение, в	Рабочая напряженность, кв/мм	Толщина диэлектрика, мм	Мощность в единице, квар
230	8,7	3×9	7,5
460	12	3×12,5	15
2 400	13,5	7×12,5	15

В табл. 2 приведены данные 1949 г. [Л. 1] о толщине диэлектрика и рабочей напряженности в американских силовых конденсаторах при трех значениях рабочего напряжения. Повидимому, эти данные несколько устарели. По данным 1954 г. [Л. 9] указывается, что реактивная мощность конденсатора на 230 в повышена с 7,5 до 15 квар при увеличении объема всего лишь на 20%. Это свидетельствует о повышении рабочей напряженности в этом конденсаторе, очевидно, за счет применения увеличенного числа слоев более тонкой бумаги. В одном из последних обзоров [Л. 10] имеется указание, что секции силовых конденсаторов в США изготавливаются с четырьмя—шести слоями бумаги между обкладками. В высоковольтных конденсаторах напряжение на секцию принимается равным 800...1 200 в.

До 1937 г. силовые конденсаторы в США выпускались только для установки в закрытых помещениях; позже появились специальные конструкции конденсаторов, рассчитанные на установку на открытом воздухе. Обычно конденсаторы поставляются теперь в виде готовых блоков, содержащих по 10...24 единицы (общей мощностью 250...600 квар), смонтированные в шкафах и снабженные всей необходимой включающей и защитной аппаратурой.

До 1946 г. обычными в практике США являлись конденсаторные батареи небольшой мощности, порядка 45...180 квар, включаемые на напряжения до 15 кв. Далее мощность таких батарей возросла до нескольких тысяч киловольтампер и началось применение конденсаторных батарей и при более высоких напряжениях 25...115 кв. Теперь в США имеется более 100 таких установок с мощностью батарей до 20 тыс. квар и выше. Часто применяется многоступенчатая автоматизированная регулировка мощности конденсаторных батарей.

Наряду с применением больших батарей сохранилось и применение отдельных конденсаторов, главным образом в воздушных распределительных сетях низкого напряжения; такие конденсаторы обычно монтируются прямо на столбах. В последнее время начато применение конденсаторов также и в кабельных сетях, причем в этом случае конденсаторы устанавливаются в подземных колодцах. При этом приходится учитывать возможность повышения температуры окружающей среды по сравнению с обыч-

ными условиями установки конденсаторов на столбах и снижать реактивную мощность в единице с 15 до 13,3 квар. В конденсаторах этого типа особое внимание уделяется защите корпуса от коррозии. Для этой цели применяют защитное цинковое покрытие толщиной 0,02 мм.

Подробных литературных данных о масштабе выпуска силовых конденсаторов в капиталистических странах Западной Европы не имеется, но некоторые сведения по этому вопросу можно найти в фирменных каталогах. Фирма Альстом (Франция) за 20 лет (1934—1954 гг.) выпустила конденсаторы общей мощностью более 600 тыс. квар, фирма Савуазьен (1932—1952 гг.) — 450 тыс. квар. Английская фирма Каллендер за 37 лет изготовила конденсаторов на реактивную мощность 1 250 тыс. квар, другая английская фирма — Дюбилле — за 25 лет выпустила конденсаторы с общей мощностью «много сотен тысяч квар». Шведская фирма Сивертс с 1926 г. изготовила конденсаторы суммарной мощностью более 500 тыс. квар. Судя по этим данным, можно полагать, что за последние 20...30 лет общее значение мощности конденсаторов, изготовленных западноевропейскими фирмами (Англия, Франция, Германия, Швеция, Швейцария, Бельгия, Италия, Голландия), могло достигнуть величины порядка 10 млн. квар. Вероятно, большая часть этих конденсаторов была установлена в Европе, но часть из них экспортировалась и в страны Азии, Африки, а возможно и Южной Америки. Очевидно, что конденсаторное производство в западноевропейских странах по своим масштабам уступает США, но все же достигло достаточно высокой степени развития.

В довоенный период для западноевропейского конденсаторостроения являлось характерным изготовление силовых конденсаторов с большой реактивной мощностью в единице, порядка сотен киловольтампер. Швейцарская фирма Гефели изготовила конденсатор мощностью 1 000 квар, который рекламировался, как наиболее мощный в мире. Для пропитки применялось только нефтяное масло, хотя перед войной хлордифенил уже начал изготовляться некоторыми европейскими химическими фирмами («клофен» фирмы ИГ Фарбен Индустри в Германии, «пермитол» — в Англии). Внедрению хлордифенила в европейское конденсаторостроение препятствовали его сильно повышенная в то время стоимость и, вероятно, отсутствие опыта по пропитке конденсаторов этим жидким диэлектриком.

В отличие от практики США многие европейские фирмы применяли не плоскопрессованные, а цилиндрические секции, намотанные на изоляционные втулки или трубки. Обычно такие секции монтировались на рамах, помещаемых затем в большой прямоугольный бак, иногда с ребристыми стенками, для улучшения охлаждения (фирмы Гефели, Гидра и др.). При большой мощности бак часто снабжался консерватором, как в мощных силовых трансформаторах. Иногда применялась сборка секций в корпусах, имеющих вид металлической трубы, в которой секции располагались вертикально, одна над другой (фирма Сивертс).

На первый взгляд повышение мощности в единице весьма желательно, так как упрощает монтаж батарей большой мощности и их обслуживание; заманчива также получаемая при этом экономия на стоимости выводных изоляторов. Однако увеличение размеров единичного конденсатора ухудшает его тепловой баланс и уменьшает поэтому надежность в работе. При большом числе параллельно соединенных секций увеличивается суммарная площадь обкладок, что также снижает надежность, повышая вероятность пробоя.

Применение цилиндрических секций привлекательно с точки зрения уменьшения числа складок и морщин в бумаге, неизбежно присутствующих в плоскопрессованных секциях и являющихся слабыми местами диэлектрика. Однако такая форма секций вызывает значительное повышение удельного объема конденсатора и затрудняет осуществление хорошего теплового контакта секций со стенками корпуса. Кроме того, при отсутствии сжатия секций толщина масляной прокладки увеличивается, емкость ее уменьшается по отношению к емкости листов пропитанной бумаги, а потому увеличивается доля напряжения, приходящегося на масляную прослойку. Это должно способствовать развитию ионизационных процессов в масляных прослойках цилиндрических секций, что особенно опасно в конденсаторах переменного напряжения.

Практика эксплуатации показала недостаточную надежность старого типа силового конденсатора, выпускавшегося западноевропейскими фирмами. В частности, в германской литературе появился ряд сообщений об авариях с силовыми конденсаторами [Л. 11]. Это обстоятельство заставило многие фирмы еще в конце довоенного периода применить ряд мероприятий для улучшения надежности силовых конденсаторов. Большинство фирм отказалось от применения цилиндрических секций и перешло на плоскопрессованные, позволяющие получить малогабаритные конденсаторы с малым объемом свободного масла. Некоторые фирмы пошли на резкое снижение мощности в единице, чтобы улучшить тепловой баланс конденсатора и этим ослабить старение диэлектрика; другие, сохранив большую мощность в единице, начали применять индивидуальную защиту каждой секции плавким предохранителем. Голландская фирма Филипс разработала конструкцию конденсатора в стальном цилиндрическом корпусе, в котором после пропитки маслом свободное пространство над зеркалом масла заполнялось сжатым азотом при давлении 15 ат [Л. 12]. Этим способом повышалось ионизирующее напряжение и, следовательно, надежность конденсатора в эксплуатации. Конденсаторы такого типа выпускались с мощностью в единице от 5 до 100 *квар* с номинальным напряжением от 3 до 17 *кв* (2,3 *кв/квар*, 1,05 *дм³/квар*). Эта конструкция подверглась критике со стороны шведских фирм, указывавших, что в случае аварии подобный конденсатор будет вести себя как мощная зажигательная бомба. Практика шведского конденсаторостроения показала целесообразность изготовления силовых конденсаторов повышенной надежности, заполненных маслом под давлением. Первые сообщения о таких конденсаторах появились в Швеции в 1939 г. [Л. 13]. Схема устройства первого типа конденсатора с давлением масла показана на рис. 7. В этот период времени конденсаторы выпускались мощностью 40, 60 и 75 *квар* на рабочее напряжение 3400 в; применялась рабочая напряженность выше 10 *кв/мм*; для улучшения отвода тепла были использованы охлаждающие ребра.

Вместе с тем ряд фирм продолжал изготавливать конденсаторы описанной выше устарелой конструкции в течение военного времени и даже в послевоенный период. Так, например, в одном из последних каталогов французской фирмы Савуазьен наряду с модернизированным типом конденсаторов, пропитанных хлордифенилом, указываются и высоковольтные конденсаторы мощностью до 500 *квар* в единице, собранные из цилиндрических секций и пропитанные нефтяным маслом. Такие же конденсаторы приводятся в каталоге английской фирмы Каллендер, выпущенном в 1951 г. Следует отметить, что эта фирма указывает для своих конденсаторов весьма малое значение тангенса угла потерь: не более 0,13%. Поэтому можно думать, что специальным выбором сорта масла и бумаги или режимов технологии ей удалось получить и при устарелой конструкции достаточно удовлетворительную надежность.

Тем не менее для послевоенного периода развития западноевропейского конденсаторостроения в основном является характерным переход на освоение американского опыта производства силовых конденсаторов, а именно: применение плоскопрессованных секций, пропитки хлордифенилом и небольшие значения мощности в единице.

Германские фирмы, повидимому, раньше других, еще в 1940—1941 гг., начали вести опыты по пропитке конденсаторов хлордифенилом («клофеном») и теперь полностью перешли на этот вид пропитки и на плоскопрессованные секции. Некоторые фирмы (например, Гера) подобно аме-

риканским выпускают конденсаторы только небольшой мощности; другие (например, Леппер) выпускают клофеновые конденсаторы мощностью до 100 *квар* в единице.

Примеру германских фирм последовали итальянские, повидимому, пользующиеся клофеном германского производства. Во Франции пентахлордифенил под названием «пирален» начал изготавливаться с 1942 г. и получил применение в конденсаторном производстве прежде всего по причине дефицитности нефтяного масла в этой стране во время войны. Французская фирма Астом выпускает теперь конденсаторы, пропитанные хлордифенилом, подобные по конструкции американским; фирма Савуазьен применяет секции цилиндрической формы с индивидуальной герметизацией каждой секции и с последующей сборкой их в блоки большой мощности на специальных рамах, помещаемых в защитный негерметизированный ящик. Эту конструкцию едва ли можно считать рациональной. Бельгийская фирма АСЕС (Шарлеруа) начала применять пропитку хлордифенилом (под названием «ацехлор») с 1948 г. Конденсаторы выпускаются мощностью до 25 *квар* и по конструкции подобны американским. По сообщению фирмы она переходит также на применение улучшенной бумаги с пониженными потерями, используя американский опыт. Сравнение некоторых показателей качества обычной и улучшенной бумаги, по данным этой фирмы, сделано в табл. 3. Рабочая напряженность в конденсаторах АСЕС составляет 13,2 *кв/мм*.

Таблица 3

Сравнение характеристик двух сортов kraft-бумаги

Характеристика бумаги	Нормальная бумага	Улучшенная бумага
Зольность, %	0,35	0,20
tg δ сухой бумаги при 100° С и частоте 50 гц	0,0022	0,0015
Число проводящих частиц на 1 м ² при толщине 11,5 мкм	75	17

Как отмечалось выше, хлордифенил был известен в Англии еще перед войной под названием «пермиттол», но его применение в промышленном масштабе в производстве силовых конденсаторов в этой стране началось недавно, с 1952 г. [Л. 14]. Ряд английских фирм до сего времени еще продолжает работать с нефтяным маслом, но можно думать, что и в Англии применение хлордифенила для пропитки силовых конденсаторов в ближайшие годы будет расширяться.

В связи с внедрением в производство конденсаторов пентахлордифенила появился интерес к изучению его свойств, и по этому вопросу в западноевропейских журналах был опубликован ряд статей [Л. 14, 15, 16, 17]. Подчеркивалось преимущество хлордифенила перед маслом в отношении лучшего распределения электрического поля в диэлектрике между клетчаткой и пропиточной массой, негорючесть, лучшая химическая стабильность и повышенная на 30...50% электрическая прочность хлордифенила, не говоря уже о его повышенной диэлектрической проницаемости. Вместе с тем указывалось, что конденсаторы, пропитанные хлордифенилом, имеют потери порядка 0,33...0,40%, т. е. повышенные по сравнению с бумажно-масляными.

Необходимо отметить, что, несмотря на использование основных идей американской конструкции силовых конденсаторов, западноевропейские фирмы еще не смогли в большинстве случаев добиться тех же показателей качества в отношении удельных характеристик, которые достигнуты теперь американскими фирмами. Это показывает сравнение, сделанное в табл. 4. Вероятно, это следует объяснять отливом в качестве применяемых материалов или режимов технологий.

В Западной Германии для повышения качества конденсаторов, пропитанных клофеном, было уделено большое внимание улучшению технологического процесса сушки и пропитки; в частности, было показано преимущество применения весьма глубокого вакуума (остаточное давление до 10⁻⁴ мм рт. ст. [Л. 18]). Промышленное изготовление

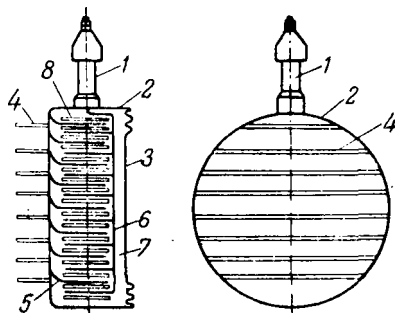


Рис. 7. Схема устройства шведского конденсатора с давлением масла (модель 1940 г.).

1 — выводной изолятор; 2 — корпус; 3 — упругая стенка; 4 — охлаждающие ребра; 5 — система обкладок, соединенная с корпусом, для лучшего теплоотвода; 6 — система обкладок, изолированная от корпуса; 7 — масло; 8 — диэлектрик (бумага, пропитанная маслом).

вакуумных котлов объемов до 10 м^3 для сушки и пропитки конденсаторов при столь высоком вакууме освоено уже в 1951 г. фирмой Лейболд. Указание о применении глубокого вакуума в производстве клофеновых конденсаторов можно найти в каталоге фирмы Леппер.

Исследования германских инженеров подтвердили американские данные о том, что хлордифениловые конденсаторы более устойчивы к ионизации, чем бумажно-масляные [Л. 19]. При использовании глубокого вакуума для клофеновых конденсаторов можно получить $\text{tg } \delta$ того же порядка, что и для бумажно-масляных, до 0,25% и ниже. Рабочая напряженность поля может быть повышена до 14...16 кВ/мм.

Новым путем для изготовления силовых конденсаторов, опробованным в Германии, является применение металлизированной бумаги. Металлобумажные конденсаторы переменного тока (50 Гц) сначала изготавливались лишь для небольших напряжений и малой мощности. Недавно появились сообщения (в частности, фирмы Бош) об изготовлении таких конденсаторов для целей улучшения коэффициента мощности с рабочим напряжением до 1500 В и с мощностью в единице до 50 квар. Мы не располагаем сейчас данными об удельных характеристиках и стоимости этих конденсаторов, но можно полагать, что они имеют ряд существенных преимуществ. Замена алюминиевой фольги толщиной 6...7 мкм на слой цинка толщиной менее 0,1 мкм дает большую экономию металла и снижает вес конденсатора. Можно ожидать повышения рабочей напряженности, особенно при низких напряжениях, а следовательно, и снижения объема конденсаторов. Способность металлобумажных конденсаторов к самовосстановлению после пробоя делает этот тип конденсатора нечувствительным к кратковременным перенапряжениям и, следовательно, повышает надежность в работе. Вероятно, металлобумажные конденсаторы окажутся особенно выгодными при рабочем напряжении 220 В, когда бумажные конденсаторы обычного типа имеют ухудшенные удельные характеристики.

Шведские фирмы (АСЭА, Сивертс) и в послевоенное время сохранили для пропитки силовых конденсаторов нефтяное масло, используя конструкцию конденсатора с повышенным давлением, о которой говорилось выше. Фирма Сивертс продолжает выпускать старую цилиндрическую конструкцию при избыточном давлении масла 1,5 ат [Л. 20]. Фирма АСЭА внедрила новую модернизированную конструкцию прямоугольного типа (рис. 8). Давление масла повышено до 3...4 ат, а номинальная мощность снижена до 20...25 квар [Л. 21, 22].

Шведские конденсаторы современного типа изготавливаются с параллельным включением секций и с применением индивидуальной защиты каждой секции плавким предо-

хранителем. В связи с этим выдвигается возражение против применения хлордифенила, основанное на том, что при перегорании одного из предохранителей при случайном пробое какой-либо секции может происходить разложение хлорированной пропиточной массы. Продукты разложения (хлористый водород) проникают внутрь остальных секций, что приводит к быстрому выходу из строя всего конденсатора. В связи с параллельным включением секций рабочее напряжение конденсатора ограничивается напряжением, допустимым для секции.

В цилиндрической конструкции фирмы Сивертс рабочая напряженность поля составляет 13...14 кВ/мм и номинальное рабочее напряжение секции, а следовательно, и конденсатора равно 1050 В при избыточном давлении 1,5 ат. В более современной прямоугольной конструкции фирмы АСЭА с более высоким давлением и повышенной рабочей напряженностью рабочее напряжение доходит до 2000 В. При больших рабочих напряжениях конденсаторных батарей они собираются из последовательно-параллельно соединяемых единичных конденсаторов.

