

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1952



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

6

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР
И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

СОДЕРЖАНИЕ

[К. А. Круг]	3
<i>За прочную связь научных работников с производством</i>	4
Н. К. Архипов — О потерях и регулировании напряжения в городских электрических сетях	8
М. М. Некрасов — Профилактические испытания высоковольтных изоляторов	15
В. Н. Андрианов и А. И. Покатаев — О регулировании мощности ветроэлектрической станции	19
Т. Г. Сорочер и И. И. Горжевский — Расчет магнитных полей в зазоре явнополюсной синхронной машины	24
А. Г. Ивахненко — Автоматическое регулирование скорости короткозамкнутых трехфазных асинхронных двигателей	30
С. З. Барский — Резервы повышения точности статического регулирования автоматизированного электропривода	37
Г. А. Киреев — К анализу защиты ротора генератора от замыканий на землю	41
И. М. Сирота — Токи небаланса трансформаторов тока нулевой последовательности	46
С. К. Медведев — Измерение угла диэлектрических потерь при одновременном наложении постоянного и переменного напряжения	52
Д. С. Чукаев — Электрические бытовые приборы	54
Л. А. Гончарский — Электронный датчик малых смещений	62
А. И. Фюрстенберг — Измерение емкости с помощью дифференциальной схемы на выпрямителях	65
Е. И. Манаев — О длительности импульса, генерируемого реактивной спусковой схемой с катодной связью	67
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
Л. Д. Белькинд — К 150-летию опытов В. В. Петрова с электрической дугой	72
П. Г. Грудинский — Электропередача Каширская грэс—Москва	78
ДИСКУССИИ	
К статье Н. Н. Крачковского „Некоторые вопросы схем коммутации высоковольтных сетей“, Я. С. Шнейдман, Ф. П. Левин	80
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
К статье О. М. Богатырева „Определение постоянных интегрирования при решении дифференциального уравнения высокой степени“	82
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Электрооборудование высотных зданий. Централизованное питание установок высокочастотного нагрева. Отжиг резьбовых концов токами высокой частоты. Мгновенное зажигание люминесцентных ламп	83
ХРОНИКА	
Пленум правления ВНИТОЭ в Куйбышеве. Вопросы светотехники на великих стройках коммунизма. Профессор Б. Ф. Федоров. Выдающийся русский ученый электрик академик Владимир Федорович Миткевич. М. К. Поливанов	87
БИБЛИОГРАФИЯ	
В. Ю. Ломоносов — Книга „Электротехника в рисунках и чертежах“	93
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	94
Ж читательской конференции журнала „Электричество“	95



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

Адрес для телеграмм: Москва Электричество.

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

К. А. Круг

24 апреля 1952 г. скончался заслуженный деятель науки и техники, доктор технических наук Карл Адольфович Круг — старейший профессор Московского энергетического института имени Молотова, член-корреспондент Академии наук СССР.

К. А. Круг принадлежит к славной плеяде выдающихся деятелей высшего электротехнического образования в нашей стране. Он занимает почетное место в истории отечественной электротехники как один из основоположников московской электротехнической школы. Он учитель нескольких поколений русских электротехников, посвятивший полстолетия бескорыстному служению отечественной науке.

К. А. Круг родился 6 июля 1873 г. в г. Немирове (УССР) в семье агронома. Он рано лишился отца. Мать — по профессии учительница — в 1877 г. переехала в Москву; здесь прошли ученические годы и вся последующая жизнь Карла Адольфовича. Успешно окончив в 1898 г. Московское высшее техническое училище, он получил направление за границу для продолжения своего образования.

По возвращении в Москву Карл Адольфович углублял свои знания в области физики в Московском университете. В 1903 г. он получил диплом об окончании университета.

К. А. Круг был одним из организаторов электротехнической специализации в МВТУ. В 1905 г. он начал в МВТУ чтение курса «Техника переменных токов». В последующие годы Карл Адольфович читал лекции по целому ряду новых электротехнических дисциплин: Асинхронные машины. Электрические измерения. Техника высоких напряжений, Радиотехника.

Широкий научный кругозор и связь с инженерной практикой привели Карла Адольфовича к созданию новой обобщающей дисциплины «Основы электротехники». В ней излагаются с единой точки зрения главные положения учения об электричестве, являющиеся необходимой базой всех специальных электротехнических дисциплин. Первое издание одноименной книги К. А. Круга состоялось в 1916 г. С тех пор она выдержала 7 изданий и по ней учились многие тысячи инженеров-электриков.

Развитие электротехнической специализации в МВТУ привело уже в 1908 г. к постановке вопроса о создании электротехнического отделения или факультета. Но только после Великой Октябрьской социалистической революции была, наконец, осуществлена реформа электротехнического образования в соответствии с планами прогрессивной профессуры: был образован электротехнический факультет. Его деканом был избран К. А. Круг. По указанию В. И. Ленина факультету вскоре был передан дом № 29 на Горьковской улице (ныне улица Казакова); там разместились все лаборатории факультета.

Неуклонное развитие Ленинско-Сталинского плана электрификации и индустриализации Советского Союза во всей широте поставило новые требования к подготовке советских инженеров. В 1929—1930 гг.

на базе электротехнического факультета МВТУ и электропромышленного факультета Института народного хозяйства им. Плеханова был образован новый институт — Московский энергетический институт. В образовании МЭИ и в его дальнейшем развитии неизменно большую роль играл К. А. Круг.

Карл Адольфович настойчиво добивался создания научно-исследовательской базы для разработки новых электротехнических проблем и в октябре

1921 г. был учрежден Государственный экспериментальный электротехнический институт (ныне ВЭИ им. Ленина), директором которого был назначен К. А. Круг.

Все строительство ВЭИ осуществлялось под непосредственным руководством Карла Адольфовича, занимавшего до 1930 г. пост директора ВЭИ. В дальнейшем Карл Адольфович продолжал руководить одной из наиболее близких ему лабораторий, оставаясь до последних дней жизни консультантом ВЭИ.

Помимо чисто теоретических вопросов электротехники (теория электромагнитного поля, переходные процессы в электрических цепях, процессы в ртутных преобразователях) Карл Адольфович уделял большое внимание электромашиностроению. В 1911 г. вышла в свет его докторская диссертационная работа, посвя-

щенная теории круговых диаграмм асинхронных и репульсионных двигателей. В 1916 г. вышло первое и в 1928 г. — второе издание его капитального труда по асинхронным двигателям.

К. А. Круг был в течение многих лет автором и рецензентом журнала «Электричество».

Не менее плодотворной была деятельность К. А. Круга в области электрификации и энергетики. В 1918 г. была издана его монография «Электрификация Центрального промышленного района». В 1920 г. Карл Адольфович, являясь одним из активных членов ГОЭЛРО, выполнил ряд работ, опубликованных в трудах ГОЭЛРО. С 1920 по 1930 г. К. А. Круг являлся членом Госплана СССР.

В 1933 г. К. А. Круг был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. В эти годы под руководством К. А. Круга были начаты фундаментальные разработки по проблеме передачи электроэнергии постоянным током. Этой проблеме он посвятил все силы до последних дней своей жизни.

Деятельность Карла Адольфовича Круга была высоко оценена партией и правительством: в 1937 г. он был удостоен почетного звания заслуженного деятеля науки и техники РСФСР; Карл Адольфович награжден двумя орденами Ленина, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом «Знак Почета», медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне» и «В память 800-летия Москвы».

К. А. Круг умер в возрасте 78 лет. Он работал до последнего дня своей жизни. Жить для него значило работать, работать — значило жить.

Память о К. А. Круге сохраняют многие поколения советских электриков



За прочную связь научных работников с производством

На основе широко развернувшегося социалистического соревнования трудящиеся Советского Союза добиваются все более крупных успехов во всех областях развития народного хозяйства СССР. Наша социалистическая промышленность быстрыми темпами идет все дальше по пути технического прогресса.

Сооружаемые по инициативе товарища Сталина грандиозные гидроэлектростанции, каналы и оросительные системы — гордость советских людей. К великим сталинским стройкам коммунизма обращено любовное внимание всего народа; рабочие — рационализаторы и изобретатели, инженеры и техники на заводах и в научно-исследовательских лабораториях упорно и с небывалым воодушевлением решают многочисленные задачи, возникающие в ходе проектирования, конструирования и изготовления новых машин, аппаратов и материалов. Только за один истекший год в нашей стране создано около 500 новых типов машин и механизмов, в том числе мощные турбины, землесосные снаряды, землечерпалки, экскаваторы, бетономешалки и т. д.; освоено свыше 150 новых металлорежущих станков и кузнечно-прессовых машин высокой производительности. Подавляющее большинство указанных машин и механизмов оборудовано новейшими устройствами автоматики и имеет электрифицированный привод; электродвигатель — это сердце любой современной машины. За прошлый год в производство внедрены многие тысячи изобретений и рационализаторских предложений.

Три года назад, 2 апреля 1949 г., работники промышленности, деятели науки и техники города Ленинграда и Ленинградской области в письме И. В. Сталину обещали, что тесная связь и творческое содружество работников науки и производства станут законом нашего движения вперед по пути технического прогресса.

Творческое содружество работников науки и производства выросло в массовое общественное

движение. Это движение приносит значительные результаты, сказывающиеся на успешном разрешении многих текущих практических задач и в то же время на подъеме научных работ на более высокую ступень. Тесная связь ученых и производственников создает положительный эффект во многих направлениях: она способствует быстрейшему освоению выпуска новых материалов и изделий, разработке новой передовой технологии, созданию более совершенных механизмов; она содействует успешной борьбе с проявлениями консерватизма и застоя на производстве и борьбе с оторванностью научных изысканий от опыта.

Благодаря содружеству людей науки и производства в дело развития отечественной техники и промышленности включились новые творческие силы. Движение за прочную повседневную связь научных работников с производством по существу вызвало к жизни новые формы социалистического труда. Это движение как нельзя лучше демонстрирует заботу советских ученых о процветании социалистического производства, об оснащении грандиозных строительных работ, ведущихся в нашей стране, наиболее совершенными техническими средствами, о подведении под наше хозяйственное строительство передовой научной базы.

В содружестве ученых и производственников проявились лучшие черты советской технической интеллигенции, ее зрелое, сознательное отношение к задачам, поставленным большевистской партией и советским правительством в период великих сооружений коммунизма. Содружество знаменует патриотическое отношение советских ученых, советской технической интеллигенции к исторической задаче создания и развития материально-технической базы коммунизма.

За три года, прошедших после апрельского письма ленинградцев товарищу Сталину, движение за творческое содружество людей науки и производства получило дальнейшее развитие —

на заводах стали возникать комплексные бригады, в состав которых входят инженеры и конструкторы смежных цехов и передовики-стахановцы производства. Комплексные бригады разрабатывают рационализаторские предложения и содействуют налаживанию производственных процессов, в результате чего повышается производительность труда рабочих и снижаются потери. На заводе «Электросила» им. Кирова по предложению комплексной бригады (в составе электрика Нагорного, электромонтера Шленского и инспектора отдела главного энергетика Морского) был внедрен в производство агрегат для запечки роторов непосредственно в цехе. Следует отметить, что этот агрегат был построен по инициативе рабочих с использованием после переделки старых непригодных электродвигателей. Другая комплексная бригада (в составе начальника бюро гидрогенераторов Еремеева, старшего конструктора Богдавленского, заместителя начальника гидрокорпуса Шамсонова и старшего мастера сварочного отделения Зубова) изменила конструкцию ротора мощного быстроходного гидрогенератора, в результате чего сократилась трудоемкость изготовления ротора и снизилась общая себестоимость машины.

Члены секции светотехники МОНИТОЭ совместно с сотрудниками ЦНИПС разработали технические условия для устройства усовершенствованной системы электрического освещения рабочей площадки для экскаваторов СЭ-3 и с целью проверки направили свои предложения строительству Волго-Донского канала и Сталинградгидрострою. В первичной организации МОНИТОЭ на московском автозаводе им. Сталина по договору о содружестве был разработан совместно с НИИ МЭП и МЭИ им. Молотова новый вид стойкой изоляции для электрических машин. Такую же помощь оказали ученые ВЭИ им. Ленина Московскому заводу «Динамо».

Отрадно констатировать большую заинтересованность предприятий в вовлечении научных коллективов в дело изучения и разрешения насущных технических запросов производства. В 1951 г. заводом «Электросила» им. Кирова было заключено 56 договоров о совместной работе с научно-исследовательскими работниками высших учебных заведений и с видными учеными Ленинграда и Москвы. Работы по 24 темам были закончены до начала с. г. Большое место в договорах занимают темы, связанные с выполнением заказов для великих сталинских строек коммунизма. Научные сотрудники Московского энергетического института им. Молотова разработали динами-

ческую модель гидроэнергетической системы; на основе исследования этой модели завод сможет принять наилучшие решения по техническим проблемам, связанным с разработкой электрических машин для крупнейших гЭС на Волге. Сотрудники кафедры электрических машин Института приборостроения (руководитель бригады проф. Д. А. Завалишин) выполнили расчеты и эксперименты для создания надежной и быстродействующей системы возбуждения волжских гидрогенераторов. Разработку для завода ряда вопросов успешно проводит бригада Всесоюзного электротехнического института им. Ленина и Электротехнический институт Академии наук УССР (руководитель — действительный член Академии наук УССР С. А. Лебедев) и др. В совместной работе, которую вели сотрудники кафедры электротехники и электрических машин Ленинградского института точной механики и оптики (Березниковский, Гасилов и др.) с инженерами завода (Куракиным, Потаевым и др.), был успешно разрешен ряд вопросов автоматического регулирования напряжения и частоты однофазного генератора преобразовательного агрегата. Это позволило заводу заменить в таких агрегатах полуавтоматическое управление на полностью автоматизированное. Реальную помощь заводу в области разработки новейших систем автоматического управления электроприводом оказывают научные работники Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина) под руководством проф. С. А. Ринкевича.

Примеры, приведенные выше только по одному заводу «Электросила» им. Кирова, свидетельствуют о том широком размахе, какой уже приобрело движение за творческую связь научных и производственных работников. Тем важнее становится задача ликвидации еще имеющихся в этой области недостатков. На состоявшемся недавно совещании во Всесоюзном научном инженерно-техническом обществе энергетиков обсуждался технический проект гидрогенератора для крупных волжских гЭС. В совещании принимали участие представители высших научных учреждений страны, министерств и других организаций. Выполненная заводом «Электросила» им. Кирова проектная работа была в целом одобрена. Было отмечено участие в работе, в порядке творческого содружества, ряда научных коллективов; одновременно в принятом решении было указано, что отдельные группы научных сотрудников ЛЭТИ, ЛПИ и др. с опозданием выполняли принятые на себя обязательства.

Нарушение сроков при осуществлении науч-

ными работниками своих обязательств по договорам творческого содружества — это совершенно недопустимое явление, приводящее практически к срыву сроков выполнения тех производственных заданий, которые предусмотрены государственными планами по строительству и вводу мощностей. Выполняя научную работу по принятому на себя обязательству о творческом содружестве с производством, научный работник с полным сознанием своего почетного долга должен стремиться реализовать ее не только на высоком научном уровне, но и точно в срок или досрочно.

В качестве примера неправильного отношения к возможностям, которые таит движение за творческое содружество, можно отметить, что в Промэнергопроекте ни в 1950 г. ни в 1951 г. не было заключено ни одного договора о совместной работе в порядке содружества, например с ОРГРЭС, хотя научно-техническая общественность Промэнергопроекта хорошо представляла себе ценность совместных исследований некоторых научно-производственных вопросов.

Среди части инженерно-технических работников на предприятиях не изжиты еще элементы ограниченности, стремление избежать трудностей, консервативное отношение к новшествам. Нельзя, например, согласиться с ответом заместителя главного технолога завода «Электросила» им. Кирова Смирнова на корреспонденцию, опубликованную в заводской газете, по поводу изготовления электроинструмента. Начальник модельного цеха Сыкин внес предложение, чтобы потребный заводу несложный электроинструмент изготовлялся на заводе. Преимущества этого очевидны. Однако Смирнов в присланном в газету письме беспечливо ответил: «Сообщаю, что заводские цехи электроинструмент изготовлять не могут». Почему? Неужели на заводе-великане, каким является один из лучших заводов страны — завод «Электросила» им. Кирова, следует по старинке ограничиваться изготовлением лишь простого инструмента по старой номенклатуре, а весь электроинструмент ожидать со стороны. А почему не вводить постепенно и собственный ассортимент электроинструмента, начиная с несложных видов его. Помощь в этом начинании Смирнов мог бы получить в порядке творческого содружества от одного из многочисленных ленинградских институтов. Была бы, как говорится, охота!..

Советская наука — это именно та наука, которая готова служить народу, готова передать народу все завоевания науки, и работники про-

мышленности должны без колебаний пользоваться этой ценной особенностью советской науки и прибегать к творческой помощи советских ученых во всех случаях, когда собственными заводскими силами нет возможности преодолеть те или иные технические затруднения при разработке новых конструкций или при налаживании их производства. В инженерно-технической советской среде не должно быть места для ложного самолюбия, для дутого авторитета, для робости и стыдливости, приносящей в итоге делу один вред. Необходимо смело и своевременно устанавливать темы и задачи, требующие для своего решения привлечения дополнительных научных сил. С другой стороны, нельзя согласиться с попытками некоторых производственников, вступивших на путь наименьшего сопротивления, перекладывать любые, подчас мелкие простые вопросы на разрешение научно-технической общественности. Это лишь отвлекает последнюю от действительно актуальных задач и, кроме того, размагничивает внутривзаводские инженерно-технические кадры, освобождая их от глубокой, вдумчивой работы над возникающими в ходе производства вопросами.

В порядке социалистической помощи промышленности группой научных работников московских институтов проводится большая работа по внедрению высокоскоростного электропривода на ряде предприятий. Не приходится сомневаться в том, что в ходе этой совместной творческой работы были найдены некоторые оптимальные решения по вопросам, представляющим интерес для многих заводов. Повидимому, назрела проблема организации распространения опыта творческого содружества ученых и производственников; плодотворные результаты совместной деятельности работников науки и промышленности следует сделать достоянием всей научно-технической общественности и облегчить использование этих результатов другими родственными предприятиями страны.

Немало работ, выполняемых в творческом содружестве с работниками промышленности, удостоивается высокой правительственной оценки. Трансформаторы тока с новой системой компенсации, внедрение которых в производство уже дало экономию сотен тысяч килограммов меди и стали, были созданы в тесном творческом общении и труде научных сотрудников МЭИ им. Молотова, работников треста «Энергоремтрест» и завода «Электроаппарат». За эту работу ее авторы удостоены в текущем году Сталинской премии. Однако в том же институте имеются кафед-

ры, которые еще не установили должной связи с производством, не ведут совместной с работниками промышленности творческой работы по разрешению актуальных технических проблем. Можно назвать кафедру электростанций и кафедру релейной защиты и автоматизации энергетических систем, которые фактически стоят в стороне от решения крупных проблем современной энергетики. С октября прошлого года кафедра релейной защиты МЭИ им. Молотова держала под сукном договор с Гидропроектом на исследование защиты обмотки гидрогенератора от замыкания на землю. При этом нельзя не отметить, что сотрудникам кафедры было хорошо известно, что результаты исследования должны были быть учтены в важной работе, выполнявшейся для Куйбышевской гЭС. Уместно в связи с этим поставить вопрос о контроле со стороны руководства институтов и со стороны их общественных организаций за реализацией обязательств по договорам с промышленностью. Творческое содружество с производством профессорско-преподавательского состава высшей технической школы не может подвергаться риску дискредитации.