В Швеции установлен ряд конденсаторных батарей большой мощности как для улучшения коэффициента мощности, так и для продольной компенсации линий электропередач. Так, например, в Хальсберге для улучшения коэффициента мощности работает батарея мощностью 50 тыс. квар при напряжении 11 кВ; в Альфта введена в эксплуатацию установка емкостной продольной компенсации мощностью 30 тыс. квар на линии электропередачи 220 кВ. Надо отметить, что в последнее время фирма Сивертс преодолела свое предубеждение против хлордифенила и начала его применять для пропитки конденсаторов низкого напряжения. Об этом можно судить по тому, что в каталоге этой фирмы, полученном в июне 1955 г., имеется указание о применении для пропитки конденсаторов с рабочим напряжением от 230 до 550 В «негорючего синтетического масла». Для конденсаторов с рабочим напряжением от 3 до 11 кВ сохранилось применение «минерального масла».

Особым путем шло развитие конденсаторостроения в Японии [Л. 23, 24]. В этой стране к 1951 г. было изготовлено конденсаторов для улучшения коэффициента мощности на общую реактивную мощность свыше 4 млн. квар. С 1937 г. началось также применение конденсаторов для последовательного включения в линии электропередач. С 1930 г. в Японии изготавливаются бумажно-масляные конденсаторы, отличающиеся применением бумаги большой толщины, порядка 50...60 мкм, типа кабельной, но, повидимому, с улучшенными свойствами. Секции конденсаторов имеют большие размеры: мощность секции составляет 10...40 квар, в то время как в шведских конденсаторах она равна 2 квар, а в американских еще меньше, вероятно,

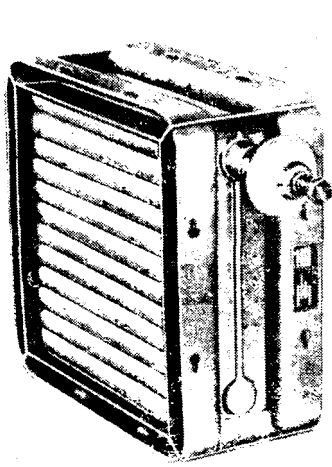


Рис. 8. Шведский конденсатор фирмы АСЭА с давлением масла, модель 1950 г. Боковая стенка снята, чтобы показать расположение секций.

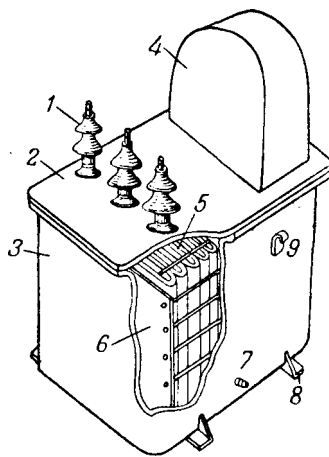


Рис. 9. Японский силовой конденсатор с большой реактивной мощностью.

1 — вводы; 2 — крышка; 3 — корпус; 4 — компенсатор расширения масла; 5 — конденсаторные секции; 6 — стяжная пластина; 7 — зажим для заземления корпуса; 8 — опорные лапки; 9 — скоба для подъема конденсатора

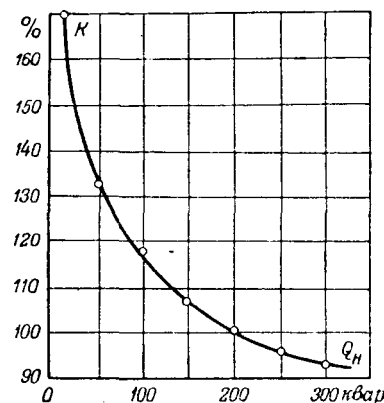


Рис. 10. Зависимость удельной стоимости конденсатора K от номинальной мощности Q_n .

K — стоимость за 1 квар в процентах; за 100% принята стоимость за 1 квар при номинальной мощности конденсатора 200 квар; Q_n — номинальная мощность конденсатора в единице.

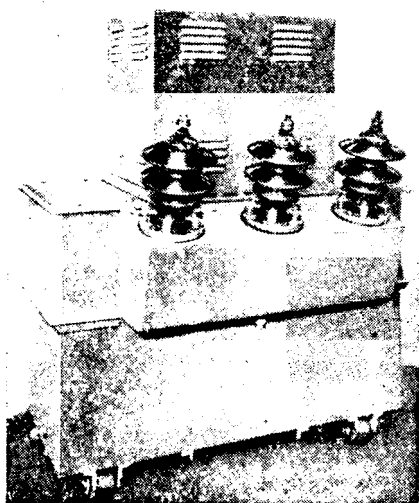


Рис. 11. Силовой бумажно-масляный конденсатор фирмы Стандарт Телефон энд Кэблс; 6,6 кВ, 50 гц, 140 квар.

порядка 1 квар. Рабочее напряжение на секцию берется равным 3 000...5 000 в, т. е. значительно выше, чем в обычных типах силовых конденсаторов. Напряженность поля понижена и составляет 8,5...10 кВ/мм. Конденсаторы изготавливаются с большой реактивной мощностью в единице, от 50 до 500 квар при рабочем напряжении от 3 до 77 кВ.

Внешний вид японского конденсатора показан на рис. 9. Ввиду большого объема масла в баке конденсатора в конструкции предусмотрен специальный компенсатор расширения масла. При рабочем напряжении 22,3 кВ и частоте 60 гц японский конденсатор мощностью 334 квар имеет габаритные размеры 1470 × 615 × 1090 мм, что соответствует удельному объему 37,5 см³/квар; удельный вес такого конденсатора 3,3 кг/квар. Удельные характери-

стики японских конденсаторов заметно хуже характеристик современных конденсаторов, пропитанных хлордифенилом (табл. 4), но японские инженеры считают свою конструкцию экономически выгодной, так как стоимость толстой бумаги резко снижена по сравнению с обычной конденсаторной бумагой малой толщины. Кроме того, высокие значения реактивной мощности в единице дают также экономическое преимущество, так как, по японским данным, повышение мощности с 15 до 300 квар снижает стоимость конденсатора более чем на 40% (рис. 10). В итоге стоимость японского конденсатора ниже, чем американского.

Японцы считают, что существенным преимуществом применяемой ими бумаги повышенной толщины является более быстрая отдача влаги при ее сушке и более высокая термостойкость. В частности, эта бумага мало увеличивает угол потерь и диэлектрическую проницаемость при повышении температуры.

В последнем каталоге английской фирмы Стандарт Телефон энд Кэблс рекламируется серия силовых конденсаторов, весьма напоминающая собой японскую. Конденсаторы этой фирмы изготавливаются мощностью в единице от 50 до 300 квар на рабочее напряжение от 3,3 до 11 кВ, что близко к указанным выше японским данным. По внешнему оформлению (рис. 11), удельным характеристикам и рабочему напряжению они также похожи на японские конденсаторы. Однако в конденсаторах данной фирмы использованы цилиндрические секции, намотанные из тонкой конденсаторной бумаги и свободно расположенные в корпусе для улучшения теплоотвода через масло; это и дает ухудшение удельных характеристик, приближая их к японским.

Необходимо отметить, что американские специалисты весьма критически отнеслись к японским данным, когда доклады японских инженеров были поставлены в США. Выступавшие в прениях по этим докладам американцы доказывали, что в условиях США японская конструкция является неприемлемой не только технически, но и экономически. Представляло бы интерес проверить экономичность такой конструкции в наших условиях, так как у нас различие в стоимости конденсаторной и кабельной бумаги весьма велико. Таким образом, в развитии зарубежного

Таблица 4

Сравнение удельных характеристик силовых конденсаторов, выпускаемых различными зарубежными фирмами

Рабочее напряжение, кВ (50 гц)	Реактивная мощность, квар	Фирма	Вес, кг/квар	Объем, дм³/квар	Пропитка
0,22	15	США	1,8	0,72	Хлордифенил
0,22	5...50	Германия, Леппер	5...6	2,5...3,5	·
0,22	5...10	Франция, Астом	2,8...3,4	2...2,5	·
0,22	10...30	Франция, Савуазьен	2,7...3	4...5	·
0,23	7,5...12,5	Бельгия, АСЕС	2,1...2,2	1...1,1	·
0,23	6,7	Англия, Дюбилль	7,8	6,7	Масло
0,38...0,5	10...100	Германия, Леппер	2,5...3,5	1,3...1,5	Хлордифенил
0,38...0,5	10	Германия, Гера	2	0,925	·
0,38	10...15	Франция Астом	1,9...2,1	1,4...1,5	·
0,38...0,55	12...16	Швеция, Сивертс	2,5...3,3	1,3...1,6	·
0,38...0,55	15...20	Англия, Дюбилль	2,6...3	2,3...2,5	Масло
0,38...0,6	100...250	Англия, Каллендер	—	4,8...5,2	·
0,38...0,55	16...25	Бельгия, АСЕС	1,6...1,8	0,8...0,95	Хлордифенил
0,38...0,55	12...35	Италия, Дукати	3,3...4,2	2,5...3,1	Масло
2,4...8,7	15...25	США	1,5	0,6...0,66	Хлордифенил
3...10	50...100	Германия, Леппер	3,8...4,2	2,1...2,3	·
2,0...8,7	15...20	Франция, Астом	1,8...2,1	0,95...1,1	·
5...50	100...500	Франция, Савуазьен	4,5...5,2	6,5...9	Масло
2,2...6,6	16,7	Англия, Дюбилль	2,64	2	·
3,3...11	50...300	Англия, Стандарт Телефон энд Кэблс	3,5...5	2,7...3,2	·
22,3	334	Япония	3,3	2,9	Масло

силового конденсаторостроения можно наметить четыре основных направления:

1) применение пропитки хлорированной массой и бумаги малой толщины при небольших значениях реактивной мощности в единице;

2) применение пропитки нефтяным маслом и бумаги малой толщины, также при небольших значениях реактивной мощности в единице, но с применением повышенного давления масла для увеличения надежности конденсатора;

3) применение пропитки нефтяным маслом при использовании бумаги большой толщины и при большой реактивной мощности в единице;

4) применение металлизированной бумаги вместо фольги при ограниченной мощности в единице.

По первому пути идут американские фирмы и большинство западноевропейских. Этот путь позволяет освободиться от весьма неприятной нестандартности нефтяного масла, представляющего собой природный продукт, и заменить его синтетической жидкостью с определенным составом и свойствами. При этом улучшаются надежность конденсатора в работе и его удельные характеристики. У нас этот путь в принципе опробован, но широкое внедрение отечественного хлордифенила — совола — в производство силовых конденсаторов требует резкого расширения его выпуска в соответствии с намечающимся расширением изготовления силовых конденсаторов и улучшения его качества. Кроме того, для конденсаторов, устанавливаемых на открытом воздухе, климатические условия в большинстве районов СССР требуют использования не чистого пентахлордифенила, а специальной смеси с пониженной точкой замерзания, которую должна разработать и выпускать наша химическая промышленность.

На тот период, когда производство совола будет ограниченным и в массовом производстве придется сохранить нефтяное масло, для нас представляют интерес второй и третий пути. Применение шведской конструкции фирмы АСЭА позволило бы резко улучшить надежность бумажно-масляных конденсаторов при сохранении удельных характеристик на прежнем уровне, а возможно даже при их некотором улучшении. Этот путь требует применения специальной стали для производства корпусов и повышения общей культуры заготовительных цехов, изготавливающих корпуса. Применение бумаги большой толщины позволило бы повысить надежность за счет снижения рабочей напряженности, что в данном случае допустимо вследствие резкого снижения стоимости бумаги. Удельные характеристики конденсаторов при этом заметно ухудшатся, но стоимость конденсатора, возможно, существенно снизится. Оба эти пути возможны лишь при изготовлении конденсаторов с относительно высоким рабочим напряжением, не ниже 2...3 кв. Для конденсаторов низкого напряжения, потребность в которых сейчас достаточно велика, представляет интерес четвертый путь, т. е. разработка металлобумажных конденсаторов переменного тока большой мощности. Значительный опыт, накопленный радио-промышленностью по изготовлению металлобумажных конденсаторов постоянного тока, позволяет рассчитывать на успешное выполнение такой разработки.

Литература

1. R. Marbury. Power Capacitors, N. Y., 1949.
2. El. Eng., стр. 222, № 5, 1943.
3. R. Marbury. El. Journ., т. 33, стр. 303, № 7, 1936.
4. El. World, 1931, май 30.
5. R. Marbury. El. Journ., т. 33, стр. 107, № 2, 1936.
6. P. Hopkins, T. Walters, M. Scoville. Tr. AIEE, т. 70, стр. 1643, 1951.
7. L. R. Berberich, C. Fields, R. Marbury. Proc. IRE, т. 33, стр. 389, № 6, 1945.
8. H. Millér, R. Hopkins. GER, т. 50, стр. 20, № 12, 1947.
9. H. Brooks. El. Eng., т. 73, стр. 609, № 7, 1954.
10. M. Minder. Bull. ASE, т. 46, стр. 155, № 4, 1955.
11. P. Hochhäussler, ETZ, т. 58, стр. 457, № 18, 1938.
12. El. Rev., т. CXX, стр. 122, № 3102, 1937.
13. B. Hansson. ASEA Journ., т. XVI, стр. 155, № 1, 1939.
14. P. Wilmot. El. Rev., т. 156, стр. 859, № 20, 1955.
15. J. Coquillon. RGE, т. 58, стр. 30, № 1, 1949.

16. J. Coquillon. RGE, т. 63, стр. 401, № 7, 1954.
17. E. Briganti. Alta Frequenza, т. 23, стр. 139, № 7 — 8, 1954.
18. P. Hochhäussler, ETZ, т. 72, стр. 357, № 11, 1951.
19. R. Gutmann. ETZ, т. 75, стр. 45, № 2, 1954.
20. P. Nordall, L. Högfeldt, S. Linderholm. CIGRE, доклад № 340, 1954.
21. B. Hansson, P. Skogly. ASEA Journ, т. 24, стр. 95, № 7, 1951.
22. B. Hansson. El. Eng., т. 11, стр. 112, № 2, 1952.
23. K. Kitagawa, T. Omori. Trans. AIEE, т. 70, ч. II, стр. 1233, 1951.
24. T. Omori, K. Oshima. CIGRE, доклад № 304, 1954.

Доктор техн. наук, проф. В. Т. Ренне

МОЩНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Полупроводниковые выпрямители нашли широкое применение в различных промышленных установках благодаря их высоким эксплуатационным показателям — высокий к. п. д., длительный срок службы, способность работать в достаточно широком диапазоне температур и др.

До последнего времени в мощных выпрямительных установках применялись лишь селеновые выпрямители. Выпрямители из кремния и германия использовались только в маломощных установках в виде диодов. В настоящее время достигнуты значительные успехи как в совершенствовании селеновых выпрямителей, так и в применении кремниевых и германиевых кристаллических выпрямителей для мощных установок. Введены некоторые изменения и в конструкции выпрямителей.

Селеновые выпрямители. За последнее время эксплуатационные качества селеновых выпрямителей были значительно улучшены. Фирма Джeneral Электрик изготавливает следующие три типа выпрямителей [Л. 1]: 1) низкотемпературные вентили (охлаждающая температура не должна превышать 55°С) с обратным напряжением 26 в и сроком службы 60 тыс. час.; 2) высокотемпературные вентили работают при окружающей температуре до 130°С с обратным напряжением 26 в и предполагаемым сроком службы 1000 час.; 3) высокотемпературные вентили (допустимая окружающая температура 110°С) с обратным напряжением 45 в и сроком службы 40 тыс. час. (во всех случаях для обратного напряжения указываются действующие значения).

Высокотемпературные селеновые выпрямители с повышенным обратным напряжением выпускаются также и другими фирмами. Так, например, фирма Виккерс выпускает селеновые выпрямители, работающие при окружающей температуре 125°С. Обратное напряжение составляет 40 в при обратном токе 0,8 ма/см². Срок службы выпрямителя 25 тыс. час. Вследствие незначительных потерь, вызванных обратными токами, нагревание этих вентилях не превышает 5°С. [Л. 2].

Высокотемпературные выпрямители с обратным напряжением 40 в выпускаются также фирмой Богью Электрик Мэнюфкчеринг. По данным фирмы, в трехфазной мостовой схеме при температуре 75°С в течение 5000 час. выпрямленное напряжение снижается не более чем на 5%, при окружающей температуре 150°С в течение 500 час. снижение не превышает 10%. Выпрямитель может длительно работать в диапазоне температур от —65 до +75°С [Л. 3].

Шайбы селеновых выпрямителей изготавливаются фирмами как различных размеров, так и различной формы. Так, например, фирма Синтрон выпускает [Л. 4] четырехугольные шайбы с размерами от 2,5×2,5 см до 30×40 см.

Полученные достижения позволяют расширить области применения вентилях и диапазоны мощностей, в которых еще целесообразно их применять. Так, фирма Интернационал Ректифайер изготавливает селеновые выпрямители мощностью до 250 квт (от 50 ма до 2300 а и от 6 в до 30 кв и выше). Установки с селеновыми выпрямителями фирмы Синтрон имеют мощность до 600 квт [Л. 4].

Для питания низковольтных фабрично-заводских и транспортных установок постоянного тока от трехфазной сети в настоящее время в Германии изготавливаются селеновые выпрямители мощностью до 2500 квт с воздушным и масляным охлаждением [Л. 5].

Введены также изменения в конструкцию селеновых выпрямителей. Фирма Пирамид Электрик монтирует выпрямительные столбы без центрального штыря [Л. 6]. Конструкция такого выпрямителя обеспечивает следующие преимущества: 1) полная воздушная вентиляция между пластинами; 2) меньший вес на единицу мощности; 3) меньшее прямое начальное сопротивление вентиля и др.

Кремниевые выпрямители. Фирмой Вестингауз Электрик разработан выпрямитель, из монокристалла кремния с удельным сопротивлением порядка $1 \dots 5 \text{ ом} \cdot \text{см}$ [Л. 3, 7]. Для создания электронно-дырочного перехода в контакте с кремнием использован алюминий. В этом выпрямителе площадь соединения кремния составляет $0,05 \text{ см}^2$ против $0,00007 \text{ см}^2$ в старых выпрямителях. Для лучшего охлаждения анод и катод, вмонтированные в капсуле, помещаются в медный радиатор, служащий одновременно одним электродом выпрямляющего элемента. Другим электродом служит медный провод, который выводится из верхней части радиатора через металло-стеклянную втулку, герметически изолирующую выпрямитель.

На рис. 1 представлены вольтамперные характеристики этого выпрямителя и выпрямителя с площадью контакта $0,00007 \text{ см}^2$. Из сравнений характеристик следует, что в выпрямителе с площадью $0,05 \text{ см}^2$ обратные токи больше, особенно в области низких обратных напряжений. Однако по абсолютной величине эти токи незначительны — в 4 раза меньше, чем в германиевых выпрямителях сравнимой площади при одном и том же обратном напряжении.

В рассматриваемых кремниевых выпрямителях падение напряжений очень низки. Так, например, при токе нагрузки 10 а (плотность тока 200 а/см^2) падение напряжения составляет не более 1 в . Для мощных выпрямительных установок очень важно иметь такие характеристики, так как большая часть тепла, развиваемого в точке соединения, создается не обратными токами, а прямыми.

Другим важным свойством кремниевых выпрямителей является относительно высокий коэффициент выпрямления. Например, при напряжении 1 в в условиях комнатной температуры коэффициент выпрямления составляет $5,9 \cdot 10^6$.

Температурная зависимость новых кремниевых выпрямителей показана на рис. 2. При низких значениях напряжений обратные токи увеличиваются с увеличением температуры, т. е. коэффициент выпрямления уменьшается. Например, при температуре 200°С отношение прямого тока к обратному уменьшается до 3000. При напряжениях $70 \dots 80 \text{ в}$ кривые для различных температур пересекаются. Таким образом, при более высоких напряжениях с увеличением температуры обратные токи уменьшаются.

Кремниевые выпрямители, разработанные фирмой Транзитрон Электроник, могут работать при температурах от $+150^\circ \text{С}$ до -60°С [Л. 3].

На выпрямленную мощность выпрямителя большое влияние оказывает интенсивность теплоотвода. При естественном охлаждении новый кремниевый выпрямитель может длительно пропускать ток нагрузки $6,5 \text{ а}$ (среднее значение). Для однополупериодных цепей это соответ-

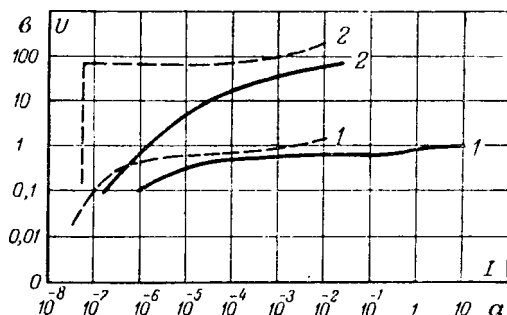


Рис. 1. Вольтамперные характеристики кремниевых выпрямителей с площадью контакта $0,05 \text{ см}^2$ (пунктиром показаны характеристики выпрямителя с площадью контакта $0,00007 \text{ см}^2$).

1 — в прямом направлении; 2 — в обратном направлении.

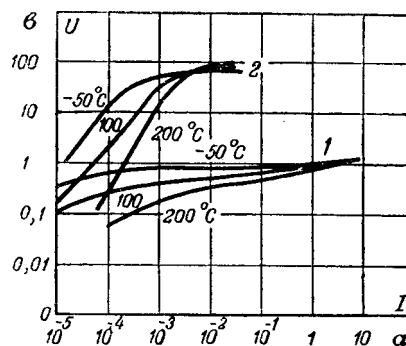


Рис. 2. Вольтамперные характеристики кремниевых выпрямителей с площадью контакта $0,05 \text{ см}^2$ при различных температурах.

1 — в прямом направлении; 2 — в обратном направлении.

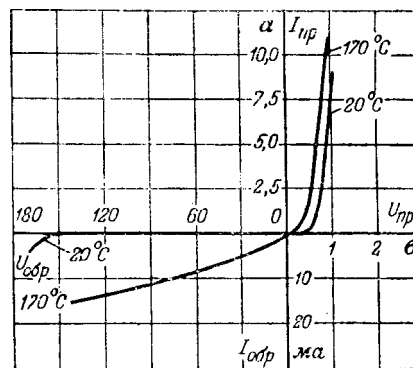


Рис. 3. Вольтамперные характеристики мощного кремниевых выпрямителя.

ствует действующему значению тока $10,2 \text{ а}$. При напряжении 100 в выпрямленная мощность составит:

$$10,2 \cdot \frac{100}{2} = 510 \text{ вт}.$$

При принудительном охлаждении падение напряжения меньше, чем при естественном. В этом случае среднее значение тока нагрузки составляет 15 а , что для однополупериодных цепей соответствует действующему значению тока 24 а (плотность тока 480 а/см^2). При напряжении 100 в выпрямленная мощность будет:

$$24 \cdot \frac{100}{2} = 1200 \text{ вт}.$$

Таким образом, принудительное воздушное охлаждение удваивает выпрямленную мощность. При естественном охлаждении новый кремниевый выпрямитель имеет к. п. д. 98%, а при принудительном 96%.

Исследования, проведенные при пониженных напряжениях, показали, что с уменьшением напряжения выпрямленную мощность выпрямителя можно увеличить. Так, при напряжении 70 в и принудительном охлаждении выпрямленная мощность составляет 1540 вт .

Кремниевые выпрямители, выпускаемые фирмой Рэйсен Мануфэкчеринг, имеют следующие данные [Л. 8]: амплитуда допустимого обратного напряжения 200 в , максимальный выпрямленный ток (среднее значение) 15 а , к. п. д. 95...99%. На рис. 3 приведены вольтамперные характеристики мощного кремниевых выпрямителя этой фирмы при комнатной температуре и при температуре $+170^\circ \text{С}$.

Германиевые выпрямители. В последние годы достигнут значительный прогресс также и в производстве германиевых выпрямителей.

* При подсчете выпрямленной мощности отношение действующего значения подводимого напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения автором [Л. 7] принято равным двум.

Фирмой Бритиш Томсон-Хаустон разработан новый германиевый выпрямитель, характеристики которого по прямому напряжению аналогичны селеновым выпрямителям, а по обратному напряжению превосходят данные кремниевых выпрямителей с площадью контакта $0,05 \text{ см}^2$ [Л. 9]. Вольтамперные характеристики двух типов такого германиевого выпрямителя представлены на рис. 4.

Для иллюстрации выпрямляющих свойств германия достаточно сравнить его по плотности тока с селеном. В схеме трехфазного выпрямителя плотность тока селеновой шайбы составляет 75 ма/см^2 , германий же удовлетворительно работает при плотности тока в 1000 раз большей, т. е. при 75 а/см^2 [Л. 10]. Рассматриваемые германиевые выпрямители сочетают в себе очень низкое прямое сопротивление с высоким обратным сопротивлением. В отличие от селеновых выпрямителей германиевые выпрямители имеют меньшую емкость.

Фирма Джeneral Электрик выпускает в настоящее время 143 типа мощных германиевых выпрямителей, срок службы которых составляет 10 тыс. час. [Л. 11]. На выпрямленную мощность $600 \dots 700 \text{ вт}$ выпрямители этой фирмы выполняются в объеме 380 см^3 .

Фирмой Вестингауз Электрик разработан опытный образец германиевого выпрямителя с водяным охлаждением [Л. 12]. Пластина диаметром $21,9 \text{ мм}$ и толщиной $0,35 \text{ мм}$, выполненная из кристалла германия, пропускает ток 200 а (среднее значение) при обратном напряжении 100 в .

Выпрямители из двуокиси титана. Для использования выпрямителей в условиях изменения окружающей температуры от -65°C до $+200^\circ\text{C}$ институт Бэттел Мемориал занимался исследованиями ряда материалов. Основное внимание при этом было уделено двуокиси титана [Л. 3].

Для создания тонкой плотно прилегающей оксидной пленки титановые диски окисливались в кислороде при температуре $825 \dots 900^\circ\text{C}$. В таком выпрямителе обратный ток появляется при напряжении около 20 в .

На рис. 5 показаны характеристики выпрямителя, изготовленного из двуокиси титана. При изменении температуры от -65°C до $+200^\circ\text{C}$ характеристики выпрямителя изменяются в пределах заштрихованной площади.

Среди рассмотренных типов полупроводниковых выпрямителей селеновые вентили имеют наименьший к. п. д. Несмотря на это, согласно данным заграничных фирм [Л. 5] селеновые силовые выпрямители дешевле неуправляемых ртутных выпрямителей при выпрямленных напряжениях до 460 в . При выпрямленных напряжениях до 250 в селеновые выпрямители выгоднее ртутных как по капитальным затратам, так и по к. п. д.

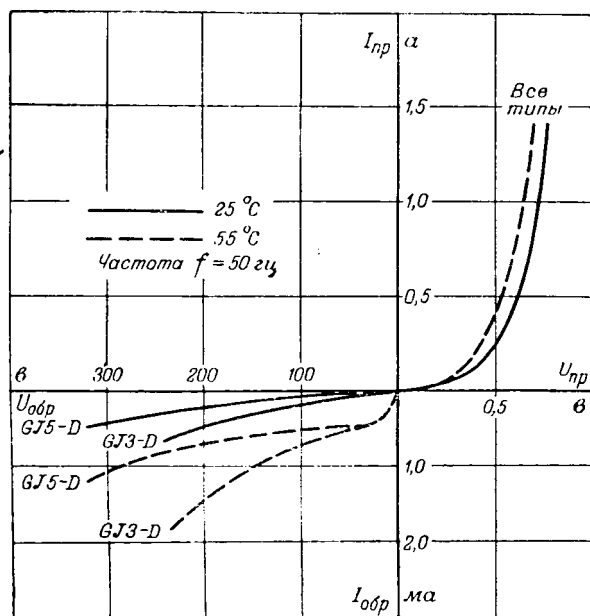


Рис. 4. Вольтамперные характеристики мощных германиевых выпрямителей. Типы выпрямителей GJ3-D и GJ5-D

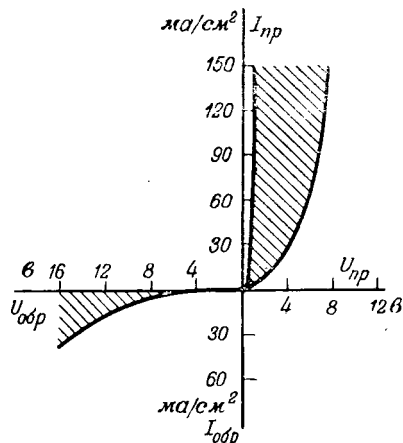


Рис. 5. Вольтамперные характеристики выпрямителя из двуокиси титана.

При помощи кремниевых выпрямителей с площадью контакта $0,05 \text{ см}^2$ и германиевых выпрямителей можно создать мощную выпрямительную установку, к. п. д. которой будет на 10% превышать к. п. д. лучших двигатель-генераторных установок. При этом габариты и вес выпрямительной установки значительно уменьшаются.

В США кремниевые выпрямители нашли применение в авиации и в управляемых снарядах, германиевые — в регулируемых электромашинных приводах, для зарядки батарей и т. д.

Так как полупроводниковые выпрямители имеют высокий к. п. д. (до 99%) и незначительные габариты и вес, способны работать в достаточно широком диапазоне температур, не требуют ухода и имеют длительный срок службы, они могут найти широкое применение в преобладающем большинстве установок, где требуется постоянный ток.

Литература

1. Electronics, т. 28, стр. 104, № 4, 1955.
2. Electronics, т. 27, стр. 274, № 9, 1954.
3. Frank Rockett. Electronics, т. 28, стр. 162, № 3, 1955.
4. El. Eng., т. 74, стр. 61A, № 1, 1955.
5. Siemens-Zeitschrift, стр. 73, № 2, 1954.
6. Electronics, т. 28, стр. 117, № 2, 1955.
7. E. F. Loslo. Electronics, т. 27, стр. 157, № 12, 1954.
8. Electronics, т. 28, стр. 19, № 4, 1955.
9. Proc. IEE, т. 102, ч. B, стр. XI, № 2, 1955.
10. C. E. Hamman. Electronics, т. 27, стр. 110, № 9, 1954.
11. Electronics, т. 27, стр. 107, № 9, 1954.
12. El. Eng., т. 73, стр. 5, № 1, 1954.

Кандидат техн. наук А. Г. Здрок

ВЫБОР ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ НА ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

На международной энергетической конференции 1954 г. в Париже был представлен отчет исследовательской группы «Релейная защита». Конференция этой группы была созвана в Стокгольме в 1953 г., где был заслушан ряд докладов. По докладам состоялись выступления представителей различных зарубежных стран. Определенный интерес представляет доклад К. Дитча (Франция) и дискуссия по нему. В докладе приводятся основные положения по осуществлению устройств, выбирающих поврежденную фазу в линиях электропередачи.

Основные требования, предъявляемые к устройствам, определяющим поврежденную фазу, сводятся к следующему:

- а) правильная работа избирательного органа не должна зависеть от режима работы системы и количества заземленных нулевых точек;
- б) переход одного вида повреждений в другой, а также появление в месте повреждения переходного сопротивления не должны сказываться на работе избирательного органа;

в) время срабатывания избирательного органа не должно увеличивать общее время действия защиты.

В докладе рассматривались избирательные органы, нашедшие широкое распространение в СССР. Выводы, приведенные в докладе о работе различных типов избирательных органов, в основном совпадают с соответствующими положениями, отмеченными в нашей технической литературе. Несколько необычным является решение по выполнению избирательного органа, предложенное представителем Франции — индукционное реле, имеющее три обмотки, включается следующим образом: первая обмотка — на напряжение между фазой и нейтралью U_{AN} , вторая обмотка — между фазой и землей U_{AO} , третья обмотка — на разность этих напряжений $(U_{AN} - U_{AO})$. Вращающий момент на реле $M = k(U_{AN}^2 - U_{AO}^2)$. Каждая фаза оборудуется таким реле, замыкающим контакт в случае замыкания фазы на землю. Реле успешно прошло лабораторные испытания, но еще не апробировано в условиях эксплуатации.

Для выяснения целесообразности применения предложенного избирательного органа рассмотрим его работу в различных режимах. В таблице приведены векторные диаграммы напряжений в месте установки избирательного органа при различных режимах работы линии электроп-

Таким образом, применение рассматриваемого избирательного органа требует установки надлежащей защиты и автоматики, реагирующей на двухфазные короткие замыкания на землю.

3. В неполнофазном режиме избирательные органы могут быть использованы для защиты линии от однофазных повреждений при питании этих органов от трансформаторов напряжения, установленных на линии. Это можно рассматривать как положительное свойство данного предложения.

Итак, целесообразность применения избирательного органа с вращающим моментом $k(U_{AN}^2 - U_{AO}^2)$ должна решаться в каждом конкретном случае с учетом приведенных замечаний.

При обсуждении вопроса о целесообразности отключения двух поврежденных фаз большинство участников конференции высказалось против этого мероприятия. При этом было отмечено, что сохранение синхронизма между двумя системами, связанными по одной фазе, затруднительно и что влияние при этом на работу линий связи достигает недопустимого уровня.

Не рассматривая отдельно вопроса о желательности отключения одной фазы при двухфазных замыканиях без земли, все же приходило к выводу, что отключение одной фазы целесообразно производить только при однофазных

коротких замыканиях, а при всех остальных видах повреждений необходимо отключать три фазы. При этом отмечалось, что однофазное АПВ нашло распространение в Бельгии, Франции и США, но совершенно не нашло распространения в Англии. В Германии широко практикуется быстросрабатывающее трехфазное АПВ в сетях с воздушными выключателями. При этом все виды повреждений сопровождаются отключением трех фаз. Этот вид АПВ применяется также в Бельгии и Швеции.

Характерным для германских сетей является применение неселективных дистанционных защит с первыми ступенями, охватывающими всю защищаемую линию. Неселективное действие этих защит при повреждениях на смежных участках является последующим быстросрабатывающим АПВ. Хотя уставки первых ступеней защит превышают длины защищаемых линий на 25%, зона неселективного действия этих защит значительно ниже, если принять во внимание большие значения токов короткого замыкания, подтекающих к месту повреждения по другим линиям (т. е. большие значения коэффициентов подпитки).