За годы сталинских пятилеток созданы тысячи первоклассных научно-исследовательских институтов, лабораторий и станций. Они получили превосходное оборудование и укомплектованы высококвалифицированными кадрами. В наших научных учреждениях и исследовательских организациях сосредоточены огромные материальные и культурные ценности. Задача состоит в том, чтобы не допустить омертвления даже ничтожной части этих ценностей: необходимо упорно бороться за то, чтобы они полностью перешли в дело, принесли конкретную пользу народному хозяйству; необходимо, чтобы наука полностью и эффективно была внедрена в жизнь.

Запросам жизни наука обязана своим ростом и раскрытием всех своих основных законов. Энгельс утверждал: «... уже с самого начала возникновения и развитие наук обусловлено производством»¹. Содействуя развитию техники, наука в то же время обогащается за счет этой техники новыми средствами исследования, которые, в свою очередь, ведут к дальнейшему росту науки. Таким образом, прогресс техники так же обусловлен помощью науки, как и прогресс последней зависит от связи с техникой.

«В стране социалистического труда, — писал академик С. И. Вавилов, — теория и практика

должны непрерывно переходить одна в другую и быть неразрывно между собою связанными»².

Давно обсуждался и был положительно разрешен вопрос о том, что тематика диссертационных работ не должна быть отвлеченной, оторванной от насущных запросов практики. Однако и в настоящее время встречаются темы диссертаций, не имеющих достаточно тесной связи с практическими нуждами народного хозяйства. Руководство высших технических учебных заведений, научные руководители кафедр должны строже следить за тем, чтобы каждая диссертационная работа, на выполнение и проверку которой затрачиваются время и труд многих высококвалифицированных специалистов, расходуются не малые государственные средства, чтобы каждая диссертационная работа удовлетворяла конкретным запросам той или иной отрасли промышленности, разъясняла и освещала четко и определенно актуальные научно-технические задачи.

Наконец, нелишне напомнить, что движение творческого содружества ученых и производственников, как добровольное движение советской научно-технической общественности, проявляющееся в форме трудовой помощи наших ученых, инженеров и техников социалистическому производству, не должно смешиваться или тем более заменяться работой по договорам ОНИР (отделов научно-исследовательских работ), существующих во многих вузах, с промышленностью. ОНИР вузов выполняют важные для промышленности экспериментальные научно-исследовательские работы и весьма полезная помощь ОНИР производству бесспорна и должна развиваться и впредь. Однако эти договорные работы ОНИР не должны заслонять внимания научных кадров и общественности высшей технической школы к задаче развития и упрочения творческого содружества ученых и работников промышленности, осуществляемого в общественном порядке, в форме добровольной трудовой помощи научных работников вузов производству. К сожалению, кое-где нет умелого сочетания этих форм совместной работы ученых и производственников, что может привести лишь к извращению самой сущности патриотического движения нашей научно-технической общественности за тесное творческое содружество с производством.

Большая роль в дальнейшем успешном развитии и укреплении творческого содружества людей науки и производства принадлежит нашей энергетической и электротехнической обществен-

¹ Ф. Энгельс. Диалектика природы. ОГИЗ, 1948, стр. 147.

² С. И. Вавилов. Наука и социалистическое производство. Электричество, № 8, 1949, стр. 4.

ности. Организации Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетиков сделали за прошедшие три года в этой области немало, но справедливость требует отметить, что организации ВНИТОЭ могли и обязаны были сделать в этом направлении куда больше того, что ими было сделано. Отделения ВНИТОЭ подходят к этой своей важнейшей области работы зачастую еще поверхностно и нередко формально. Нельзя, видимо, ограничиваться заслушиванием одних цифровых отчетов: «столько-то договоров, столько-то участников, столько-то тем, столько-то рацпредложений». Отделения ВНИТОЭ должны

глубже вникать в содержание помощи, оказываемой производству нашими учеными энергетиками и электротехниками, умело корректировать организацию этого общественного движения очищать его от любых извращений и добиваться через свои низовые организации полного и широкого внедрения оправдавших себя научно-исследовательских работ.

Нет сомнения, что социалистическое движение за крепкую связь науки и практики, за творческое содружество людей науки и производства будет и впредь служить на благо нашему народу и родной стране.



О потерях и регулировании напряжения в городских электрических сетях

Инж. Н. К. АРХИПОВ

Гипрокоммунэнерго

При проектировании и сооружении электрических сетей должно быть уделено серьезное внимание вопросам качества электроэнергетики, доставляемой потребителю. Приемники электрической энергии, как известно [Л. 1], работают с наилучшим эффектом при номинальном напряжении, поэтому отклонения от последнего характеризуют качество электроэнергии.

Попытаемся установить зависимость потерь напряжения от отклонений напряжения для городских электрических сетей при одном и двух напряжениях.

Отклонения и потери напряжения в системе одного напряжения. Пусть от какого-либо центра питания по линиям электропередачи без трансформации питается некоторое количество приемников электроэнергии. Отклонение от номинального уровня напряжения в любой точке сети определяется уравнением

$$\delta U = \delta U_n - \Delta U, \quad (1)$$

где δU_n — отклонение от номинального уровня напряжения центра питания сети; ΔU — потеря

Устанавливаются соотношения между отклонениями и потерями напряжения в системе одного и двух напряжений. Доказывается, что для расчета регулирования напряжения в городских электрических сетях неприменимы расчетные уравнения с некоторым средним коэффициентом, характеризующим режим нагрузок. Предлагается нормировать величины потерь напряжения не отдельно по сети низкого и сети высокого напряжения, а суммарно, с учетом режима напряжения питающего центра и потери напряжения в трансформаторе. Печатаются в порядке обсуждения в связи с пересмотром руководящих указаний по проектированию городских электрических сетей.

напряжения от центра питания до данной точки. Все величины в уравнении (1) выражаются в относительных единицах или в процентах.

В период максимума нагрузок напряжение на зажимах ближайшего к источнику питания приемника электроэнергии при наименьшей потере напряжения до него $\Delta U_{нм}$ не должно превышать номинальное напряжение больше чем на заданную величину $\delta U_{ом}^s$ (верхний, обычно положительный предел отклонения). Напряжение же у наиболее удаленного приемника при наибольшей потере напряжения до него $\Delta U_{нб}$ не должно быть ниже номинального напряжения больше чем на заданную величину $\delta U_{ом}^n$ (нижний, обычно отрицательный предел отклонения).

Применяя уравнение (1) к наиболее близкому и наиболее удаленному приемникам, получим:

$$\delta U_{ом}^s \geq \delta U_n - \Delta U_{нм};$$

$$\delta U_{ом}^n \leq \delta U_n - \Delta U_{нб}.$$

Из этих выражений находим:

$$\Delta U_{нб} \leq \delta U_{от}^s - \delta U_{от}^н + \Delta U_{нм}, \quad (2)$$

т. е. наибольшая допустимая потеря напряжения в сети не должна быть больше разности допустимых отклонений напряжения на зажимах приемников электроэнергии плюс потеря напряжения от источника питания до ближайшего приемника. Очевидно, если ближайший приемник присоединен к шинам центра питания, то $\Delta U_{нм} = 0$, а

$$\Delta U_{нб} \leq \delta U_{от}^s - \delta U_{от}^н.$$

Отклонение и потери напряжения в системе двух напряжений. Отклонение напряжения какой-либо точки сети от номинального уровня в рассматриваемый момент времени определяется уравнением

$$\delta U = \Sigma \delta U - \Sigma \Delta U, \quad (3)$$

где $\Sigma \delta U$ — алгебраическая сумма отклонений напряжения (в процентах или относительных единицах), создаваемых источником питания δU_n , силовым трансформатором δU_m , вольтодобавочным трансформатором высокого напряжения $\delta U_{ов}$, вольтодобавочным трансформатором низкого напряжения $\delta U_{он}$ или каким-либо другим регулирующим устройством; $\Sigma \Delta U$ — сумма потерь напряжения в цепи от центра питания до данной точки, выраженная в процентах или относительных единицах.

В системе двух напряжений величина $\Sigma \Delta U$ состоит обычно из потерь напряжения в следующих звеньях (рис. 1): а) центр питания — распределительный пункт $\Delta U_{от}$; б) распределительный пункт — трансформаторный пункт $\Delta U_{от2}$; в) понизительный трансформатор ΔU_m ; г) вторичные шины трансформаторного пункта — вольтодобавочный трансформатор низкого напряжения, а при отсутствии последнего наиболее удаленный приемник ΔU_n ; д) вторичные шины трансформаторного пункта — наиболее удаленный приемник (при наличии вольтодобавочного трансформатора низкого напряжения) — $\Delta U_{нб}$.