Делегатом Швеции были сообщены следующие материалы, косвенно связанные с ОАПВ. В сетях 380 кВ число однофазных замыканий составляет 90% от всех видов коротких замыканий. Специальные опыты были проведены для решения вопроса о возможности успешного ОАПВ на протяженных линиях 220 кВ по условиям поддержания дуги в месте повреждения от э. д. с., введенной в отключенной фазе. При этом получены следующие результаты: ОАПВ было успешным на линии длиной 480 км; продолжительность бестоковой паузы в 0,35 сек оказалась достаточной для самопогасания дуги при токе 1250 а; продолжительность горения дуги после отключения фазы возрастала пропорционально току повреждения; ток дуги после отключения фазы изменялся в пределах от 12 до 15 а, максимальное сопротивление дуги при этом составляло примерно 500 ом.

На основании этих опытов шведский делегат пришел к выводу, что ОАПВ может быть успешным на линиях 220 кВ при их протяженности до 600...700 км, а при напряжении 380 кВ — для линий до 200...250 км.

Интересно отметить, что род металла провода, применяемого для создания искусственного короткого замыкания, влиял на сопротивление дуги, возникающей в процессе опыта. При этом стальной провод оказывал большее влияние, чем медный.

(CIGRE, доклад № 325, 1954).

Инж. Н. Е. Рибель

Расчетная схема	Режим работы	Векторная диаграмма напряжений в месте установки избирательного органа	Поведение избирательного органа фазы		
			A	B	C
 Избирательный орган	Замыкание фазы А на землю без переходного сопротивления		+	-	-
	Замыкание фазы А на землю через переходное сопротивление		+	-	+
	Короткое замыкание фаз В и С на землю без переходного сопротивления		-	+	+
	Короткое замыкание фаз В и С на землю через переходное сопротивление		+	-	+
	Двухфазный режим работы передачи трансформаторов напряжения, установленных на шинах		-	+	+
	Двухфазный режим работы передачи трансформаторов напряжения, установленных на линии		0	-	-

Символ ⊕ показывает, что избирательный орган данной фазы замыкает контакт

Символ ⊖ показывает, что избирательный орган данной фазы держит контакт разомкнутым

редачи и охарактеризовано его поведение в этих режимах.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. При однофазных коротких замыканиях через переходное сопротивление возможна работа избирательного органа в неповрежденной фазе, что является безусловным дефектом. 2. При двухфазных коротких замыканиях на землю возможен отказ одного из избирательных органов поврежденных фаз при наличии переходного сопротивления в месте повреждения.

ВЫСШИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Поскольку большинство аппаратов, присоединяемых к системам переменного тока, спроектировано для работы при нормальной частоте, высшие гармоники тока и напряжения могут привести к нежелательным явлениям.

К источникам искажения кривых тока и напряжения относятся статические трансформаторы и ртутные выпрямители.

У трансформаторов форма кривой намагничивающего тока имеет искаженный вид за счет содержания высших гармоник, величина которых увеличивается с ростом насыщения трансформаторной стали. Кривые тока ртутных выпрямителей имеют прямоугольную форму и содержат также ряд гармонических составляющих.

При применяемых на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог шестифазных схемах выпрямления: звезда (или треугольник) — две обратные звезды с разделяющим реактором, в кривой первичного тока системы содержатся 5, 7, 11, 13, 17, 19-я и т. д. гармоники.

Теоретическое значение высших гармоник токов в процентах основной гармоники

$$I_{1(n)} = \frac{100}{n} \%.$$

С увеличением нагрузки ртутных выпрямителей величина гармоник снижается.

При некоторых соотношениях индуктивности системы L и емкости ее линий передач C может иметь случай резонанса токов, а также резонанса напряжений.

Вблизи резонанса токов происходит резкое увеличение тока $I_{1(n)}$, протекающего в генераторе.

Исследования системы 132 кВ, длиной линий передач 650 км и мощностью до 400 мвт показали, что с изменением ее мощности P со 137 до 368 мвт, нагрузки с 88 до 288 мвт и длины линий передач l с 525 до 625 км (т. е. с изменением L и C системы) 5-я гармоника напряжения $U_{1(5)}$ изменялась от 1 до 3,8% основного напряжения. При этом отношение l/P изменялось от 0,9 до 2,8.

При проведении другого эксперимента с системой, питаемой от генератора 18,7 мва, 11 кВ через трансформатор 45 мва и линию передачи 132 кВ длиной 215 км при изменениях длины линии и мощности подсоединяемых трансформаторов, 5-я гармоника напряжения достигала 12% основной.

При испытаниях было установлено, что для указанной длины линии величина 5-й гармоники растет с увеличением намагничивающего тока трансформатора, для которого величина этой гармоники тем меньше, чем больше l . Другие исследования системы 33 кВ, питаемой от сети 132 кВ через два трансформатора 15 мва, к которой были подсоединены семь ртутно-выпрямительных подстанций с выпрямителями мощностью 2500 кВт каждый, показали наличие в цепи 33 кВ 5-й и 7-й гармоник тока и напряжения. При этом было обнаружено, что при одном включенном трансформаторе 15 мва 5-я гармоника напряжения составляла 9%, а при двух трансформаторах 5%. Величины же гармоник тока были соответственно равны 33 и 20%.

В системе Euston Watford, питающей электрифицированные линии железной дороги, генератор № 1 резонировал с емкостью кабеля при 550 гц, а № 2 при 800 гц, причем в первом случае 11-я гармоника тока увеличивалась до 20%.

Высшие гармоники тока вызывают дополнительный нагрев генераторов. Так, дополнительные поля, обусловленные этими гармониками, индуктируют на поверхности ротора э. д. с. Создаваемые при этом токи вызывают дополнительный нагрев ротора, а также и статора, причем последнего в меньшей степени, чем первого. Эксперименты, проведенные на турбогенераторе с неявно выраженными полюсами 1250 кВА, 2300 В, 60 гц, 3600 об/мин, который питал игнитронную установку мощностью 600 кВт, показали, что дополнительный нагрев растет с увеличением угла регулирования.

В связи с этим был определен допустимый коэффициент загрузки турбогенератора выпрямительной нагрузкой. При угле регулирования $\alpha = 0$ дополнительный нагрев

составил: для ротора 19,1° С, для статора 2,6° С; при $\alpha = 30,4^\circ$ — соответственно 25,5 и 6,6° С. Коэффициенты загрузки в этих случаях были 0,9 и 0,922.

Исследованные случаи пробоев мощных турбогенераторов, которые много лет перед этим удовлетворительно работали на электростанциях Германии, показали, что аварии имели место из-за чрезмерного повышения температуры стали ротора. Причиной повышения температуры оказались высшие гармоники тока и напряжения. Установленный прибор зарегистрировал 5-ю гармонику напряжения величиной 25% основной гармоники. Первичной причиной аварии, которая имела место при малой нагрузке, оказался резонанс 5-й гармоники намагничивающего тока больших трансформаторов, недавно установленных для питания длинных линий передачи.

Высшие гармоники тока и напряжения, вызванные ртутными выпрямителями или трансформаторами, влияют на работу ряда электроаппаратов: статических конденсаторов, дугогасящих катушек и пр. Например, 7-процентное значение 5-й гармоники напряжения приводит к 6-процентному увеличению тока конденсатора, к которому приложено напряжение основной волны. Если еще учесть 7-ю гармонику напряжения (3%), ток перегрузки увеличится до 8%. При изучении этого явления регистрировались случаи 40% повышения тока от 5-й гармоники напряжения.

Идеальная компенсация емкостного тока на землю и гашение дуги замыкания на землю (при заземлении нейтрали через катушку Петерсена) имеют место лишь при чисто синусоидальном напряжении.

Если же в системе имеются высшие гармоники напряжения, то форма кривых емкостных токов искажается; они не компенсируются катушкой и гашение дуги затрудняется.

Эксперименты, проведенные с системой 33 кВ, связанной с сетью 132 кВ через два трансформатора 132/33 кВ с заземленной нейтральной точкой (на стороне 33 кВ) через катушку Петерсена, подтвердили эти явления.

Интересен также случай резонанса 5-й гармоники тока, при котором этот ток заставлял срабатывать от перегрузки выключатель.

Следует указать на ошибочные показания электроизмерительных приборов индукционного типа, которые обусловлены высшими гармониками тока и напряжения.

Высшие гармоники приводят и к ряду других неприятных для эксплуатации явлений.

На электрифицированном участке Southern Region Британских железных дорог контактная сеть питается от ртутно-выпрямительных подстанций, получающих энергию от системы через трехжильный кабель 33 кВ длиной до 650 км.

На участке смонтировано 113 главным образом одноагрегатных ртутно-выпрямительных подстанций, оборудованных шестифазными водоохлаждаемыми выпрямителями мощностью 2500 кВт каждый.

Спустя 13 лет после прокладки кабелей с ними начались аварии. Исследования показали, что именно гармоники, генерируемые ртутно-выпрямительными агрегатами, вызывающие резонанс в системе и искажения формы кривой напряжения, явились причиной кратковременной целостности диэлектрических материалов кабелей с пропитанной изоляцией. Места повреждения характеризовались наличием ряда булавочных проколов в бумажной ленте, которые были вызваны внутренними разрядами, усиленными присутствием в системе высокочастотных и высокоамплитудных гармонических составляющих напряжения. Установленные на тяговой подстанции Redhill приборы позволили обнаружить, что общий зарядный ток кабеля увеличился почти на 60%. Осциллограммы напряжения между линией и землей во время периода расстройств в системе указали на наличие высших гармоник даже при отсутствии какой-либо емкости в системе.

Расчеты показывают, что во избежание опасных величин гармоник и их последствий индуктивность системы должна быть как можно меньше: один кабель большого сечения предпочтительнее большому числу малых кабелей, включенных параллельно.

Наличие высших гармоник увеличивает и диэлектрические потери в кабеле, но они являются только вторичным фактором в определении термической стабильности диэлектрика.

Из мероприятий, направленных на борьбу с высшими гармониками, следует отметить следующие:

1. Конструирование трансформаторов, работающих при малых индукциях. Так, при индукции 11 000 гс трансформаторы практически «свободны от гармоник». Подобные трансформаторы конструируются в Германии со специальными сердечниками, при которых высшие гармоники намагничивающего тока скомпенсированы.

2. Установка реакторов на линиях передач. Однако этот способ требует реакторов со слишком большим индуктивным сопротивлением.

3. Установка на стороне переменного тока фильтрующих устройств. Подобное устройство на одной маломощной ртутно-выпрямительной установке 200 кВт, 2300 в при включении в каждую фазу (соединение в треугольник) индуктивности 13 мГн и емкости 15 мкФ дало только 2...3-кратное снижение величины 5-й и 7-й гармоник.

4. Наиболее эффективным мероприятием является повышение числа фаз тяговых установок до 12, 24 и более. Поскольку изготовление многофазных силовых трансформаторов представляет известные трудности, этот вопрос решается всеми фирмами путем применения «квази-многофазных» схем. При этом каждый выпрямительный агрегат соединяется по обычной шестифазной схеме с уравнивающим реактором. В группе из p агрегатов напряжения, подводимые к каждому из них, смещаются на угол $\frac{360^\circ}{6p}$,

и благодаря этому вся группа в целом в отношении формы первичного тока становится эквивалентной схеме с числом фаз, равным $6p$.

Для получения $6p = 12$ половина общего числа трансформаторов, образующих 12-фазную систему, соединяется на первичной стороне в треугольник, а другая — в звезду. Примерно такая же схема была осуществлена на одной из четырех тяговых подстанций участка Лион—Куло. Каждая из этих подстанций оборудована двумя выпрямительными агрегатами (одноанодными водоохлаждаемыми игнитронами) 2000 кВт, 1500 в каждый.

Игнитронная группа подсоединена к тяговому трансформатору со схемой: треугольник/звезда — треугольник по трехфазной схеме Ларионова, что дает возможность получить схему, эквивалентную 12-фазной.

Тяговые подстанции электрифицированных железных дорог Южного района Англии имеют тяговые трансформаторы со схемой треугольник — 12-фазный зигзаг (четыре трехфазных зигзага, соединенных между собой через три разделяющих реактора).

Недавно на участке Euston—Watford, имеющем 14 тяговых подстанций с ртутными выпрямителями, работающими по указанной 12-фазной схеме, соединения трансформаторов половины подстанций были модифицированы путем введения 15-градусного сдвига фаз.

В целом при равномерном распределении нагрузок между подстанциями оборудование стало работать по 24-фазной схеме, при которой следовало бы ожидать полного исчезновения 5, 7, 11 и 13-й гармоник. Практически, поскольку нагрузка неравномерна, наблюдалось уменьшение величин 11-й и 13-й гармоник в отношении 5:1, в то время как подобные же опыты, произведенные на двух подстанциях, работающих по 24-фазной схеме, дали уменьшение лишь в отношении 2:1.

Следует отметить, что выпрямители разных подстанций электрифицированных железных дорог редко имеют одинаковую нагрузку и, следовательно, работают с различными углами перекрытия. Это приводит к сдвигу фаз между гармониками одного и того же порядка. При разнице в перекрытиях в 15° сдвиг фаз для 11-й и 13-й гармоник равен около 180° , вследствие чего их величины значительно снижаются.

Другой способ удвоения числа фаз был использован на London Passenger Transport Board, где ранее группы из четырех выпрямителей мощностью 2000 кВт каждый работали также по 12-фазной схеме (учетверенный зигзаг или учетверенная звезда) с обычными разделяющими катушками. С целью удвоения числа фаз разделяющие катушки снабдили вторичными обмотками, которые подсоединены к четырем анодам маломощного вспомогательного выпрямителя, работающего параллельно с главным выпрямителем. Нагрузка на вспомогательном выпрямителе составляет около 3,5% общей нагрузки. Практически для

этих целей можно взять стеклянный шестианодный выпрямитель при использовании его четырех анодов или даже полупроводниковый выпрямитель.

Теоретическая форма волны первичного тока соответствует действительной 24-фазной при работе выпрямителя в пределах нормальной нагрузки. В действительности же форма волны соответствует 24-фазной при малых и отличается от нее при больших нагрузках.

Влияние новой схемы на мощность, нагрев и к. п. д., коэффициент мощности и выпрямленное напряжение при полной нагрузке незначительны.

Исследования 12-фазного выпрямителя мощностью 800 кВт со схемой включения учетверенный зигзаг без сглаживающего устройства, но снабженного оборудованием для удвоения числа фаз, показали, что на стороне переменного тока 11-я гармоника снизилась по величине с 3,94 до 0,51%, а 13-я — с 3,05 до 0,3%. На стороне же постоянного тока 12-я гармоника снизилась с 1,5 до 0,41%.

Следует также отметить, что в сочетании с описанной 12-фазной схемой, получающейся при включении трансформаторов на первичной стороне в звезду (или в треугольник), для увеличения числа фаз применяются также фазоопоротные трансформаторы.

Рациональное число фаз определяется соизмеримостью мощностей ртутно-выпрямительной установки и питающей ее системы, параметрами последней и т. п.

В американской практике принято эмпирическое правило: число фаз должно быть того же порядка, что и число мегаватт выпрямительной установки. Однако опыт эксплуатации показывает, что и при неточном выполнении этого требования трудности не имеют места при эксплуатации.

Литература

1. J. S. Forrest. The Beama Journal, т. 45, стр. 82 и 89, № 28 и 29, 1939.
2. R. Pohl. The Engineer., сентябрь 26, 1941.
3. M. D. Ross, J. W. Batchelor. Tr. AIEE, т. 62, стр. 667, 1943.
4. J. C. Read. JIEE, т. 95, ч. 2, № 44, 1948.
5. S. Whitehead, W. G. Rodley. Proc. JIEE, ч. 2, стр. 29, № 49, 1949.
6. S. B. Warder, E. Friedlander, A. N. Arman. Proc. JIEE, т. 61, ч. 2, стр. 399, 1951.
7. Heller. Elektrotechnický obzor, стр. 304, № 6, 1953.
8. Rev. général des chemins de fer, июнь 1954.

Кандидат техн. наук М. Д. Трейвас

ДЕСЯТЬ ЛЕТ ПОЛЬСКОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В годы второй мировой войны энергетическое хозяйство Польши было сильно разрушено. Основная задача, поставленная народной властью перед энергетиками в трехлетнем плане восстановления народного хозяйства (1946—1949 гг.), заключалась в восстановлении разрушенной энергетики. Это задание было с честью выполнено.

В 1949 г. было выработано 8,3 млрд. кВтч электроэнергии, что почти в 1,8 раза больше, чем вырабатывалось ежегодно в капиталистической Польше. Годовое потребление электроэнергии на одного жителя возросло со 111 кВтч в 1938 г. до 339 кВтч в 1949 г. Прирост потребления электроэнергии в течение года составлял 10...15%.

Шестилетний план развития народного хозяйства (1949—1955 гг.) ставил задачу поднять польскую энергетику на новый, более высокий уровень. 22 июля 1955 г. польские энергетики рапортовали о выполнении своих обязательств и заданий шестилетнего плана. В результате выполнения этого плана Польша приблизилась к таким электрифицированным странам как Англия или Бельгия. В 1955 г. выработка электроэнергии должна была составить 18 млрд. кВтч, что почти в 4 раза больше, чем вырабатывалось в капиталистической Польше.