Обозначив через $\delta U^{(s)}$ и $\delta U^{(н)}$ соответственно верхний и нижний пределы отклонения напряже-

ния, допустимого для данной точки сети, на основании уравнения (3) можем написать:

$$\delta U^{(s)} \geq \Sigma \delta U - \Sigma \Delta U; \quad (4)$$

$$\delta U^{(н)} \leq \Sigma \delta U - \Sigma \Delta U, \quad (5)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \delta U^{(s)} &= \delta U_{от}^s + \Delta U_{нм} \\ \delta U^{(н)} &= \delta U_{от}^н \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

т. е. верхний допустимый предел отклонения напряжения в данной точке сети $\delta U^{(s)}$ может быть больше заданного отклонения напряжения на зажимах приемника $\delta U_{от}^s$ на величину потери напряжения от данной точки до ближайшего к ней приемника $\Delta U_{нм}$, а нижний допустимый предел $\delta U^{(н)} = \delta U_{от}^н$, так как обе эти величины относятся к напряжению на зажимах удаленного приемника.

Выражения (4) и (5) являются исходными для составления расчетных уравнений, с помощью которых производится расчет отклонений и регулирования напряжения в сетях с двумя и тремя напряжениями как при наличии различного рода регулирующих устройств, так и при их отсутствии.

При составлении расчетных уравнений следует учитывать, что от городских электрических сетей высокого и низкого напряжения, являющихся сетями общего пользования, питается большое количество потребителей с различными графиками нагрузки. Максимумы и минимумы этих графиков, как правило, не совпадают, поэтому отношения минимальной нагрузки к максимальной для разных звеньев сети неодинаковы. Это имеет место не только при режиме минимальных, как обычно принимают, но и при режиме максимальных нагрузок.

Заметим, что с точки зрения расчета отклонений и регулирования напряжения в сетях низкого напряжения следовало бы режимы максимальных и минимальных нагрузок понимать как такие режимы сети, при которых напряжение у потребителей достигало бы соответственно минимальных и максимальных значений. При этом последние могут не совпадать во времени с наибольшими и наименьшими потерями напряжения в предыдущих звеньях.

При определении потерь напряжения в отдельных звеньях сети необходимо наибольшие значения этих потерь в данном звене умножить на коэффициенты $k'_1, k'_2, k'_3 \dots$ и т. д., соответствующие режиму минимальных нагрузок, и $k''_1, k''_2, k''_3 \dots$ и т. д., соответствующие режиму максимальных нагрузок.

Коэффициенты k , характеризующие значение потерь напряжения в рассматриваемый момент времени, неодинаковы для разных звеньев сети (рис. 1). В большинстве случаев $k_1 > k_2 > k_3 > k_4$. Иногда при наличии слабо загруженных трансформаторов $k_3 \leq k_4$.

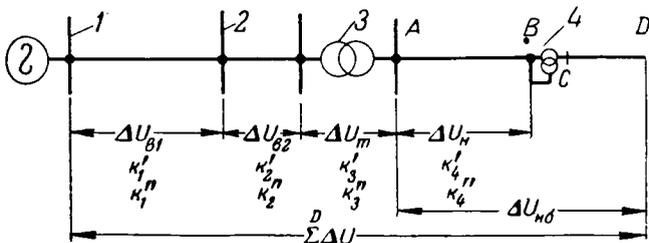


Рис. 1. Схема к расчету регулирования напряжения в городских электросетях.

1 — центр питания; 2 — распределительный пункт; 3 — трансформаторный пункт; 4 — вольтодобавочный трансформатор низкого напряжения.

Значения коэффициентов k зависят от состава потребителей, графиков и коэффициентов мощности нагрузок, а также от соотношения силовой и осветительной нагрузки во всех звеньях рассматриваемой сети. Поэтому даже для отдельного звена нельзя рекомендовать каких-либо средних значений k , пригодных во всех случаях. При проектных расчетах значение k для каждого звена в отдельности следует выбирать в зависимости от упомянутых факторов. В режиме максимальных нагрузок в ряде случаев без больших погрешностей можно принимать $k_1 \approx k_2 \approx k_3 \approx k_4 \approx 1$.

Представление о порядке численных значений коэффициентов k для минимального режима дает табл. 1. В отдельных случаях могут быть отклонения в обе стороны от приведенных в таблице значений. Например, величина k'_4 может снижаться до нуля, а k'_1 — повышаться до 0,8 зимой и до 0,6 летом.

Таблица 1

Численные значения коэффициентов k

	Летом	Зимой
k'_4	0,05 ... 0,15	0,15 ... 0,4
k'_3	0,1 ... 0,2	0,2 ... 0,5
k'_2	0,15 ... 0,25	0,25 ... 0,6
k'_1	0,2 ... 0,35	0,35 ... 0,7

В табл. 2 дана сводка расчетных уравнений, полученных из выражений (4) и (5) применительно к случаю регулирования напряжения с помощью глухих вольтодобавочных трансформаторов.

Таблица 2

Уравнения для расчета регулирования напряжения с помощью глухих вольтодобавочных трансформаторов

$$\begin{cases} \delta U'_m \leq \delta U'_A^{(e)} - \delta U'_n + (\sum^A \Delta U)' & (7) \\ \lambda'_m \geq \frac{1}{k'} (\delta U'_n + \delta U'_m - \delta U'_A - k'_3 \Delta U_m) & (8) \\ \delta U'_{\delta n} \leq \delta U'_C^{(e)} - \delta U'_n - \delta U'_m + (\sum^C \Delta U)' & (9) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta U''_m \leq \delta U''_A^{(e)} - \delta U''_n + (\sum^A \Delta U)'' & (10) \\ \lambda''_m \geq \frac{1}{k''} (\delta U''_n + \delta U''_m - \delta U''_A - k''_3 \Delta U_m) & (11) \\ \delta U''_{\delta n} \leq \delta U''_C^{(e)} - \delta U''_n - \delta U''_m + (\sum^C \Delta U)'' & (12) \\ (\sum^D \Delta U)'' \leq \delta U''_n + \delta U''_m + \delta U''_{\delta n} - \Delta U''_{om} & (13) \end{cases}$$

В уравнениях (7) и (10)

$$(\sum^A \Delta U)' = k'_1 \Delta U_{\delta 1} + k'_2 \Delta U_{\delta 2} + k'_3 \Delta U_m$$

— сумма потерь напряжения во всех звеньях сети от центра питания до точки A (рис. 1) при ре-

жиме минимальных нагрузок, а $(\sum^A \Delta U)''$ — то же но при режиме максимальных нагрузок.

В уравнении (8)

$$k' = \frac{k'_1 \Delta U_{\delta 1} + k'_2 \Delta U_{\delta 2}}{\Delta U'_g},$$

где $\Delta U'_g = \Delta U_{\delta 1} + \Delta U_{\delta 2}$;

λ'_m — предельное значение величины $\Delta U'_g$, от вечающее данному значению $\delta U'_m$.

Если значения k_1 и k_2 значительно отличаются друг от друга, то коэффициенты k' необходимо определять для каждого значения $\Delta U'_g$ в отдельности. Выражения для соответствующих величин, входящих в уравнение (11), аналогичны

В уравнениях (9) и (12) $(\sum^C \Delta U)'$ и $(\sum^C \Delta U)''$ — суммы потерь напряжения во всех звеньях цепи от источника питания до точки C соответственно при режимах минимальных и максимальных нагрузок (потерей напряжения в глухом вольтодобавочном трансформаторе пренебрегаем).

В уравнении (13) $(\sum^D \Delta U)''$ — то же, но до точки D в режиме максимальных нагрузок.

В уравнениях (7) ... (12) обычно $\delta U^{(e)} < \delta U''^{(e)}$, где

$$\begin{aligned} \delta U^{(e)} &= \delta U_{om}^e + \Delta U'_{н.м} \approx \delta U_{om}^e; \\ \delta U''^{(e)} &= \delta U_{om}^e + \Delta U''_{н.м}, \end{aligned}$$

а $\Delta U'_{н.м}$ и $\Delta U''_{н.м}$ — потери напряжения от данной точки, например A в уравнениях (7) и (8), до ближайшего к ней потребителя соответственно в режимах минимальных и максимальных нагрузок.

Посредством уравнений (7) ... (13) выражается сложная зависимость напряжения в данной точке сети от режима нагрузок отдельных звеньев последней. Уравнения В. Г. Холмского в том виде, как они представлены в его статье [Л. 2] по отношению к уравнениям (7) ... (13), являются их частными случаями. Действительно, если пренебречь уточнением, вытекающим из выражения (6), то, подставив в наши уравнения (7) ... (9)

$$k'_1 = k'_2 = k'_3 = k'_4 = k,$$

получим уравнения В. Г. Холмского для режима минимальных нагрузок. Приняв в наших уравнениях (10) ... (13)

$$k''_1 = k''_2 = k''_3 = k''_4 = 1,$$

получим уравнения В. Г. Холмского для режима максимальных нагрузок.

Таким образом, уравнения В. Г. Холмского справедливы лишь для тех частных случаев, когда коэффициенты всех звеньев рассматриваемой сети при режиме минимальных нагрузок имеют одно и то же значение, а при режиме максимальных нагрузок потери напряжения во всех звеньях имеют наибольшее значение. Поскольку, однако, в действительности $k_1 \neq k_2 \neq k_3 \neq k_4$, пользоваться

этим уравнениями нельзя, так как нет такого единственного значения k , которое было бы пригодно для всех расчетных уравнений и отвечало бы действительным условиям.

Уравнения (7)...(13) составлены применительно к схеме регулирования напряжения с помощью глухих вольтодобавочных трансформаторов. Аналогичные уравнения легко могут быть составлены на основе выражений (4) и (5) и для других схем регулирования напряжения, в том числе для системы трех напряжений. Пример применения упомянутых уравнений при рассмотрении вопроса о целесообразности применения глухих вольтодобавочных трансформаторов дан в приложении 1.

При более точных расчетах сетей с двумя и более напряжениями напряжение предыдущей степени должно быть приведено к номинальному уровню напряжения последующей расчетной степени. В приложении II выведено выражение для определения отклонения напряжения на вторичной стороне трансформатора по заданной величине отклонения на первичной стороне.

О расчетных величинах потерь напряжения. Применяя уравнение (5) к точке B (рис. 1) и приняв во внимание, что для коммунально-бытовой нагрузки можно принять $\delta U_{om}^H = -5\%$, найдем следующее выражение для суммы предельных потерь напряжения при режиме максимальных нагрузок и при отсутствии каких-либо регулирующих устройств:

$$\left(\sum \Delta U\right)'' = \delta U_n'' + \delta U_m + 5. \quad (14)$$

Величина δU_m зависит только от выбранного ответвления трансформатора. Поэтому, как это следует из уравнения (14), предельная сумма потерь напряжения для всех цепей, питающихся от данного центра и имеющих трансформаторы с одинаковыми ответвлениями, является величиной постоянной. Под цепью при этом понимаются звено высокого напряжения от источника питания, трансформатор и звено низкого напряжения, питающееся от этого трансформатора. Так как в каждой данной цепи предельная сумма потерь напряжения в звеньях высокого и низкого напряжения так же имеет постоянное значение, то, предельное значение ΔU_n будет меняться в зависимости от изменения ΔU_s .

Из сказанного следует, что рассчитывать сети по какой-либо средней величине потери напряжения, как это, например, рекомендуется действующими Руководящими указаниями [Л. 3.], неправильно. При таком расчете предельно возможная потеря напряжения в сети низкого напряжения, питающейся от трансформаторов, до которых $U_s < \Delta U_{ср}$, использована быть не может, а в сети, питающейся от трансформаторов, до которых $\Delta U_s > \Delta U_{ср}$, отклонения напряжения от номинального у отдельных приемников превысят допустимый предел. Следует считать наиболее правильным производить расчет городских электросетей по сумме потерь в сети высокого и низкого напряжения и в трансформаторе.

тросетей по сумме потерь в сети высокого и низкого напряжения и в трансформаторе.

Таблица 3

Суммы предельных потерь напряжения в зависимости от ответвления трансформатора

Ответвление, %	Величина δU_m , %	Предельная величина суммы потерь, %	Уточненное значение величины δU_m при холостом ходе трансформатора, %	
			для 400 в	для 230 в
+5	0	$\delta U_n'' + 5$	+ 0,25	- 0,43
0	5	$\delta U_n'' + 10$	+ 5,26	+ 4,54
-5	10	$\delta U_n'' + 15$	+ 10,80	+ 10,05

В табл. 3 приведены выражения для определения суммы предельных потерь напряжения в зависимости от ответвления, а также уточненные значения величины δU_m . Из табл. 3 следует, что при отклонении в режиме максимальных нагрузок от номинального уровня напряжения центра питания на $+5\%$ сумма предельных потерь напряжения составит 10, 15 и 20% в зависимости от выбранного ответвления. Подбор величины δU_m производится по формулам (7), (8), (10) и (11) (табл. 2). Критерием правильности выбора величины δU_m во всех случаях является напряжение на вторичных зажимах трансформатора, которое не должно превышать номинальное более чем на сумму

$$\delta U_{om}^{(s)} + \Delta U_{н.м.}$$

На рис. 2, 3 и 4 показана зависимость предельных потерь напряжения в сети низкого напряжения (при отклонениях у потребителя $\pm 5\%$) от режима напряжения источника питания, уда-

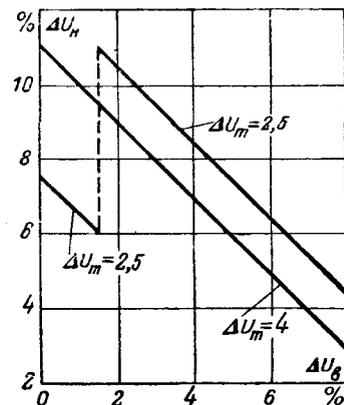


Рис. 2. Зависимость предельной величины потери напряжения в сети низкого напряжения от изменения потери напряжения в сети высокого напряжения при встречном регулировании напряжения центра питания.

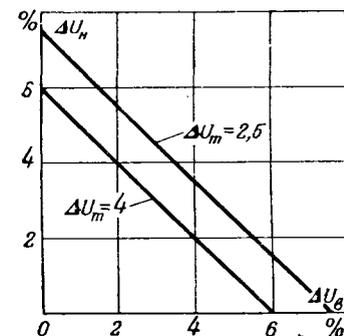


Рис. 3. Зависимость потери напряжения в сети низкого напряжения от изменения потери напряжения в сети высокого напряжения при неизменном напряжении питающего центра, поддерживаемом на уровне $+5\%$.

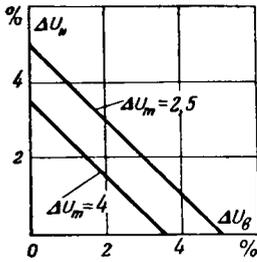


Рис. 4. Зависимость потери напряжения в сети низкого напряжения от потери напряжения в сети высокого напряжения при изменении напряжения питающего центра от +7,5 до +2,5%.

ленности трансформатора и потери напряжения в самом трансформаторе для следующих возможных режимов напряжения питающего центра:

а) в соответствии с графиком нагрузок рассматриваемой группы потребителей напряжение питающего центра изменяется от номинального (при минимуме нагрузок) до +5% (при максимуме нагрузок) — так называемое встречное регулирование (рис. 2);

б) напряжение питающего центра поддерживается неизменным на уровне +5% (рис. 3);

в) напряжение питающего центра изменяется в пределах от +7,5% (при минимуме нагрузок) до +2,5% (при максимуме нагрузок) (рис. 4).

Как следует из рис. 2, 3 и 4, наиболее целесообразным является режим а, при котором в соответствии с выражением (2) величина ΔU_n для части трансформаторов достигает наибольшего значения (11% при $\Delta U_{н.м} = 1\%$). Режим б для большей части трансформаторов менее благоприятен вследствие того, что величина ΔU_n получается на 5% меньше. При режиме в предельная величина потери напряжения в сети низкого напряжения столь незначительна, что этот режим следует отнести к числу аварийных.

Нельзя согласиться с М. К. Харчевым [Л. 4], который предлагает для шин 3...10 кВ подстанций, не снабженных регулируемыми устройствами, считать допустимым отклонения напряжения „в нормальных режимах при максимуме нагрузок не ниже +2,5% и при минимуме — не выше +7,5%. Прав И. С. Бессмертный [Л. 5], настаивающий на том, чтобы режим в в новых Правилах устройства, так же как и в действующих Правилах, рассматривался как аварийный.

О нормировании величины потери напряжения. Действующими в настоящее время Руководящими указаниями [Л. 3] для нормального режима допускается потеря напряжения в городских воздушных сетях высокого напряжения до 8%, в сетях низкого напряжения — до 6%. С учетом потери напряжения в распределительном трансформаторе, которая в зависимости от его номинальной мощности и коэффициента мощности нагрузки колеблется в пределах от 2 до 5% и более, суммарная потеря напряжения $\Sigma \Delta U$ составит 16...19%. Между тем, если исходить из отклонений $\pm 5\%$, то даже при встречном регулировании напряжения питающего центра величина $\Sigma \Delta U$ не должна превышать 15%. При других, более вероятных режимах напряжения питающего центра это расхождение будет еще больше.

Таким образом, оказывается, что в городских электрических сетях, рассчитанных в соответствии с нормами, в значительной части случаев отклонения напряжения далеко выходят за пределы $\pm 5\%$. В ряде же случаев предельная потеря напряжения в сети низкого напряжения остается неиспользованной.

Поскольку, как это было доказано выше, величина $\Sigma \Delta U$ имеет постоянное значение, то она и должна быть положена в основу нормирования потерь напряжения в городских электрических сетях двух напряжений. При этом значения суммы $\Sigma \Delta U$ и отдельных ее составляющих должны выбираться так, чтобы отклонения напряжения у потребителя не выходили за пределы $\pm 5\%$ или иные заданные пределы.

Для определения расчетной величины $\Sigma \Delta U$ необходимо предварительно подобрать ответвление трансформатора, наиболее целесообразное в данных конкретных условиях по режимам максимальной и минимальной нагрузки. При таком подходе исключается возможность механического выбора расчетной величины потери напряжения в сетях без учета режима напряжения питающих центров и потери напряжения в трансформаторах. Детальный расчет сети, включающий выбор расчетной величины потери напряжения в соответствии с конкретными условиями, приведет к практическому совпадению расчетных предположений с результатами эксплуатации.