На одного жителя потреблялось электроэнергии в 1953 г. 500 кВтч, в 1954 г. — 571 кВтч, а в 1955 г. — 645 кВтч (по плану). Прирост потребления электроэнергии в течение года составлял 13%. Около 66% выработанной электроэнергии потребляется промышленностью, что свидетельствует о ее мощном развитии. Достигнута правильная пропорциональность между развитием польской промышлен-

ленности и энергетики. Если в 1953 г. прирост продукции промышленности был выше, чем выработка электроэнергии, то в 1954 г. на 1% прироста промышленной продукции приходилось 1,2%, а в 1955 г. — 1,38% прироста выработки электроэнергии.

По шестилетнему плану в Польше должно быть построено около 75 тыс. км линий электропередачи высокого напряжения (выше 2 кВ), в том числе 5 тыс. км линий 110 и 220 кВ, общая длина которых в 1955 г. должна была составить 6 725 км против 2 203 км в 1949 г.

Впервые строится линия 220 кВ, которая соединит ряд крупных промышленных и энергетических центров. Построен ряд новых тепло- и гидроэлектростанций. Создано шесть энергосистем, соединенных между собой линиями высокого напряжения.

Широко внедряется новая техника, оборудование для пара высоких параметров, механизация подачи топлива, автоматизация электростанций. Увеличивается единичная мощность котлов и турбогенераторов, модернизируются электрические станции и сети. Вследствие этого сильно улучшились основные технические показатели, что видно из таблицы.

В I квартале 1955 г. на многих электростанциях удельное потребление условного топлива было на 26 % меньше планового. В 1954 г. было сэкономлено 500 тыс. т условного топлива.

Проводятся дальнейшая модернизация сетей, установка новых защитных устройств, вводится форсировка возбуждения, АПВ и т. д., вследствие чего значительно снизилась аварийность и повысилась надежность работы энергосистем. По сравнению с 1951 г. число аварий в 1954 г. уменьшилось почти в 9 раз, причем 25,6% ава-

Год	1949	1952	1955
Средняя мощность турбогенераторов, кВт . . .	7 500	9 500	12 600
Средняя выдача котлов, т/час	19,1	26,0	38,5
Среднее давление пара, ат	25,5	34,2	51,0
Потребление условного топлива, кг/кВтч	0,796	0,709	0,605

рий приходится на электростанции и 73,4% — на электрические сети.

Сравнительно мало еще достижений в области использования резервов. Если в 1954 г. разница между установленной и действительной мощностью и уменьшилась на 33,5%, то разница между среднегодовыми действительной и распределенной мощностями возросла на несколько десятков тысяч киловатт.

Среднее время ремонтов с 1951 по 1953 г. значительно уменьшилось: с 43,5 до 28...30 дней для котлов и с 54 до 30...33 дней для турбин, но оно все же остается в 2—3 раза больше, чем в СССР, несмотря на применение скоростных методов ремонта.

В энергетическом хозяйстве Польши работает около 60 тыс. рабочих и 10 тыс. инженеров и техников.

[Energetyka (Stalinogród), стр. 165, № 4, 1955].

Инж. Ю. И. Лысков



Хроника

В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ ОБЩЕСТВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В ноябре 1955 г. в Ленинграде состоялся расширенный пленум Центрального правления Научно-технического общества энергетической промышленности с участием представителей предприятий, научно-исследовательских институтов и проектных организаций. На пленуме были рассмотрены основные предположения по проекту плана шестой пятилетки в области развития энергетики, а также обсужден план работы Общества на 1956 г.

Во вступительном слове председатель Центрального правления НТОЭП член-корр. АН СССР, проф. А. Е. Алексеев отметил необходимость участия всей энергетической общественности в обсуждении плана 1956 г.

С докладом об основных направлениях технического прогресса в энергетике и электропромышленности в новом пятилетии выступил доктор техн. наук, проф. М. А. Бабилов (Отдел энергетики Гостехники), который, в частности, отметил, что как в Советском Союзе, так и за рубежом намечается значительное строительство электрических станций, работающих на ядерной энергии. В США рассчитывают пустить в эксплуатацию первую в Америке атомную электростанцию мощностью 60 тыс. кВт в 1957 г.; до 1960 г. в США предполагается соорудить еще пять электростанций общей мощностью около 700 тыс. кВт, а к 1980 г. общая мощность атомных электростанций намечается в 45 млн. кВт. В Англии предполагается пустить строящуюся в настоящее время атомную электростанцию мощностью 60 тыс. кВт в 1956 г., а вторую — в 200 тыс. кВт — в 1957 г.; принята также 15-летняя программа строительства атомных электростанций, согласно которой к 1975 г. должны быть построены электростанции общей мощностью 24 млн. кВт. Далее докладчик остановился на вопросе внедрения в промышленность полупроводников. В докладе подчеркивалась необходимость правильной организации научных работ и усиления заводских конструкторских бюро и лабораторий.

В сообщении А. М. Некрасова (Техническое управление Министерства электростанций) указывалось, что по плану, помимо резкого увеличения мощности электриче-

ских станций и сетей, осваивается электропередача напряжением 400 кВ; намечается освоение электропередач напряжением 600 кВ; предусматривается создание единой энергетической системы Европейской части Советского Союза, в которую войдут системы центра, Средней Волги, Юга и Урала; будут создаваться и укрупняться и другие энергосистемы (в Кузбассе, Сибири, на Северном Кавказе и др.).

П. Г. Чернышев (Техническое управление Министерства электротехнической промышленности) часть своего сообщения посвятил обзору намечаемых изменений в выпуске электрооборудования: улучшается конструкция машин, создаются серии новых двигателей, широко внедряются новые высокопрочные и теплоустойчивые электроизоляционные материалы, снижаются вес на единицу мощности и потери силовых трансформаторов, разрабатываются новые типы высоковольтных выключателей, разъединителей и т. д.; особое внимание будет уделено выпуску магнитных усилителей.

А. Е. Сатановский (Техническое управление Министерства тяжелого машиностроения) сообщил, что намечается модернизация турбин 25, 50 и 100 тыс. кВт и котлов 170 и 230 т/час, а также создание новых типов агрегатов до 300 тыс. кВт и котлов до 750 т/час на высокие и сверхвысокие параметры пара. Намечен выпуск специальных газовых турбин. Будут изготавливаться крупные агрегаты гидротурбин радиально-осевого типа.

Е. М. Лапин (Планово-производственный отдел Министерства строительства электростанций) проанализировал выполненные в 1955 г. строительные работы и сообщил о мерах по дальнейшей индустриализации энергетического строительства с резким сокращением сроков их производства и удешевлением стоимости.

Заместитель председателя Центрального правления НТОЭП А. П. Павлушков сообщил о выполненной работе и плане на 1956 г.

После широкого обмена мнениями по поднятым в докладах вопросам пленум принял план работы Общества на 1956 г.

Инж. В. И. Жуковская
член Центрального правления НТОЭП

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МАСЛАМ

В ноябре 1955 г. в г. Баку было проведено Азербайджанским правлением Научно-технического общества энергетической промышленности и Азэнерго Всесоюзное научно-техническое совещание, посвященное вопросам улучшения качества и эксплуатации энергетических турбинных и трансформаторных масел. В работе совещания принимало участие около 200 представителей министерств, энергосистем, нефтеперерабатывающих заводов, научно-исследовательских институтов и других заинтересованных организаций из различных городов страны.

С обзорным докладом о поведении энергетических масел в эксплуатации выступила **Р. В. Котляр** (Техническое управление МЭС), которая отметила, что качество вырабатываемых в настоящее время заводами нефтяной промышленности энергетических — турбинных и трансформаторных — масел не удовлетворяет требованиям потребителей. Сроки работы масел значительно снизились. Из-за неудовлетворительного качества масла ремонт трансформаторов и маслonaполненных аппаратов приходится производить в сокращенные сроки, что увеличивает эксплуатационные расходы и препятствует сокращению обслуживающего персонала. Кроме того, происходит преждевременное старение изоляции электрооборудования со всеми вытекающими отсюда последствиями. Предприятия Министерства электростанций с целью удлинения срока службы масел применяют методы непрерывной регенерации масла без слива его из оборудования, практикуют антиокислительные присадки и пр.

Помимо ухудшения за последние годы физико-химических свойств, имеет место ухудшение качества масла и по диэлектрическим показателям. По данным Московского трансформаторного завода, около 80% полученного в 1954 г. заводом масла имели повышенный тангенс угла диэлектрических потерь: в среднем за 1954 г. 1,34% при 20° (до 1949 г. значение тангенса при тех же условиях не превышало 0,2%). Повышенное значение тангенса угла диэлектрических потерь имеют масла, поступающие в энергосистемы.

По поручению Технического управления Министерства электростанций была выяснена причина повышения диэлектрических потерь изоляционных масел. Соответствующие рекомендации сообщены Министерству нефтяной промышленности.

С докладом «Увеличение срока службы энергетических масел при помощи присадок» выступил доктор хим. наук. **К. И. Иванов** (Всесоюзный теплотехнический институт), который указал, что применение присадок в первую очередь повышает стабильность масла, препятствуя его окислению кислородом воздуха в условиях эксплуатации. Недостаток многих присадок, применяемых для стабилизации энергетических масел, заключается в неодинаковой восприимчивости к ним масел различного происхождения, особенно регенерированных и находящихся уже в эксплуатации. Новые присадки, испытанные в последнее время нефтяной лабораторией ВТИ, более активны и не страдают указанным недостатком.

Инж. **Е. А. Мирзоева** (Оргрзс) представила доклад «Причины, вызывающие ухудшение диэлектрических свойств трансформаторного масла, и мероприятия по их устранению». Инж. **В. М. Иванов** (Оргрзс) сделал доклад «Лабораторные исследования и эксплуатационный опыт по удлинению срока службы энергетических масел».

Инж. **Л. А. Мухарская** (Энергетический институт Академии наук Азербайджанской ССР) выступила с докладом «Исследование причин повышенных диэлектрических потерь товарных трансформаторных масел». Исследованием установлено, что влияние на диэлектрические характеристики масел оказывают натриевые мыла нафтеновых кислот. Их повышенное количество, образующееся в процессе изготовления масел, и является причиной повышения диэлектрических потерь товарных масел. Благоприятное влияние на снижение диэлектрических потерь, а также на стабильность транс-

форматорного масла оказывает дополнительная промывка чистой водой.

Затем с докладами выступили: кандидат техн. наук **Р. А. Липштейн** (Всесоюзный теплотехнический институт) «Связь между химическими свойствами и диэлектрическими показателями изоляционных масел», «Метод количественного определения влаги, растворенной в трансформаторных маслах»; кандидат техн. наук **Р. В. Кулакова** (НИИКП) «Исследование масел, отдельных групп углеродов и их смесей на разложение в электрическом поле», «Связь между диэлектрическими и химическими свойствами минеральных масел и их стабильностью»; кандидат хим. наук **А. М. Левшина** (Азербайджанский научно-исследовательский институт нефтепереработки) «Новый метод определения стабильности энергетических масел»; кандидат техн. наук **Д. А. Гусейнов** (Бакинский нефтеперерабатывающий завод им. Сталина) «Опыт производства турбинных и трансформаторных масел и перспективы улучшения их качества»; кандидат техн. наук **И. Оруджева** (Азербайджанский научно-исследовательский институт нефтепереработки) «Исследование возможности производства энергетических масел из бакинских парафинистых нефтей».

Большое внимание на совещании было уделено опыту эксплуатации энергетических масел в энергосистемах. Этому были посвящены выступления инж. **Аптова** (Центральная лаборатория ВВС Мосэнерго), инж. **В. П. Ростовцевой** (Азэнерго), инж. **А. А. Туева** (Свердловэнерго), инж. **А. П. Веселовского** (Ивгрзс), инж. **Е. И. Новрузхановой** (Азэнерго), инж. **Е. П. Кульниной** (Молотовэнерго).

Доклад «Эксплуатация и регенерация энергетических масел на заводах Министерства черной металлургии СССР» сделал инж. **А. И. Хаймович** (Центроэнергочермет).

Совещанием были одобрены рекомендации по всем обсуждавшимся вопросам.

Инж. М. Н. Алиев и инж. В. В. Савин
Азэнерго

ЮБИЛЕЙНЫЕ ДНИ МЭИ

В декабре 1955 г. торжественно отмечалось 50-летие Московского ордена Ленина энергетического института им. Молотова. В течение нескольких дней работала юбилейная научно-техническая конференция в составе 15 секций: физической, математической, электроэнергетической, электромеханической, электрооборудования промышленности и электрификации транспорта, электровакуумной и приборостроения, радиотехнической, теоретической электротехники и других.

Во вступительном слове на пленарном заседании конференции директор института проф. **М. Г. Чиликин** сообщил о том, как коллектив института выполняет решение июльского Пленума ЦК КПСС, обязывающее обратить особое внимание на постановку учебно-педагогического процесса, разработку вопросов передовой науки и техники и внедрение выполненных научно-исследовательских работ в народное хозяйство.

Член-корр. АН СССР **В. А. Кириллин** осветил в своем докладе перспективы дальнейшего развития энергетики, в частности на базе дальнейшего развития использования атомной энергии на электростанциях, и остановился на новых задачах, стоящих перед советскими учеными в этой области.

На межсекционном заседании электротехнических секций большой интерес вызвали доклады акад. **В. А. Котельникова** о перспективах развития радиотехники и члена-корр. АН СССР, проф. **В. А. Трапезникова** о математическом моделировании в электротехнике. В докладах были намечены пути дальнейшего развития применений полупроводниковых приборов, миллиметровых волн, дальнейшей углубления теории информаций и разработки новых систем цветного телевидения, совместимых с системами черно-белого телевидения; был описан новый прибор для изучения на модели сложных переходных процессов и демон-

стрировался интегратор, дающий возможность наблюдать на экране электроннолучевой трубки характеристики переходных процессов, описываемые заданным дифференциальным уравнением. Доктор техн. наук, проф. В. А. Веников выступил с докладом о физическом моделировании в электротехнике.

Из докладов на секциях отметим освещение: вопросов развития социалистической энергетики (доц. С. Ф. Шершов), вопросов построения электрических сетей больших городов (проф. А. А. Глазунов), научно-технических проблем крупного электромашиностроения (проф. Г. Н. Петров), особенностей работы нового электромашиного усилителя с подмагничиванием (кандидат техн. наук И. П. Копылов), научно-исследовательских работ в области электрических машин с массивным ротором (проф. Ю. С. Чет), проблем электроаппаратостроения (проф. М. А. Бабиков), перспектив развития электропривода переменного тока со специальными машинами в системах синхронной связи и следящих системах (член-корр. АН СССР, проф. А. Н. Ларионов), современных достижений высоковольтной кабельной техники (проф. С. С. Городецкий), разработок в области синтеза керамических материалов с заданными свойствами (проф. Н. Г. Дроздов) и новых пластмасс для проводов и кабелей (инж. Т. М. Орлович), новой схемы автоматического управления тепловозом (доц. А. Д. Степанов), вопросов автоматизации в металлургической промышленности (проф. Д. П. Морозов), разработанных в МЭИ систем управления ионными преобразователями (проф. И. Л. Каганов), современных выключателей высокого напряжения (проф. Г. В. Буткевич), частотнофазовых устройств телеуправления (доц. О. А. Горяинов) и др.

Всего на конференции было сделано 179 научных докладов работниками Московского энергетического института и представителями промышленности, в своем большинстве которые являются воспитанниками МЭИ. В работе конференции приняло участие около 3 000 чел., из них 1 200 чел. из промышленности.

Итоги конференции показали, что научные работники института провели в творческом содружестве с работни-

ками промышленности большое количество научных исследований, направленных на разрешение важнейших научных проблем, возникающих в народном хозяйстве.

26 декабря в помещении Центрального театра Советской Армии состоялось под председательством Министра высшего образования СССР проф. В. П. Елютина торжественное заседание, на котором с приветствиями институту выступили: от Московского городского комитета КПСС секретарь горкома Е. И. Афанасенко, от Министерства высшего образования СССР заместитель министра С. В. Румянцев, от Министерства электростанций первый заместитель министра С. А. Павленко, от Министерства строительства электростанций заместитель министра А. С. Подушкин, от МГК ВЛКСМ секретарь горкома А. А. Сосин, от Московского государственного университета им. Ломоносова акад. И. Г. Петровский и др. В адрес МЭИ поступили многочисленные приветствия от заводов, научно-исследовательских и проектных институтов, от высших учебных заведений, от строителей. Поздравление коллективу института прислал Энергетический институт им. Кржижановского АН СССР.

К юбилейным дням вышли из печати 10 сборников научных трудов МЭИ (вып. XVI—XXV) и специальный юбилейный сборник «50 лет МЭИ», содержащий ряд крупных статей о деятельности и истории Московского энергетического института им. Молотова.

Установлены три ежегодные премии за выдающиеся научно-исследовательские работы; премии будут присуждаться Ученым советом МЭИ. Для лиц, окончивших МЭИ, учрежден нагрудный значок.

Работе института, его профессорско-преподавательскому коллективу и студенчеству посвящен кинофильм в двух частях, выпущенный на днях на экраны Центральной студией документальных фильмов.

Инж. Н. Л. Иванова

ИНЖЕНЕР Н. А. ТИЩЕНКО

К 50-летию со дня рождения и 25-летию инженерной деятельности

Николай Афанасьевич Тищенко является выдающимся советским специалистом в области металлургического электропривода.