Для трансформаторов, регулируемых под нагрузкой, при прочих равных условиях может быть допущена большая величина ΔU_n , зависящая от типа регулятора. В табл. 4 приведены рекомендуемые величины суммарной потери напряжения для двух режимов напряжения питающих центров: а) встречное регулирование в соответствии с графиком нагрузки данной группы потребителей ■ б) $\delta U_n = \text{пост.}$

Таблица 4

Рекомендуемые величины суммы потерь напряжения

Режим напряжения питающего центра	Ответвление трансформатора, %	δU_m , %	Сумма потерь напряжения, %
Встречное регулирование напряжения от номинального до +5%	-5	10	20
	0	5	15
	+5	0	10
Напряжение поддерживается постоянным	-5	10	$\delta U_n + 15$
	0	5	$\delta U_n + 10$
	+5	0	$\delta U_n + 5$

Способы регулирования напряжения. В условиях городских электросетей встречное регулирование напряжения питающего центра не может быть признано достаточным, так как графики нагрузки потребителей разнохарактерны. Особенно по своему характеру выделяются графики потребителей сети низкого напряжения общего пользования. Их требования оказываются несовместимыми с требованиями промышленных потребителей. Поэтому встречное регулирование напряжения питающего центра, производимое в соответствии с суммарным графиком нагрузки, не

принесет существенного улучшения режима напряжения в сетях низкого напряжения общего пользования. Для значительной части приемников потребуются дополнительные средства регулирования, как-то: линейные регуляторы, устанавливаемые на линиях, отходящих от центров питания или от распределительных пунктов; распределительные трансформаторы с регуляровкой напряжения под нагрузкой; конденсаторы; вольтодобавочные трансформаторы, в том числе и нерегулируемые.

Выводы. 1. Расчет городских электрических сетей по предельным значениям потери напряжения отдельно для сети высокого и для сети низкого напряжения, как это рекомендуется Руководящими указаниями [Л. 3], без учета режима напряжения питающего центра и его соответствия графику нагрузок данной группы потребителей, а также без учета изменения потерь напряжения в трансформаторах теоретически не оправдан, а на практике приводит к тому, что во многих случаях отклонения напряжения у потребителей выходят далеко за пределы $\pm 5\%$.

2. Нормировать следует не предельные значения потерь напряжения, а суммарные значения потерь напряжения в сети высокого напряжения, в трансформаторе и в сети низкого напряжения. Величина $\Sigma \Delta U$ должна выбираться в зависимости от режима напряжения питающего центра, выбранного ответвления трансформатора и наличия или отсутствия регулирующих устройств.

3. Для значительной части приемников электроэнергии поддержание напряжения в заданных пределах без регулирующих устройств или неосуществимо технически, или приводит к большому перерасходу металла на провода сети.

5. Необходимо, чтобы электропромышленность наладила серийный выпуск одноступенчатых и многоступенчатых регуляторов напряжения, вольтодобавочных трансформаторов и других регулирующих устройств для городских электросетей.

Приложение I. Пример применения уравнений (7)...(13). Исследуем возможность применения ГВТ в наименее благоприятных для них условиях — при низких значениях k в минимальном режиме нагрузок. Такие условия могут иметь место в случае осветительно-бытовой нагрузки. На основании графиков нагрузок отдельных звеньев эти условия можно охарактеризовать следующими значениями коэффициентов k (рис. 1):

$$k' = 0,25; \quad k_3' = 0,2; \quad k_4' = 0,15; \\ k'' = 0,15; \quad k_3'' = 0,1; \quad k_4'' = 0,05.$$

Первые три значения относятся к зимним графикам, последние три — к летним.

Расчет произведем для следующих режимов напряжения питающего центра:

а) встречное регулирование напряжения (например, с помощью высоковольтных вольтодобавочных трансформаторов, устанавливаемых на линиях) в соответствии с графиком нагрузок данной группы потребителей;

б) уровень напряжения питающего центра поддерживается неизменным

$$\delta U_n' \approx \delta U_n'' \approx +5\%.$$

Потерю напряжения в трансформаторе примем равной 3% , что соответствует потере напряжения в трансформаторах мощностью $20 \dots 30 \text{ кВа}$ при их номинальной актив-

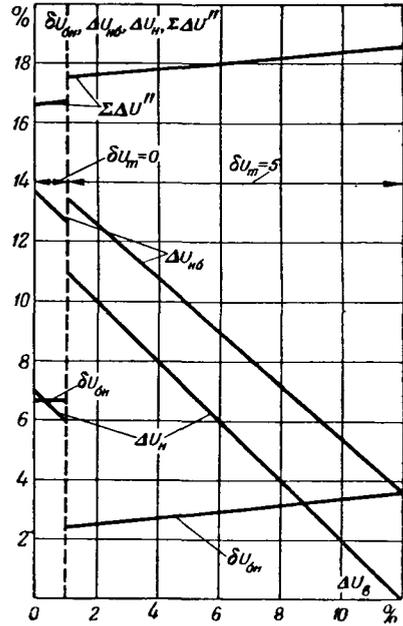


Рис. 5. Зависимость предельной потери напряжения в сети низкого напряжения без глухих вольтодобавочных трансформаторов (ΔU_n) и при их наличии ($\Delta U_n \delta$), а также суммарных потерь ($\Sigma \Delta U''$) и надбавок глухих вольтодобавочных трансформаторов (δU_n) от потери напряжения в сети высокого напряжения (ΔU_n) при встречном регулировании, $\Delta U_m = 3\%$ и выборе δU_n по условиям зимнего графика нагрузок.

ной нагрузке или в трансформаторе 100 кВа при осветительной нагрузке с небольшой долей силовой.

Значения коэффициентов k при режиме максимальных нагрузок для всех звеньев принимаем равным единице.

Расчетные уравнения (8) и (11) применительно к рассматриваемому случаю имеют вид:

$$\lambda_m' \geq 4 (\delta U_n' + \delta U_m - 5,6)$$

для зимнего графика нагрузок;

$$\lambda_m'' \geq 6,6 (\delta U_n'' + \delta U_m - 5,3)$$

для летнего графика нагрузок;

$$\lambda_m'' \geq \delta U_n'' + \delta U_m - 9$$

для зимнего и для летнего графиков.

Результаты расчета изображены графически на рис. 5...8. По оси абсцисс отложены значения суммарной потери напряжения в сети высокого напряжения при максимальной нагрузке, которая обычно имеет место зимой, а по оси ординат — значения предельных потерь напряжения в сети низкого напряжения без глухого вольтодобавочного трансформатора и при его наличии, а также суммарных потерь и надбавок глухого вольтодобавочного трансформатора.

Из рис. 5 и 6 следует, что при встречном регулировании применение глухих вольтодобавочных трансформаторов дает возможность в сетях с трансформаторами, имеющими $\delta U_m = 5\%$, повысить предельную потерю напряжения на $2,5 \dots 3,6\%$ при выборе глухого вольтодобавочного трансформатора по условиям зимнего режима и на $1 \dots 2\%$ — по условиям летнего. Для сетей низкого напряжения с трансформаторами, имеющими $\delta U_m = 0$ и применимыми при удаленностях до 1% ($\Delta U_m = 3\%$), можно выбрать глухой вольтодобавочный трансформатор с надбавкой выше 6% по условиям зимнего режима и выше 5% — по условиям летнего.

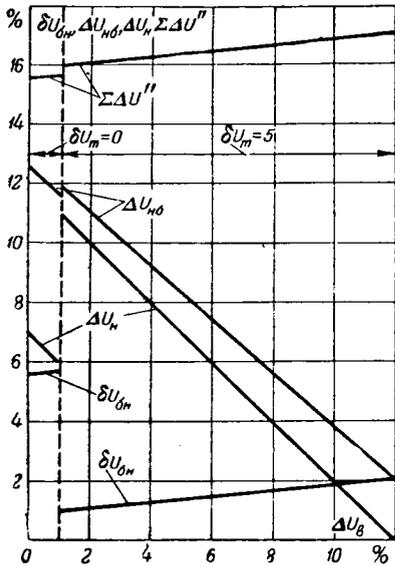


Рис. 6. Зависимость предельной потери напряжения в сети низкого напряжения без глухих вольтдобавочных трансформаторов (ΔU_n) и при их наличии ($\Delta U_{н\delta}$), а также суммарных потерь ($\Sigma \Delta U''$) и надбавок глухих вольтдобавочных трансформаторов ($\delta U_{\delta н}$) от потери напряжения в сети высокого напряжения (ΔU_{δ}) при встречном регулировании, $\Delta U_m = \pm 3\%$ и выборе $\delta U_{\delta н}$ по условиям летнего графика нагрузок.

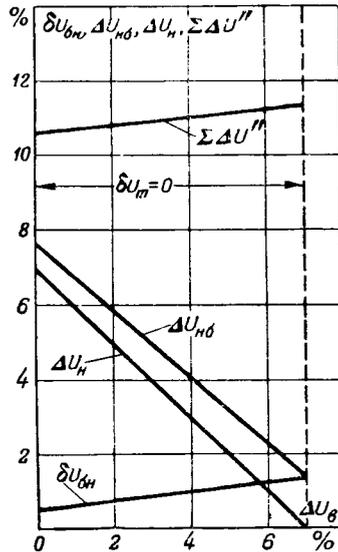


Рис. 7. Зависимость предельной потери напряжения в сети низкого напряжения без глухих вольтдобавочных трансформаторов (ΔU_n) и при их наличии ($\Delta U_{н\delta}$), а также суммарных потерь ($\Sigma \Delta U''$) и надбавок глухих вольтдобавочных трансформаторов ($\delta U_{\delta н}$) от потери напряжения в сети высокого напряжения (ΔU_{δ}) при неизменном уровне напряжения питающего центра $+5\%$, $\Delta U_m = 3\%$ и выборе $\delta U_{\delta н}$ по условиям летнего графика нагрузок.

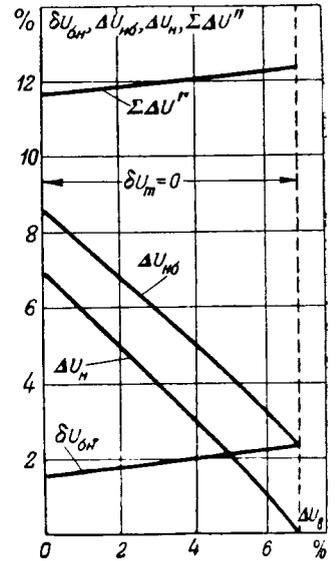


Рис. 8. Зависимость предельной потери напряжения в сети низкого напряжения без глухих вольтдобавочных трансформаторов (ΔU_n) и при их наличии ($\Delta U_{н\delta}$), а также суммарных потерь ($\Sigma \Delta U''$) и надбавок глухих вольтдобавочных трансформаторов ($\delta U_{\delta н}$) от потери напряжения в сети высокого напряжения (ΔU_{δ}) при неизменном уровне напряжения питающего центра $+5\%$, $\Delta U_m = 3\%$ и выборе $\delta U_{\delta н}$ по условиям зимнего графика нагрузок.

При неизменном уровне напряжения ($+5\%$) питающего центра применение глухого вольтдобавочного трансформатора дает возможность повысить потерю напряжения на $2 \dots 2,5\%$, если последний выбран по условиям зимнего режима, и на $1 \dots 1,5\%$ — по условиям летнего (рис. 7 и 8).

Рассмотренные примеры с полной очевидностью доказывают допустимость применения глухих вольтдобавочных трансформаторов с надбавкой порядка $2,5\%$ даже в самых неблагоприятных для них условиях. Изучение реальных графиков нагрузок отдельных звеньев сети показывает, что на практике часто встречаются условия, при которых допустимо применение глухих вольтдобавочных трансформаторов с надбавками до 5% и более.

Приложение II. Вывод выражения для отклонения напряжения на вторичной стороне трансформатора. Если к первичной обмотке нагруженного понизительного трансформатора подведено напряжение U_1 , а потеря напряжения в нем составляет $\Delta U_m\%$ от вторичного напряжения холостого хода трансформатора U_{2x} , то при выбранном ответвлении U_{om} вторичное напряжение, как известно [Л. 1]:

$$U_2 = \left(1 - \frac{\Delta U_m}{100}\right) \frac{U_{2x} U_1}{U_{om}}$$

Отклонение вторичного напряжения от номинального уровня, выраженное в процентах от номинального напряжения сети низкого напряжения, будет:

$$\delta U_2 = \frac{\left(1 - \frac{\Delta U_m}{100}\right) \frac{U_{2x} U_1}{U_{om}} - U_{2н}}{U_{2н}} \cdot 100 = \left(100 - \Delta U_m\right) \frac{U_1}{U_{1н}} \cdot \frac{U_{2x} U_{1н}}{U_{om} U_{2н}} - 100,$$

где $U_{1н}$ и $U_{2н}$ — номинальное напряжение соответственно сети высокого и сети низкого напряжения.

Пусть δU_1 — отклонение напряжения на зажимах первичной обмотки трансформатора в процентах от номинального напряжения сети высокого напряжения $U_{1н}$, а δU_m — отклонение в процентах от номинального напряжения сети низкого напряжения, имеющее место на вторичных зажимах ненагруженного трансформатора, когда к первичной его обмотке с ответвлением U_{om} подведено напряжение, равное номинальному $U_{1н}$.

Тогда:

$$\frac{U_1}{U_{1н}} \cdot 100 - 100 = \delta U_1;$$

$$\frac{U_{2x} U_{1н}}{U_{om} U_{2н}} \cdot 100 - 100 = \delta U_m.$$

Приняв во внимание последние выражения, окончательно получим:

$$\delta U_2 = \left(\frac{\delta U_1}{100} + 1\right) \left(\frac{\delta U_m}{100} + 1\right) (100 - \Delta U_m) - 100,$$

где все величины выражены в процентах.

Литература

1. А. А. Глазунов. Сети электрических систем. Госэнергоиздат, 1947.
2. В. Г. Холмский. Применение регулируемых трансформаторов различных типов в городских электрических сетях. Электричество, № 4, 1950.
3. Руководящие указания по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока. Госэнергоиздат, 1940.
4. М. К. Харчев. Выступление в дискуссии по Правилам устройства электротехнических установок. Электричество, № 9, 1950.
5. И. С. Бессмертный. Методика проектирования и расчетные показатели коммунальных электросетей. Электричество, № 10, 1951.



Профилактические испытания высоковольтных изоляторов

Кандидат техн. наук, доц. М. М. НЕКРАСОВ

Ивановский энергетический институт им. Ленина

Опыт эксплуатации показывает, что эффективность профилактических испытаний различных типов изоляторов различна: для штыревых изолято-

ров она достаточно высока, для бакелитовых — значительно ниже, а для бакелитовых мастико-наполненных и мастичных — крайне низка.

Существующая методика профилактических испытаний бакелитовых мастико-наполненных и мастичных вводов напряжением 35 кВ состоит в измерении $\operatorname{tg} \delta$ и испытании повышенным напряжением ($f=50$ Гц), а вводов 110 кВ — в измерении $\operatorname{tg} \delta$ при $f=50$ Гц и измерении распределения напряжения по фарфоровому чехлу. Измерением $\operatorname{tg} \delta$ удается установить только такие дефекты, как увлажнение, общее электрическое старение изоляции и далеко зашедшие местные дефекты бакелитовой основы. Дефекты мастичного заполнения измерением $\operatorname{tg} \delta$ не выявляются. Большинство этих дефектов также не обнаруживается и при испытании повышенным напряжением. Эти испытания дают известный результат лишь в том случае, если в полость изолятора и трещины мастики проникла влага. Измерением распределения напряжения по фарфоровому чехлу вводов 110 кВ выявляются преимущественно дефекты бакелитовой (конденсаторной) основы.

Практика эксплуатации также показывает, что после снижения аварийности, последовавшей за массовым внедрением профилактических испытаний вводов, установилась небольшая, но устойчивая их повреждаемость [Л. 1...3], которая удерживается до настоящего времени. Это означает, что дальнейшее повышение эффективности профилактических испытаний вводов 35 и 110 кВ возможно путем коренных изменений методики этих испытаний.

Определение потерь в проходных бумажно-бакелитовых изоляторах при частоте 1000...1100 Гц. В 1940 г. А. Н. Власовым в лаборатории им. А. А. Смурова ЛЭТИ были проведены опыты по определению потерь в проходных бумажно-бакелитовых изоляторах при частоте 500...1000 Гц. Эта работа проводилась с целью облегчения и удешевления испытательной установки. Кроме того, установка, работающая при частотах 500...1000 Гц, может быть сделана мало чувствительной к полям частоты 50 Гц.

В целях повышения эффективности профилактических испытаний мастико-наполненных вводов предлагается измерение $\operatorname{tg} \delta$ производить при частоте 1000...1100 Гц и применять при испытаниях повышенным напряжением при частоте 50 Гц накладные электроды (бандажи).

Измерение малых углов потерь в небольших емкостях значительно проще осуществить при более высоких частотах. В отношении моста Шеринга это

вытекает из выражения для приращения угла потерь $\Delta \operatorname{tg} \delta$, которое может быть определено гальванометром, обнаруживающим ток Δi_g :

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \frac{\Delta i_g}{2\pi fu} \times \sqrt{\left[\frac{1}{C_N} \left(1 + \frac{r_g}{r_4} \right) + \frac{1}{C_x} \left(1 + \frac{r}{n} \right) \right]^2 + \left(\frac{x_g}{C_N r_4} \right)^2}. \quad (1)$$

Здесь f — частота; u — напряжение питающего мост источника тока; C_N — емкость эталонного конденсатора; C_x — емкость испытуемого конденсатора; r_4 и r — сопротивления в схеме моста Шеринга, не зависящие от частоты; n — сопротивление шунта; r_g и x_g — активное и реактивное сопротивления нулевого указателя.

Из выражения (1) видно, что при понижении испытательного напряжения может быть сохранена такая же чувствительность нулевого указателя путем пропорционального повышения частоты. При этом снижается вес испытательного трансформатора и эталонного конденсатора и, следовательно, облегчается установка в целом.

Измерения $\operatorname{tg} \delta$ бумажно-бакелитовых вводов при частоте 500...1000 Гц, произведенные А. Н. Власовым, показали, что существует линейная зависимость между значениями $\operatorname{tg} \delta$ при $f=50$ Гц и значениями $\operatorname{tg} \delta$ при $f=500...1000$ Гц. Если увлажнение изолятора нами оценивается по увеличению $\operatorname{tg} \delta$ при $f=50$ Гц, то при $f=500...1000$ Гц будет иметь место также увеличение $\operatorname{tg} \delta$, соответствующее этой частоте.

Отклонение от линейной зависимости наблюдается при дефектных изоляторах, которые имеют относительно более высокие потери при повышенной частоте по сравнению с потерями при частоте 50 Гц. Особенно сильное влияние на угол потерь при повышенных частотах оказывают такие дефекты, как частичный пробой и высокая поверхностная проводимость. Вообще этот метод при напряжении 250 в позволяет более отчетливо определить многие дефекты.

Свою работу А. Н. Власов закончить не смог, так как погиб во время блокады Ленинграда. Недостаточность опытных данных не позволила оценить тогда все возможности предложенного им метода, и он был забыт.

Эта работа была продолжена нами. Сопоставление результатов измерения $\operatorname{tg} \delta$ при $f = 50$ гц и при 1000...1100 гц, а также сопоставление показаний индикатора частичных разрядов при испытании повышенным напряжением, имеющем частоту 50 гц, показывают, что при повышенной частоте увлажнение изоляции ввода можно оценить по относительно небольшому изменению $\operatorname{tg} \delta$. Наличие же сосредоточенных дефектов, как правило наиболее опасных, дает при частоте 1000...1100 гц резкое увеличение $\operatorname{tg} \delta$.