Свою трудовую деятельность он начал в 1923 г. рабочим-электромонтером на металлургическом заводе им. Ильича в г. Жданове. С 1926 по 1931 г. — студент и аспирант Харьковского электротехнического института.

С 1931 по 1941 г. Н. А. Тищенко работает на Харьковском электромеханическом заводе имени Сталина (ХЭМЗ), на должностях от рядового инженера до начальника отдела и становится одним из крупнейших инженеров в области электрического привода. В этот период им лично или под его непосредственным руководством впервые разработан ряд отечественных систем электроприводов, в том числе автоматическая система электроприводов доменной загрузки, система электропривода блуминга и др.

С 1942 г. Николай Афанасьевич работает начальником свердловского филиала, затем главным конструктором ЦКБ «Электропривод» Министерства электротехнической промышленности СССР. В этот период он принимает активное участие в восстановлении металлургии Юга и



Украины. В годы Великой Отечественной войны и послевоенные годы он руководит работами по усовершенствованию металлургических электроприводов и созданию новых типов систем электроприводов для доменных печей и прокатных станов.

Под его руководством создана и впервые в мировой практике внедрена в СССР комплексная система автоматического управления прокатными станами типа блуминг.

За разработку и внедрение электромашиной автоматики для прокатных станов Н. А. Тищенко в 1951 г. удостоен звания лауреата Сталинской премии. За активное участие в восстановлении электрооборудования, разрушенного гитлеровцами в годы войны, он награжден орденами «Красная звезда», «Трудовое красное знамя».

Н. А. Тищенко известен как автор 15 научных трудов, опубликованных в журналах «Электричество», «Вестник электропромышленности» и др.

*Н. М. Филин, В. С. Тулин, М. Г. Чиликин,
А. Т. Голован, И. И. Петров, Д. П. Морозов,
С. Н. Вешневский и др.*

ДИССЕРТАЦИИ

Ленинградский электротехнический институт имени В. И. Ульянова (Ленина)

В ученом совете Ленинградского электротехнического института имени В. И. Ульянова (Ленина) защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за период с июня 1946 по июнь 1954 г.¹

Л. В. Карнюшин защитил 21 июня 1946 г. диссертацию на тему: «Автоматическое регулирование электроприводов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. К. Попов и канд. техн. наук, доц. А. В. Берендеев.

Метод работы основан на сопоставлении основных видов движения регулируемой системы при наличии и при отсутствии связей, осуществляемых регулирующим устройством. Изложены основы теории и расчета регулирующего устройства, разработанного автором для электроприводов, регулируемых в широких пределах, и приводятся результаты экспериментально-теоретического исследования процессов регулирования. Рассмотрены области применения регулирующего устройства.

Г. С. Солодовников защитил 24 июня 1946 г. диссертацию на тему: «Защитная арматура гирлянд изоляторов высоковольтных линий передачи». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. А. Горев и доктор техн. наук Н. П. Богородицкий.

На основании анализа проведенных лабораторных исследований, обработки эксплуатационной статистики и литературных данных обосновываются требования, которые должны быть предъявлены к защитной арматуре в установках различных напряжений (35, 110, 220 кВ и выше), и предлагаются варианты оптимальной формы защитной арматуры для выравнивания распределения напряжения и для отвода дуги промышленной частоты от гирлянды.

В. А. Романов защитил 24 июня 1946 г. диссертацию на тему: «Некоторые вопросы регулирования частоты в энергосистемах». Официальные оппоненты: проф. М. Л. Цуккерман и канд. техн. наук, доц. И. И. Рыжов.

Изложен вывод формулы вращающего момента вывального элемента автоматического регулятора частоты системы Ленэнерго, параметры которого были подобраны на основании целого ряда экспериментов. Находятся условия, необходимые для получения удовлетворительного процесса регулирования частоты.

П. К. Куликовский защитил 29 ноября 1946 г. диссертацию на тему: «Основные положения выбора параметров многомоторных электроприводов бумажных машин». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич и канд. техн. наук, доц. Ю. А. Рейнгольдт.

Предложен критерий для оценки скоростного режима секций, а также рекомендованы значения максимально допустимых отклонений скорости последних от установленных величин. Рассмотрены различные способы пуска секционных электродвигателей, в частности, предложенный автором безреостатный пуск, основанный на применении принципов непрерывного управления электроприводами.

В. Е. Манойлов защитил 29 ноября 1946 г. диссертацию на тему: «Исследование естественных заземлителей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Е. Каплянский и канд. техн. наук, доц. А. В. Берендеев.

Исследована зависимость величины сопротивления заземления от геометрических размеров заземлителя, удельной проводимости грунта, сезонности. Предложен метод измерения сопротивления заземления сложных заземлителей при наличии на них постоянных напряжений. Рекомендован метод расчета сопротивления заземлений естественных заземлителей.

Б. В. Алексенко защитил 20 декабря 1946 г. диссертацию на тему: «Методы теплового расчета морских кабелей». Официальные оппоненты: доктор

техн. наук Н. П. Богородицкий и канд. техн. наук А. Н. Дмитриев.

Рассмотрено нагревание морских кабелей и проводов при длительном, кратковременном, повторно-кратковременном и смешанных режимах работы, от токов короткого замыкания и от пусковых токов электродвигателей, даны методы выбора сечения кабелей по нагреву при указанных режимах работы, приведены сведения о свойствах теплоустойчивой резиновой изоляции морских кабелей и проводов. Рассмотрены вопросы защиты предохранителями типов ПР и С морских кабелей и проводов от перегрузок и коротких замыканий.

А. М. Левитский защитил 28 февраля 1947 г. диссертацию на тему: «К вопросу пуска электродвигателей трехфазного тока от сети автономной электростанции ограниченной мощности». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Т. Касьянов и канд. техн. наук, доц. Г. С. Солодовников.

Предложено в случае длительного пуска электропривода, когда можно пренебречь переходными электромагнитными процессами генераторов станции, использовать для проверки устойчивости и расчета величины остаточного напряжения метод баланса реактивной мощности генераторов и реактивной нагрузки потребителей.

Освещены методы расчета остаточного напряжения при длительном пуске электропривода в условиях автоматического регулирования напряжения, а также при кратковременном пуске, когда необходимо учитывать переходные электромагнитные процессы генераторов.

П. Н. Матханов защитил 28 февраля 1947 г. диссертацию на тему: «Электрическая прочность воздуха на высокой частоте и вопросы рациональных форм высоковольтных изоляторов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. А. Горев и канд. техн. наук, доц. Ф. Е. Евтеев.

На основании расчетного анализа с учетом неравномерности электрического поля предложены формы опорных и проходных изоляторов, наивыгоднейшие как с точки зрения нагрева, так и разрядных характеристик.

Е. Я. Казовский защитил 28 марта 1947 г. диссертацию на тему: «Вращающие моменты синхронных машин при больших качаниях». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Е. Алексеев и доктор техн. наук Р. А. Лютер.

На основании выведенных общих формул получены выражения для электромагнитного вращающего момента при установившихся синусоидальных качаниях с большой амплитудой и при синусоидальных качаниях с большой амплитудой, медленно затухающей по экспоненциальному закону. Найденные выражения использованы для расчета электромагнитного вращающего момента при набросе нагрузки. На основании представленного анализа получены уточненные формулы для синхронизирующего и демферного момента при больших качаниях.

К. И. Партман защитил 25 апреля 1947 г. диссертацию на тему: «Емкостное трансформирование электрической энергии на линиях передач высокого напряжения». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий и канд. техн. наук, доц. Б. М. Рябов.

Дана методика расчета установок с конденсаторами и антенной связью и приведены примерные расчеты.

Н. П. Глуханов защитил 26 декабря 1947 г. диссертацию на тему: «О возможности использования параметрического генератора индуктивного типа для питания установок индукционного нагрева под поверхностную закалку». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. Я. Соколов и канд. техн. наук, доц. А. В. Донской.

Исследованы теоретически и экспериментально характер и пределы изменений параметров индукционных электротермических устройств, вызванные изменением физического состояния нагреваемой детали, а также вследствие

¹ С диссертациями можно ознакомиться в Государственной библиотеке имени Ленина в Москве или в библиотеке ЛЭТИ.

возможных изменений геометрических соотношений в нагреваемой детали и индукторе. Показана возможность согласования изменений параметров нагрузки с условиями возбуждения и стабильной работы генератора. Проанализированы основные схемы включения нагрузки. Показана техническая возможность применения параметрического генератора индуктивного типа для питания установок индукционного нагрева под поверхностную закалку, ковку, штамповку и индукционных сталеплавильных печей.

Б. И. Аранович защитил 23 апреля 1948 г. диссертацию на тему: «Матричные методы анализа и синтеза релейно-контактных схем». Официальные оппоненты: проф. Н. В. Лупал и канд. техн. наук, доц. А. В. Фремке.

В результате произведенного исследования предложен новый аппарат, сочетающий матричную алгебру с алгеброй логики, для отображения, анализа и синтеза релейно-контактных схем любого класса и полноты без преобразования схем одного класса в другой.

А. Е. Слухоцкий защитил 23 апреля 1948 г. диссертацию на тему: «Исследование работы индукторов для поверхностного нагрева с магнитопроводами из расслоенного железа». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. Я. Соколов и канд. техн. наук А. А. Фогель.

Рассмотрены процессы в нагреваемой стали для двух стадий нагрева, исследованы пределы изменения ее параметров в различных случаях. Получены необходимые расчетные формулы, примененные в дальнейшем для вычисления эквивалентных параметров индуктора. Для облегчения расчета составлен ряд таблиц и выполнены соответствующие графики.

Б. А. Разумов защитил 29 декабря 1948 г. диссертацию на тему: «Определение экономичности электроустановок, генерирующих реактивную энергию на промышленных предприятиях». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Пресс и доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич.

Проведены исследования задачи компенсации реактивной мощности на промышленных предприятиях и разработаны методы определения эффективности применения различных средств компенсации.

Г. С. Филиппов защитил 11 марта 1949 г. диссертацию на тему: «Исследование устойчивости электрических силовых следящих систем». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич и канд. техн. наук, доц. В. А. Бесекерский.

Установлены характерные особенности силовой следящей системы. Приведены данные расчетно-экспериментальной схемы, на которой проводился эксперимент, и определены ее основные параметры. Дан анализ методов повышения устойчивости силовых следящих систем.

А. В. Дмитриев защитил 24 июня 1949 г. диссертацию на тему: «Исследование коронного разряда высокой частоты и конструирования высоковольтных высокочастотных изоляторов». Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, проф. Л. А. Сена и канд. техн. наук, доц. Г. Г. Швец.

Дано описание экспериментальных исследований высокочастотной короны; изложены основные принципы конструирования высоковольтных высокочастотных изоляторов и приведены результаты испытаний, разработанных автором конструкций.

В. Н. Шевцов защитил 10 марта 1950 г. диссертацию на тему: «Исследование режима работы рудовых гЭС методом электроэнергетических балансов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук А. Н. Лошкин, доктор техн. наук И. В. Егiazаров и инж. А. Д. Зигель.

Рассмотрен комплекс сложных вопросов, связанных с эксплуатацией энергосистем и с проектированием гЭС, произведен анализ ряда эксплуатационных положений, даны рекомендации, предложен метод составления энергобалансов и разработана их классификация с соответствующими указаниями к каждому классу.

М. С. Глазепал защитил 28 апреля 1950 г. диссертацию на тему: «Применение трехфазных асинхронных машин в качестве самовозбуждающихся генераторов для однофазной и

несимметричной трехфазной нагрузки». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. И. Иванов и канд. техн. наук, доц. Е. А. Иванов.

Произведено теоретическое исследование работы трехфазного самовозбуждающегося асинхронного генератора на симметричную однофазную и несимметричную трехфазную нагрузку. Полученные результаты проверены числовыми расчетами и экспериментальными исследованиями.

Б. А. Митрофанов защитил 30 июня 1950 г. диссертацию на тему: «Применение следящих систем для повышения точности резания при обработке деталей на станках». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич и канд. техн. наук, доц. В. А. Бесекерский.

Рассмотрены факторы, влияющие на точность резания. Для выбранного типичного режима работы станка дается аналитическое исследование режима работы и определяется мощность корректирующей следящей системы. Предложен новый метод повышения точности резанием путем применения следящей системы, управляемой от специального измерительного прибора.

Е. В. Чуприянов защитил 30 июня 1950 г. диссертацию на тему: «Параллельная работа сельсинов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. В. Берендеев и канд. техн. наук И. Б. Аранович.

Произведено теоретическое исследование работы сельсинов с одинаковыми и разными параметрами. Дана методика определения параметров сельсинов и экспериментальное определение этих параметров для различных типов машин и приведены экспериментальные данные зависимости вращающего момента от угла рассогласования роторов сельсинов при различных схемах работы машин.

А. Л. Игрицкий защитил 29 декабря 1950 г. диссертацию на тему: «Исследование дуги постоянного тока в железной дугогасительной решетке». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. О. Б. Брон и доктор техн. наук, проф. В. И. Иванов.

Исследован вопрос очередности вхождения дуги в решетку и движения дуги в решетке методом скоростного фотографирования в широком диапазоне. Установлена зависимость напряжения на дуге от тока в момент вхождения ее в промежуток. Выявлена зависимость перенапряжений от индуктивности цепи.

П. М. Ипатов защитил 11 мая 1951 г. диссертацию на тему: «Возбуждение синхронных генераторов при помощи электромашиных усилителей с поперечным полем». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. В. Берендеев и канд. техн. наук, доц. А. Р. Сиваков.

Получены уравнения системы регулирования при холостом ходе генератора и при работе его компенсатором. В основу изучения положен ряд допущений, которые позволяют значительно упростить математические выкладки, не приводя к значительным погрешностям. Схема применения для тихоходных генераторов и в состоянии обеспечить удовлетворительное регулирование во всех случаях эксплуатации.

П. Г. Никитин защитил 29 июня 1951 г. диссертацию на тему: «Погрешности измерительных трансформаторов постоянного тока». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. И. Иванов и канд. техн. наук Е. К. Михайлова.

Изложена теория работы измерительного трансформатора постоянного тока (ИТПТ), сделан вывод более общей формулы для расчета погрешности коэффициента трансформации ИТПТ, предложенный автором. Формула расчета погрешности и известные формулы других авторов проверены экспериментально.

М. В. Иванов защитил 15 февраля 1952 г. диссертацию на тему: «К вопросу механической прочности высоковольтных изоляторов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук В. Т. Ренне и канд. техн. наук, доц. М. А. Лошкарев.

Показана возможность и целесообразность применения ультразвукового метода для контроля керамических изоляторов, определения наличия внутренних дефектов, установления размера внутренних пор, качества обжига и др.

Ю. А. Розовский защитил 14 марта 1952 г. диссертацию на тему: «Влияние автоматического регу-

лирования напряжения на статическую устойчивость сверхдальней электропередачи». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. В. Васильев и канд. техн. наук, доц. О. В. Щербачев.

Выполнено теоретическое оригинальное исследование статической устойчивости сверхдальней электропередачи с применением электронных регуляторов, проанализирована упрощенная методика расчета и предлагаются практические решения.

Ю. М. Коршунов защитил 20 июня 1952 г. диссертацию на тему: «Измерение больших переменных токов в переходных режимах». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. В. Фремке и ст. инженер завода «Электроаппарат» И. М. Самсонов.

Разработаны два новых метода (графический и аналитический) расчета переходных процессов в трансформаторах тока. Показана возможность использования аналитического метода для расчета переходных процессов в сложных схемах защит. Разработаны способы измерения очень больших токов в переходных режимах на основе использования измерительных трансформаторов без стальных сердечников в тех случаях, когда обычные трансформаторы тока не могут быть использованы.

В. С. Гордеева защитила 27 июня 1952 г. диссертацию на тему: «Теоретическое и опытное исследование работы электроприводов с фазным электродвигателем». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. П. Ермолин и канд. техн. наук, доц. Г. В. Одинцов.

Даны теоретическое и экспериментальное исследование работы одного из типов синхронного реактивного двигателя, питаемого от источника постоянного тока через камертонный прерыватель.

И. П. Жерихин защитил 27 июня 1952 г. диссертацию на тему: «Улучшение пусковых свойств синхронных двигателей». Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич и инженер завода «Электросила» Г. К. Жерве.

На основе теоретического и экспериментального исследования даны рекомендации для выбора и расчета пусковых клеток синхронных двигателей, обеспечивающих осуществление заданных пусковых характеристик.

В. М. Израйлянц защитил 27 июня 1952 г. диссертацию на тему: «Воздушные трансформаторы тока в схемах дифференциальной защиты генераторов и трансформаторов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. В. Берендеев и инженер завода «Электроаппарат» А. И. Коченова.

На основании теоретических и экспериментальных исследований показана возможность и целесообразность применения в схемах дифференциальной защиты генераторов и трансформаторов, воздушных трансформаторов тока вместо обычно применяемых трансформаторов тока со стальным сердечником.

И. С. Ковалев защитил 20 июня 1952 г. диссертацию на тему: «Исследование электромагнитных процессов в индукционном экранированном электродвигателе». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Е. Каплянский и канд. техн. наук доц. Б. И. Архангельский.

Работа посвящена трехфазным асинхронным двигателям, между статором и ротором которых помещена немагнитная металлическая труба; эта конструкция представляет большой интерес при приводе насосов и мешалок для химической и нефтяной промышленности в случае высоких давлений и корродирующих жидкостей, так как позволяет обходиться без сальников.

Г. Я. Муравьева защитила 20 июня 1952 г. диссертацию на тему: «Высокочастотный разряд при пониженном давлении и вопросы расчета изоляции, работающей на больших высотах». Официальные оппоненты: лауреат Сталинской премии, доктор техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий и канд. техн. наук, доц. К. С. Стефанов.

Проведено экспериментальное исследование высокоча-

стотного разряда при пониженных давлениях в диапазоне до 30...40 мм рт. ст. Выработаны рекомендации по разрядным расстояниям для изоляторов, аппаратов, работающих на напряжении до 20 кВ и выбора изоляции для этих условий.

А. С. Васильев защитил 9 января 1953 г. диссертацию на тему: «Исследование работы ионных преобразователей в качестве генератора тока повышенной частоты для индукционного нагрева». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. И. Панфилов и лауреат Сталинской премии, канд. техн. наук М. А. Спицын.

Рассмотрены схема преобразования постоянного тока в однофазный переменный при помощи двух тиратронов с последовательно включенным в цепь нагрузки коммутирующим конденсатором и схема параллельного ионного преобразователя с ее техническими модификациями. Предложен расчет ионного преобразователя, работающего на активную нагрузку и на колебательный контур.

Б. А. Нечаев защитил 27 февраля 1953 г. диссертацию на тему: «К вопросу о применении трансформаторов тока с малым объемом железа для дифференциальных защит генераторов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. И. Иванов и начальник службы релейной защиты Ленэнерго инж. С. Н. Захаров.

Проведено теоретическое исследование особенностей работы трансформаторов тока с большим и малым сечением сердечников в схемах дифференциальной защиты. Дано описание экспериментов.

Н. А. Тиняков защитил 27 февраля 1953 г. диссертацию на тему: «Электрические испытания высоковольтной высококачественной изоляции». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, доц. Ю. Я. Юров и канд. техн. наук, доц. Е. А. Гайлиш.

Разработаны: а) установка для измерения $\tan \delta$ у высоковольтной высококачественной изоляции при высоком напряжении высокой частоты; б) методика измерения $\tan \delta$; в) методика измерения высокого напряжения высокой частоты в установившемся режиме.

В. Н. Рудаков защитил 24 апреля 1953 г. диссертацию на тему: «Применение полупроводников для моделирования нелинейных утечек». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий и канд. техн. наук Р. П. Жежерин.

Работа посвящена исследованию возможностей расширения метода моделирования при помощи электрогидродинамических аналогий. Практически изучены свойства полупроводниковых материалов, применяемых для моделирования.

А. А. Преображенский защитил 22 мая 1953 г. диссертацию на тему: «Расчет однослойных магнитных экранов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. О. Арутюнов и канд. техн. наук, доц. А. В. Дмитриев.

Разработаны два метода расчета однослойных магнитных экранов: графоаналитический с использованием понятия коэффициента размагничивания и аналитический. Показаны области целесообразного применения экранов из различных материалов.

В. Г. Тихомиров защитил 22 мая 1953 г. диссертацию на тему: «Исследование вопроса о возможности создания умножителя частоты в диапазоне 500—10 000 гц для целей индукционного нагрева и методика его расчета». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. В. Васильев и канд. техн. наук М. А. Спицын.

Исследован вопрос о создании однофазного утроителя частоты из двух трансформаторов — насыщающегося и не насыщающегося, при согласном последовательном соединении первичных и встречном соединении вторичных обмоток. Подробно исследованы потери и магнитные свойства сталей ХВП и Э4АА и показана целесообразность применения для утроителя частоты стали Э4АА.

А. А. Устинов защитил 19 июня 1953 г. диссертацию на тему: «Регулирование скорости двигателей постоянного тока с использованием регенеративных электромашинных усилителей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук,

проф. Д. В. Васильев и канд. техн. наук, доц. Б. А. Ягунов.

Выведена зависимость коэффициентов усиления регенеративных ЭМУ от конструктивных параметров машины. Предложен новый метод снижения остаточной намагниченности. Рассмотрен вопрос об устойчивости работы системы Г—Д с применением регенеративных ЭМУ.

В. А. Сагайдак защитил 26 июня 1953 г. диссертацию на тему: «Анализ работы и основы расчета маломощных однофазных асинхронных двигателей с вспомогательными обмотками». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. В. Васильев и инж. М. С. Дахин.

Выполнен анализ работы ряда типов двух обмоточных индукционных двигателей, которые объединены общим термином «асинхронные двигатели со вспомогательной обмоткой». Рассмотрены двигатели со вспомогательной обмоткой, приключенной к сети через конденсатор или активное сопротивление, и двигатель с расщепленными полюсами.

А. Д. Демичев защитил 5 февраля 1954 г. диссертацию на тему: «Стекланные конденсаторы для цепей высокого напряжения высокой частоты». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий и доктор техн. наук, проф. В. Т. Ренне.

Исследованы природа газовых включений в стекле и явления, связанные с разрядом в газе, ограниченном стеклом. Разработана конструкция стеклянного конденсатора с применением воздушного охлаждения диэлектрика и дан метод расчета рабочего градиента напряжения в диэлектрике в зависимости от толщины диэлектрика, частоты тока и скорости продувания воздуха.

Г. И. Дорофеев защитил 12 марта 1954 г. диссертацию на тему: «Исследование изменения эквивалентных параметров индукторов при высокочастотном нагреве». Официальные оппоненты: член-корр. АН СССР, доктор техн. наук, проф. С. Я. Соколов и доктор техн. наук А. В. Донской.

Дан теоретический анализ методов индукционного нагрева для различных видов термообработки. Разработан случай индукционного нагрева ферромагнитных материалов.

Е. М. Душин защитил 18 июня 1954 г. диссертацию на тему: «Исследование электронно-лампового ваттметра с использованием экспоненциальных характеристик электронных ламп». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Б. П. Козырев и канд. техн. наук Д. И. Зорин.

Подробно рассмотрена теория метода умножения при помощи элементов, имеющих характеристики вида:

$$Z = x \cdot e^y \text{ и } Z = e^{x \cdot y}.$$

Даны аналитические выражения погрешностей метода и указаны пути снижения погрешностей до приемлемых

значений. Рассмотрен ряд методов, повышающих стабильность и точность работы умножающей схемы. Приведены результаты испытания макета и опытного экземпляра ваттметра, построенных по мостовой умножающей схеме.

А. Я. Зыков защитил 18 июня 1954 г. диссертацию на тему: «Исследование систем электропривода с электромашинным усилителем с самовозбуждением». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. В. Васильев и канд. техн. наук, доц. Н. Г. Штольцер.

Рассмотрены некоторые методы расчета переходных процессов: аналитические методы при спрямленной характеристике холостого хода, при криволинейной и линейно-кусочной аппроксимации характеристик холостого хода и графоаналитические методы. Произведен анализ работы в установившихся режимах системы генератор—двигатель с электромашинным усилителем, включенным по схеме моста и используемым в качестве регулятора скорости электродвигателя. Предложены аналитический и графоаналитический методы расчета э. д. с. генератора и усилителя.

Х. Лазер защитил 18 июня 1954 г. диссертацию на тему: «Заземление нейтрали через настроенное индуктивное сопротивление». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. В. Васильев и начальник линейной службы высоковольтной сети Ленэнерго, инж. В. Г. Кожемякин.

Дан краткий обзор современного состояния вопроса о режиме работы нейтрали сети высокого напряжения, приведены теории дуговых перенапряжений и дана оценка результатов исследования авторов рассмотренных теорий. Приведено исследование заземления нейтрали через настроенное, частично зашунтированное, индуктивное сопротивление. Теоретические обоснования проверены на модели в лабораторных условиях.

А. А. Вавилов защитил 29 июня 1954 г. диссертацию на тему: «Автоматическое регулирование напряжения синхронного генератора с двухступенчатым электромашинным усилителем». Официальные оппоненты: член-корр. АН СССР, доктор техн. наук, проф. А. Е. Алексеев и канд. техн. наук О. А. Будько. Дан анализ переходных процессов в электромашинном усилителе для случаев работы на активную и индуктивную нагрузки. Переходные процессы в усилителе проанализированы как при параллельном, так и при последовательном подключении обмотки самовозбуждения. Исследованы совместные уравнения объекта регулирования синхронного генератора и регулятора электромашинного усилителя при наличии безинерционной обратной связи по отклонению напряжения генератора, а также при введении первой производной напряжения генератора.

Доцент А. С. Сергеев



Библиография

Н. Н. БЕЛОРУССОВ и В. Н. КРАСОТКИН. СИЛОВЫЕ КАБЕЛИ. 464 стр.,
ц. 10 руб. 20 коп. Госэнергоиздат, 1955.

Книга допущена Управлением учебными заведениями Министерства электротехнической промышленности в качестве учебного пособия для техникумов. Она написана двумя видными работниками кабельной промышленности и широко охватывает теорию и практику силовых кабелей с бумажной пропитанной изоляцией. Содержание книги в большей своей части относится к технологии изготовления силовых кабелей низкого и высокого напряжения. Технологической части предшествуют основы теории кабеля, электрический и тепловой расчет и расчет конструкций кабелей разного типа. Теория и расчет кабеля занимают около 1/4 части книги, а остальные 3/4 относятся к производству кабеля. В конце книги изложены вопросы, связанные с испытанием кабеля, со складским хранением кабеля, с организацией производства на кабельных заводах и пр.

Уже первое ознакомление с книгой оставляет впечатление некоторой недоработанности, выражающейся в наличии неоправданных повторений, ошибок, неточных и не всегда правильных определений и выражений. Особенно

неблагополучны в этом отношении первая и вторая главы книги [например, формулы (1-13), (1-14) и (1-15) на стр. 21 и 23, являясь промежуточными при выводе формул для расчета потенциала в любом месте изоляции, не могут быть использованы, непонятны на стр. 22 выражения «собственный потенциал провода» и «потенциал от влияния»; неверно на стр. 23 определение конденсатора и др.]. Приведенные в книге формулы для емкости следовало заменить более современными данными и дать графики для расчета новых конструкций высоковольтных кабелей.

В разделе «Поведение изоляции кабеля в электрическом поле» имеются такие выражения, как «ионизация нейтральной молекулы газа возникает из-за соединения заряженных частиц с молекулами» (стр. 28). Данные, приведенные в этом разделе, оставляют желать лучшего отношения как к подбору материалов, так и к их изложению. В самом деле, не известно, зачем приведена на стр. 34 (фиг. 1-16) взятая из книги В. Д. Лебедева (двадцатилетней давности) зависимость сопротивления

изоляции от температуры по старым американским данным для петролягума, никогда не применявшегося в СССР. На стр. 36 сообщается, что потери на ионизацию (а не диэлектрические потери, как это есть на самом деле) выражаются формулой

$$P_u = \omega C U^2 \lg \delta.$$

На стр. 41 и далее приведены несистематизированные, отрывочные, часто неверные сведения по пробою изоляции. Вообще весь этот раздел мог бы быть без ущерба для книги опущен, так как более подробные и правильные сведения по этим вопросам можно найти в любом учебнике по курсу «Электротехнических материалов».

Неблагополучно и с другими разделами этой главы: на стр. 59 утверждается, например, что при увеличении расстояния между кабелями потери в оболочках уменьшаются, тогда как в действительности они увеличиваются. Много ошибок в разделе 1-8 «Тепловое поле в кабеле». На стр. 69 написано, что увеличение наружного диаметра кабеля ведет к уменьшению теплового сопротивления кабеля, что неправильно, так как тепловое сопротивление зависит не от величины диаметра, а от отношения диаметров по изолирующему слою и по жиле кабеля. Для измерения теплового потока неправильно указывается единица ватт в секунду вместо ваттсекунды или джоуля. Этот раздел не проработан и в методическом отношении.

Имеются ошибки и в следующей, второй, главе. В некоторых случаях авторы необоснованно пользуются зарубежными материалами, например: рекомендуют экономическую плотность нагрузки силовых кабелей, значительно отличающуюся от принятой в СССР; пользуются не принятыми в нашей литературе терминами («сопротивление теплового излучения» вместо «теплоотдача»).

На стр. 114, где написано: «коэффициент будет тем больше, чем тоньше толщина изоляции», допущена ошибка, так как на самом деле он будет «тем меньше».

В книге часто встречаются ненужные повторения, которые не облегчают чтения книги и усвоения материала; так, например на стр. 112 повторяется формула (2-56), ранее данная на стр. 63. На стр. 124 опять появляются потери в свинцовых оболочках кабеля, хотя они уже рассматри-

вались на стр. 54; то же относится к стр. 76 и 218 и т. д. Такие повторения, ошибки и небрежность в изложении имеются и в прочих разделах книги; однако общее впечатление от технологических глав книги лучше, чем от теоретических. Можно сказать, что технологическая часть книги находится на надлежащем техническом уровне. Она содержит описание современных технологических процессов изготовления силовых кабелей; имеются примеры расчета оборудования и конструкций кабелей, поясняющие приведенный в книге материал. Однако и здесь есть досадные ошибки и результаты небрежного изложения. На стр. 311 (фиг. 8-1) сообщается, что при давлении 30 мм рт. ст. и температуре 100°C в кабельной бумаге содержится 6% влаги, хотя известно, что и в несущем виде кабельная бумага содержит при нормальном давлении и 20°C примерно такое же количество влаги. Прimitивно и неправильно вычисляется объем газовых включений на стр. 323, так как при этом не принято во внимание ни давление в газовых включениях, ни количество газа, растворенного в пропиточном составе. На этой же странице сказано, что заполнение котла при пропитке кабелей 20 и 35 кв — 2,5...3 час, а в табл. 8-3 на следующей странице — 2...2,5 час.

В разделе «Измерение электрического сопротивления токопроводящих жил» указано, что при измерении на двойном мосте «эталонное сопротивление во время измерения заменяется измеряемым сопротивлением» (стр. 424), хотя на самом деле ничего подобного не делают.

Следует обратить внимание на то, что в рецензируемой книге не уделено должного внимания вопросам механизации и автоматизации производственного процесса, а также не освещены перспективы развития кабельной техники.

В итоге создается впечатление о недоработанности рецензируемой книги. Конечно, ею будут пользоваться, так как книг по кабельной технике выпускается мало, однако рекомендовать ее в качестве учебного пособия вряд ли возможно. Данная рецензия обсуждена и одобрена на заседании кафедры электротехнических материалов и кабелей МЭИ им. Молотова.

Доктор техн. наук, проф. С. М. Брагин

Г. БЛАШКЕ. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. 236 стр. Издательство „Ферлаг техник“. Берлин, 1954. На немецком языке.

Автор — один из ведущих инженеров электромашиностроительного завода б. Саксенверк (Нидерзедлиц, ГДР) — задался целью систематизировать и обобщить накопившиеся за последние 30 лет теоретические методы и практические способы защиты электродвигателей. Книга отражает немецкий опыт. В ней рассматриваются главным образом вопросы защиты низковольтных асинхронных двигателей и лишь частично вопросы релейной защиты крупных синхронных и асинхронных двигателей. Достоинством книги является экономное использование математического аппарата, не снижающее, однако, строгости изложения. К книге приложены таблицы — выдержки из правил VDE — и обширная библиография.

В первых двух главах освещаются общие понятия о тепловых процессах в электрических машинах, анализируются различные эксплуатационные режимы электродвигателей и приводятся элементарные сведения из теории электрического привода. В небольшой третьей главе вкратце рассматриваются простейшие методы расчета токов короткого замыкания. В четвертой главе автор непосредственно переходит к разбору и оценке существующих устройств для защиты электродвигателей. По его мнению, для подавляющего большинства электродвигателей самой удовлетворительной формой защиты является комбинированный способ, совмещающий отсечку (автомат, предохранитель) с защитой от перегрузки (тепловой элемент). Однако тут же отмечается практическая недостижимость точной регулировки тепловых реле, хотя в идеале эта защита, должностная быть тепловым аналогом защищаемой машины, признается наилучшей (стр. 55). В этом смысле единственно совершенной тепловой защитой автор считает защиту при помощи заложенных в пазы статора

электродвигателя термометров сопротивления, хотя и отмечает, что такой способ весьма дорогой, неудобный в эксплуатации, и может быть рекомендован только для крупных машин высокого напряжения (стр. 114—120). Вопреки многочисленным и убедительным доводам, подтверждающим неполноценность тепловых реле, автор все же на протяжении всей книги советует широко применять тепловую защиту. Это тем более странно, что, анализируя эффективность защит вообще, он приходит к резонному выводу, что при правильном выборе мощности электродвигателя защита от перегрузок, действующая на отключение, оправдывает себя лишь в очень редких случаях, когда разгрузка двигателя требует остановки механизма (мысль, высказанная уже некоторыми советскими авторами, например И. А. Сыромятниковым).

Пятая глава носит описательный характер и посвящена немецким конструкциям автоматических выключателей и контакторов с ручным и дистанционным (соленоидным, пневматическим) приводом.

Защита мощных электродвигателей высокого напряжения рассматривается в шестой главе. В седьмой главе даны практические рекомендации по выбору и наладке защитных и пускорегулирующих устройств электродвигателей. В восьмой главе вкратце изложены требования к защитным устройствам в рудничном и взрывобезопасном исполнении и в следующей небольшой главе — вопросы, связанные с защитой двигателей от атмосферных перенапряжений. Заключительная глава является кратким наставлением персоналу по обслуживанию электродвигателей и их защитных устройств.

*Инж. Г. К. Церава
г. Бокситогорск*

А. А. КЛИМОВ. ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ. 376 стр., ц. 7 р. 60 к. Допущено Главным управлением сельскохозяйственных вузов МВО СССР в качестве учебного пособия для институтов и факультетов механизации и электрификации сельского хозяйства. Сельхозгиз, 1955.

В первой главе книги изложены основы электропривода машин; в трех последующих главах рассмотрены вопросы использования электроэнергии в силовых, тепловых и биологических процессах животноводства; далее содержатся вопросы освещения, расчета и устройства низковольтных сетей и внутренней электропроводки, расхода электроэнергии и техники безопасности. Издание книги такого содержания является делом важным и актуальным. Однако рецензируемая книга во многих отношениях совершенно не оправдывает ожиданий читателя.

Основными недостатками книги являются: 1) обособленность теоретической части от затрагиваемых практических вопросов; 2) поверхностное изложение ряда разделов по электрификации животноводства, придающее книге, предназначенной для специальной подготовки инженеров, чрезмерно элементарный характер; 3) загроможденность текста второстепенными материалами в ущерб вопросам электрификации животноводства; 4) недостаточное внимание к вопросам эксплуатации и экономики; 5) значительное количество ошибочных утверждений; 6) не совсем удачное расположение материала.

Остановимся на некоторых конкретных замечаниях. Глава первая «Общие основы электропривода машин» занимает треть всей книги, но увязка ее содержания с темой электрификации животноводства, а также степень использования ее материала в последующих главах — весьма незначительны. Для примера возьмем раздел «Электродвигатели постоянного тока». Здесь электродвигатели рассматриваются совершенно безотносительно к их применению. В последующих же главах говорится об их применении для электровозов и электрокар, но без всякого приложения ранее данной теории; этому вопросу посвящается всего 15 строк (на стр. 199 и 209) и не дается ни единой схемы. Не лучше ли было бы основное внимание уделить более подробному рассмотрению применения машин постоянного тока.

Так же обстоит дело и с параграфами: «Торможение электродвигателей», «Переходные режимы в электроприводах», «Мощность и тепловой режим электродвигателей», «Коэффициент мощности и способы его улучшения» и др.

Содержание второй главы «Электрификация силовых процессов» страдает тем, что в ущерб вопросам электрификации здесь значительное место уделяется вопросам из курса механизации и из других курсов, которые проходят студенты на соответствующих факультетах. Например, без особенной надобности во второй главе приводятся известные расчеты суточной производительности кормоцеха и часовой производительности его машин (стр. 159 и 160), расчет суточного грузооборота дороги и тягового усилия (стр. 200—205), расчет пневматического транспорта и циклона (стр. 213—223), расчет вентиляции (стр. 226—230) и т. п. В то же время вопросам электрооборудования уделяется недостаточно внимания и их изложение ведется автором на низком теоретическом уровне. При описании, например, магнитных сепараторов ничего не говорится о питающем выпрямительном устройстве; схема преобразователя частоты (рис. 134) дана без пояснений; описание электровозов и электрокар дано без электрических схем; ничего не сказано о зарядном устройстве для электрокар; в описании автоматической насосной станции с воздушно-водяным котлом нет рисунка реле давления; выпущены такие вопросы, как регулирование уставки реле и моментное действие его контактов; в разделе «Молочные сепараторы» нет расчета продолжительности пуска машины, не выясняется вопрос о выборе электродвигателя с учетом тяжести пуска; в ряде конкретных случаев применения электропривода упущены вопросы исполнения двигателя, его установки, пусковой и защитной аппаратуры; в ряде конкретных случаев переменной нагрузки (электровоз, маслоизготовитель, безбашенная водокачка) не приведены расчеты потребной мощности электродвигателя и т. д.

В третьей главе «Электрификация тепловых процессов» значительное внимание уделено расчету нагревательных элементов. Это хорошо. Но электросилообразование и сушка сена описаны схематично; слишком кратко описание электрифицированного инкубатора, причем отсутствие рисун-

ков плунжерных и манометрических реле, реле времени, механизма поворота лотков и т. п. делает мало эффективными пояснение сложной схемы инкубатора (рис. 174), которая к тому же представлена в неудобочитаемом виде. Полная электрическая схема птичника (рис. 180) дана без пояснений.

В четвертой главе «Использование электрической энергии в биологических процессах животноводства» автор довольно подробно останавливается на биологическом действии лучей и вопросах их дозировки, но недостаточно полно освещает устройство аппаратуры и вопросы ее эксплуатации. Например, схема установки для облучения животных (рис. 189) и схема электрокардиографа (рис. 199) даны без пояснений; полуавтоматический жидкостный реостат для постепенного изменения света в птичниках упоминается без описания и без рисунка; не упомянуты полностью автоматизированные устройства, существующие для этой цели; совершенно схематично описана электрифицированная изгородь и т. д.

Нельзя признать удачным расположение (в конце книги) главы «Электрическое освещение животноводческих ферм», главы «Техника безопасности в электроустановках животноводческих хозяйств» и раздела шестой главы «Расчет сечения проводов». Такое расположение материала, несомненно, ограничило возможности автора при описании (во второй главе) электрооборудования кормоцеха, насосной, стригального пункта и др. Опыт преподавания аналогичного курса на факультете механизации Харьковского зоотехнического института говорит о целесообразности перестановки указанных разделов по возможности ближе к началу курса.

Справочных таблиц по электрооборудованию в книге недостаточно. Отсутствуют, например, таблицы для выбора электродвигателей, магнитных пускателей, предохранителей, ламп и т. д. В то же время помещены менее важные для данного курса таблицы норм содержания углекислоты и влаги в воздухе (табл. 16), почасового расхода воды (табл. 5) и ряда других в таком же роде.

Элементы экономики представлены в книге недостаточно полно. Так, например, говоря о $\cos \varphi$ и о способах его улучшения, автор не анализирует возможности установки компенсирующего устройства. На стр. 210 указываются условия, при которых было выгодно применение электрокар, повидимому, несколько лет назад, но методика соответствующих расчетов не приводится. То же самое следует сказать о данном на стр. 198 сопоставлении стоимости перевозок для дорог различного типа.

Из книги читатель не получает представления о различии в стоимости между электродвигателями защищенного и закрытого исполнения или электродвигателями на 750 и 3000 об/мин, между различными типами светильников, между рубильником и магнитным пускателем, между проводкой в трубах и проводкой на изоляторах и т. д.

Вопросы эксплуатации и ремонта в книге также освещены недостаточно. Например, ничего не говорится о неисправностях и ремонте магнитных пускателей, об эксплуатации понижительных трансформаторных подстанций, о неисправностях и наладке таких аппаратов, как реле давления водокачки, вибрационного регулятора напряжения, устройства для питания электрифицированной изгороди и целого ряда других. Почти ничего не говорится о ремонте электродвигателей.

В разделе «Основные правила эксплуатации электрической части насосных установок» ни слова не говорится о возможных неисправностях этой части оборудования.

Обращает на себя внимание то, что в перечне использованной литературы совершенно отсутствуют иностранные источники.

Наряду с указанными недостатками в книге имеются ошибочные утверждения, неудачные выражения и невыправленные опечатки. Отметим некоторые из них.

1. На стр. 25 по поводу регулирования скорости электродвигателя путем изменения сопротивления в цепи говорится, что главный недостаток этого способа «...состоит в том, что регулирование скорости сопровождается

уменьшением полезной мощности двигателя, так как оно происходит при постоянном моменте. Лучшим же способом, как известно, считают регулирование при постоянной мощности». Уместно спросить, разве постоянство момента или мощности определяется способом регулирования?

2. На стр. 116 говорится о коэффициенте мощности: «Его физический смысл несколько сходен с работой механической силы F кг, действующей на тело под некоторым углом к скорости V м/сек перемещения тела». Нельзя, конечно, вообще говорить о сходстве смысла с работой, но если здесь имеется сходство, то не в физической сущности, а скорее формальное.

3. Согласно формуле (69) $Z_{ac} = 0,04_{ac} \frac{Q_{cym}}{V_k} P_{k1}$ число включений в час водокачки с воздушно-водяным котлом (Z_{ac}) равно нулю только при суточном расходе $Q_{cym} = 0$. На самом деле $Z_{ac} = 0$ также и при расходе, равном производительности насоса.

4. На суточных графиках работы электродвигателей и энергопотребления кормоцеха (рис. 116 и 117) указаны номинальные мощности двигателей вместо мощностей, забираемых из сети.

5. На рис. 125 не вяжутся значения тока (3,63 а), фазного напряжения (100 в) и мощности электродвигателя (1 500 вт).

6. В главе шестой на стр. 326 дается общее указание: «Сечение проводов выбирается по условиям нагрева и потери напряжения». При этом ничего не говорится о прочности, об экономической плотности, о соответствии проводов и предохранителей.

7. На стр. 328 указываются допускаемые отклонения напряжения —6% и —4%, в то время как для сельских воздушных линий нормированы —10%...+7,5% (см. Руко-

водящие указания для сельских электроустановок, 1953 г., т. V, гл. 14).

8. На стр. 328 допускаемая потеря напряжения в сети ошибочно определяется без учета фактического уровня напряжения в начале линии.

9. На стр. 358 говорится: «По найденному значению нагрузки $P_{kva(max)}$ производится выбор мощности силового трансформатора понизительной подстанции». Ни до ни после этого не говорится о допускаемой суточной и сезонной перегрузке трансформаторов.

10. На рис. 229, изображающем схему понизительной трансформаторной подстанции, не показано рабочее заземление; счетчики включены без трансформаторов тока.

11. В описании вибрационного регулятора напряжения (стр. 191 и рис. 143) ошибочно указывается, что электромагнит 7 служит для возврата якоря 8 в исходное положение. На самом деле якорь 8 возвращается под действием пружины (рис. 142), при помощи которой можно, кстати говоря, изменять уставку регулятора. Электромагнит же 7 служит для корректирования уставки регулятора в функции от тока нагрузки.

12. На стр. 204 говорится, что при коротких пробегах электровоза выгодно брать меньшее передаточное отношение. На самом деле, ввиду понижающей редукции инерционность привода находится в обратной зависимости от передаточного отношения.

Наличие указанных серьезных недостатков в книге А. А. Климова, изданной в качестве учебного пособия, не позволяет рекомендовать ее для специальной подготовки инженеров данного профиля; положительная оценка этой книги Главным управлением МВО дана без достаточных оснований.

Кандидат техн. наук Б. З. Зильберман

Кафедра механизации животноводства Харьковского зоотехнического института

НОВЫЕ КНИГИ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ, ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Бабилов М. А., Комаров Н. С., Сергеев А. С. ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ. Учебник для энергетических техникумов. Под ред. М. А. Бабилова. Изд. 2-е, переработ. 287 стр., ц. 12 руб. 95 коп. Госэнергоиздат.

Власов М. Ф., Пигин С. М., Червякова В. И. СБОРКА И РЕГУЛИРОВКА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ. 248 стр., ц. 6 руб. Госэнергоиздат.

Гаевенко Ю. А. НОВЫЕ ТИПЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ. 224 стр., ц. 7 руб. 65 коп. Госэнергоиздат.

Егоров К. В. ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. Учебное пособие для электротехнических и энергетических вузов и факультетов. 456 стр., ц. 11 руб. 10 коп. Госэнергоиздат.

Жерве Г. К. ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ. Руководство для работников с.х. электрификации. 200 стр., ц. 6 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.

Иванов А. П. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА. 2-е перераб. изд. При участии Б. Л. Балашинского, 288 стр., ц. 10 руб. 95 коп. Госэнергоиздат.

ИНСТРУКЦИЯ 184-54 ПО ПРОВЕРКЕ АМПЕРМЕТРОВ, ВОЛЬТМЕТРОВ И ВАТТМЕТРОВ. 52 стр., ц. 1 руб. 75 коп. Стандартгиз.

Малов В. С. ТЕЛЕМЕХАНИКА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. Изд. 2-е, переработ. 328 стр., ц. 10 руб. 20 коп. Госэнергоиздат.

Мокарян А. Т., Антонян Г. Г., Авакимян М. С. СПРАВОЧНИК СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРИФИКАТОРА. 160 стр., ц. 6 руб. 50 коп. Ереван, Айпетрат.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. Сборник статей под ред. В. В. Солодовникова. 100 стр., ц. 4 руб. 40 коп. Оборонгиз.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ. Сборник научн. трудов МВТУ им. Баумана. Под ред. В. П. Никитина. 94 стр., ц. 4 руб. 55 коп. Госэнергоиздат.

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ ПО ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКЕ. Под ред. Р. А. Нилендера и др. Вып. 7. 34 стр., ц. 2 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.

СБОРНИК ТАРИФОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ И ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ. МЭС СССР. 84 стр., ц. 4 руб. 15 коп. Госэнергоиздат.

Сирота И. М. ЗАЩИТА ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ. 208 стр., ц. 10 руб. 20 коп. Академиздат УССР.

Соколов М. М. ЭЛЕКТРОПРИВОД И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ. Учебное пособие для энергет. и политехн. вузов и факультетов. 352 стр., ц. 8 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.

Якобсон С. С. СВАРКА ПРИ МОНТАЖЕ И РЕМОНТЕ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ. 320 стр., ц. 10 руб. 55 коп. Госэнергоиздат.



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Н. А. Андрианов, Н. И. Борисенко, Г. В. Буткевич, А. А. Глазунов, В. А. Голубцова, Н. Г. Дроздов (главный редактор), Е. Г. Комар, М. П. Костенко, Л. Р. Нейман, В. И. Попков, И. И. Петров, И. А. Сыромятников (зам. главного редактора), А. М. Федосеев, М. Г. Чиликин, М. А. Шателен

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСЕЙ АВТОРАМИ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

1. Размер статьи не должен превышать 0,5 авт. листа (12 стр. машинописного текста через 2 интервала с 5—6 рис.).

2. Оригинал статьи представляется в одном экземпляре (первом с машинки), отпечатанном через два интервала, с полями 4—5 см.

Оригинал должен быть тщательно проверен и подписан автором (цитаты заверяются подписью автора особо каждая, с указанием точного источника). Ниже подписи автор проставляет свою фамилию, полностью имя и отчество, домашний адрес, место работы, занимаемую должность, телефон.

3. Примененные автором обозначения выписываются им на отдельном листе с указанием: 1) что символ обозначает, 2) какого алфавита буква, 3) строчная или заглавная; аналогичное пояснение делается и в отношении индексов. Следует руководствоваться принятыми в журнале: буквенными обозначениями электротехнических и общетехнических величин и сокращенными обозначениями единиц измерения.

4. Формулы отчетливо вписываются от руки чернилами выделенными строками, а не в строках текста. Таблицы не должны быть громоздкими; все наименования в них проставляются полностью.

5. При вписывании букв, индексов, символов и других знаков следует соблюдать правильные их начертания во избежание смещения сходных изображений: заглавных и строчных букв (*C* и *c*, *K* и *k*, *O* и *o*, *S* и *s*, *U* и *u*, *V* и *v* и др.), букв, трудно различимых в рукописи (*e* и *l*, *I* и *J*, *g* и *q*, *n* и *u*, *v* и *w* (греч.), *x* и *χ* (греч.), *d* и *α* (греч.), *ε*, *ξ* и др.).

Заглавные (прописные) буквы рекомендуется подчеркивать карандашом двумя черточками снизу (например, *O*), а строчные — сверху. 0 (ноль)

не подчеркивать. Греческие буквы — заключать в кружки цветным карандашом.

6. Нумерация ссылок к тексту, ссылок на литературу, ссылок на рисунки выполняется раздельно в порядке собственной последовательности в тексте.

Библиографический указатель (Литература) составляется в следующем порядке: а) для *журналов* — инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), название статьи (иностранный в русском переводе), название журнала, часть или том (для журналов, не имеющих счета томов, — номер), страница начала статьи, год издания; б) для *книг* — инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), название книги, ссылка на страницы, наименование издательства (для иностранных изданий — место издания), год издания.

7. Иллюстрации должны быть перечислены в специальной описи. На обороте каждого рисунка автор должен указать свою фамилию и номер, соответствующий ссылке в тексте.

8. Пометки и надписи, относящиеся к графическому материалу, должны быть сделаны вне площади рисунка.

9. Условные обозначения в площади рисунка должны быть краткими и общеупотребительными. Расшифровка примененных условных обозначений дается без сокращений на свободном поле или в приложении к каждому рисунку вместе с его наименованием для набора надлежащей подписи к рисунку.

10. Фотоснимки должны быть отпечатаны на белой глянцевой бумаге. Изображение должно быть контрастным, с резкой проработкой деталей. Свет должен усиливать восприятие основных линий и деталей изображения. Главный предмет съемки не должен сливаться с фоном или подавляться последним.

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

для распределительных сетей

заказывайте

T.E.C.

THE TRANSFORMER & ELECTRICAL CO., LTD.

ПРОИЗВОДСТВО СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДО 100 КВА И ДРУГОЙ АППАРАТУРЫ

EASTERN WORKS, EASTERN RD., WALTHAMSTOW, LONDON, E.17 · АНГИЯ

Телефон: Keystone 5031-2 · Каталог по запросу · Поставщики Британского Правительства