Для иллюстрации сказанного в табл. 1 приведены сравнительные данные показаний индикатора частичных разрядов и результатов измерений $\operatorname{tg} \delta$ при $f = 50$ гц и при $f = 1100$ гц для некоторых вводов 35 кв.

Как видно из табл. 1, нормальным показаниям индикатора частичных разрядов, обусловленным только влиянием проводов, соответствуют примерно пропорциональные значения $\operatorname{tg} \delta$ при частоте 50 гц и при частоте 1100 гц. Повышенным показаниям индикатора частичных разрядов соответствуют повышенные значения $\operatorname{tg} \delta$ при частоте 1100 гц.

Чтобы объяснить причины резкого увеличения $\operatorname{tg} \delta$ при частоте 1100 гц, при наличии частичных пробоев, расслоений диэлектрика и других неоднородностей, рассмотрим схему замещения двухслойного диэлектрика (рис. 1), используя при этом данные из [Л. 4.]

Таблица 1

Наименование вводов	Показания индикатора частичных разрядов при испытательном напряжении			$\operatorname{tg} \delta$, %	
	15 кв	20 кв	25 кв	при 50 гц	при 1100 гц
Изолятор бакелитовый с фарфоровым чехлом	1	6	17	5	2,2
Изолятор бакелитовый с фарфоровым чехлом	1	6	20	3	0,6
Изолятор бакелитовый с фарфоровым чехлом	1	6	20	5	2,6
Изолятор бакелитовый проходной	1	6	20	6	1,4
Изолятор бакелитовый проходной	2	10	20	7,4	4,4
Изолятор бакелитовый проходной	4	20	48	2,3	7,04
Изолятор бакелитовый проходной	10	33	68	2,5	6,6

Для цепи рис. 1 имеем:

$$i = i_1 + i'_1 = i_2 + i'_2; \quad (2)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dq_1}{dt} + \frac{q_1}{C_1 r_1} = \frac{dq_2}{dt} + \frac{q_2}{C_2 r_2}; \quad (3)$$

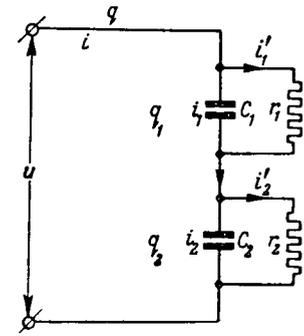


Рис. 1. Схема замещения двухслойного диэлектрика.

$$u = \frac{r_1 + r_2}{C_1 r_1} q_1 + \frac{C_1 + C_2}{C_1} r_2 \frac{dq_1}{dt}; \quad (4)$$

$$q_1 = \frac{uC_1 r_1}{r_1 + r_2} \left[1 + \frac{C_2 r_2 - C_1 r_1}{r_1 (C_1 + C_2)} e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (5)$$

где

$$\tau = \frac{(C_1 + C_2) r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Следовательно:

$$i = i_1 + i'_1 = \frac{u}{r_1 + r_2} \left[1 + \frac{(C_2 r_2 - C_1 r_1)^2}{(C_1 + C_2)^2 r_1 r_2} e^{-\frac{t}{\tau}} \right]; \quad (6)$$

$$q = \frac{u}{r_1 + r_2} t + C_0 u + k C_0 u (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (7)$$

где $k = \frac{(C_2 r_2 - C_1 r_1)^2}{C_1 C_2 (r_1 + r_2)}$ — коэффициент, характе-

ризующий неоднородность диэлектрика;

$$C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} — \text{общая емкость.}$$

При синусоидальном напряжении $u = U_m \sin \omega t$ имеем:

$$i = \frac{U_m}{r_1 + r_2} \left[\frac{a \sin \omega t}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{b \cos \omega t}{1 + \omega^2 \tau^2} - \frac{\omega k C_0 (r_1 + r_2) e^{-\frac{t}{\tau}}}{1 + \omega^2 \tau^2} \right], \quad (8)$$

где $a = 1 + \omega^2 \tau^2 + \omega^2 k C_0 \tau (r_1 + r_2)$;

$$b = \omega (r_1 + r_2) (C_0 + k C_0 + C_0 \omega^2 \tau^2);$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{a}{b} = \frac{1 + \omega^2 \tau^2 + \omega^2 k C_0 \tau (r_1 + r_2)}{\omega C_0 (r_1 + r_2) (1 + k + \omega^2 \tau^2)}. \quad (9)$$

Если принять (для упрощения) $r_1 + r_2 = \infty$, то частота, при которой $\operatorname{tg} \delta$ будет иметь максимальное значение,

$$\omega = \frac{\sqrt{1+k}}{\tau}. \quad (10)$$

Следовательно,

$$\operatorname{tg} \delta_{\max} = \frac{k}{\sqrt{k+1} + 1}, \quad (11)$$

т. е. величина $\operatorname{tg} \delta$ будет тем больше, чем больше неоднородность диэлектрика. Это положение подтверждается измерениями $\operatorname{tg} \delta$ бакелитовых вводов при частоте 1100 гц. При нормальном состоянии изоляции с увеличением частоты $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается, стремясь к определенному пределу.

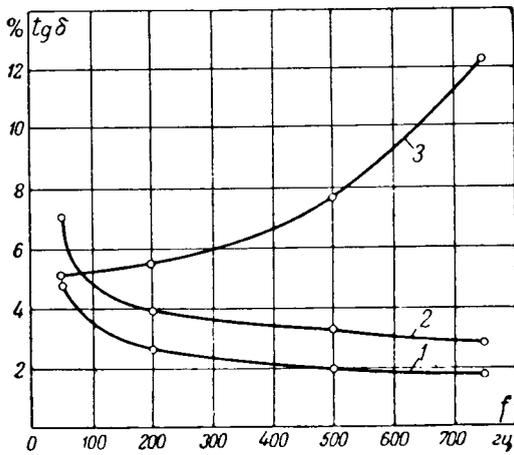


Рис. 2. Кривые зависимости $\text{tg } \delta$ от частоты при $U = 250 \text{ в}$ для бакелитовых вводов.
1 — изолятор № 1; 2 — изолятор № 2 (более увлажненный); 3 — изолятор № 3 (с частичным пробоем).

Увлажнение бакелита отмечается пропорциональным увеличением $\text{tg } \delta$. Дефекты изоляции в виде частичного пробоя и т. п. дают с увеличением частоты непропорциональное увеличение $\text{tg } \delta$ (рис. 2).

Предел изменения $\text{tg } \delta$ лежит вблизи $f = 1000 \text{ гц}$, поэтому мы и считаем целесообразным выбрать эту частоту для профилактических испытаний. Нормы браковки изоляторов можно установить и для $f = 1000 \dots 1200 \text{ гц}$. Так, для вводов 35 кВ , судя по кривой рис. 3, пригодными для дальнейшей эксплуатации можно считать изоляторы, тангенсы углов потерь которых лежат ниже пунктирной прямой.

Таким образом, уменьшение габаритов установки и веса, возможность работы при напряжениях $220 \dots 250 \text{ в}$, а также лучшая выявляемость дефектов указывают на целесообразность внедрения метода определения потерь в изоляторах при частоте 100 гц в практику эксплуатации.

Выявление сосредоточенных дефектов мастичных изоляторов и бакелитовых изоляторов с мастичным заполнением. Как отмечалось выше, большинство дефектов мастичного заполнения при испытаниях повышенным напряжением промышленной частоты не обнаруживается. Это мы объясняем тем, что вследствие неравномерности распределения потенциалов, в средней части ма-

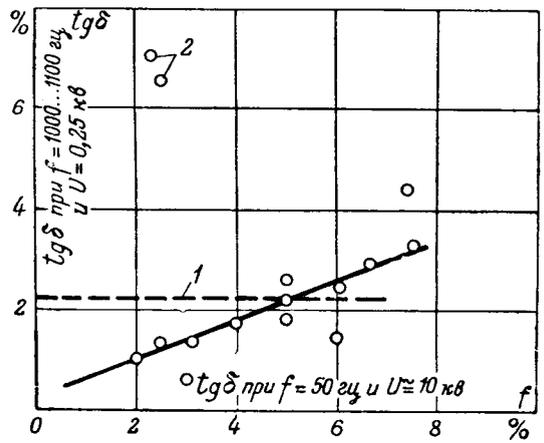


Рис. 3. Зависимость между углами потерь при $f = 50 \text{ гц}$ и $f = 1000 \dots 1100 \text{ гц}$ для проходных бумажно-бакелитовых изоляторов 35 кВ .
1 — норма браковки изоляторов по $\text{tg } \delta$ при $f = 1000 \dots 1100 \text{ гц}$; 2 — изоляторы имеют частичные пробоем.

стичного заполнения создаются градиенты, недостаточные для ионизации воздушных включений. Наиболее высокие градиенты создаются в средней части бакелитовой основы (у бандажа), однако повреждение из-за пробоя в этой части ввода — явление довольно редкое. Таким образом, чтобы выявить сосредоточенные дефекты при испытании повышенным напряжением промышленной частоты, надо создавать такое распределение потенциалов, при котором в мастичном заполнении создавались бы градиенты, достаточные для ионизации воздушных включений.

Для мастиконаполненных вводов 35 кВ это достигается применением двух накладных электродов (бандажей) между верхними ребрами чехла (рис. 4). Напряжение подводится к накладным электродам; токоведущий стержень и фланец заземляются. Начало ионизации в воздушных включениях устанавливается по показаниям индикатора частичных разрядов или дефектоскопа, или же измерением $\text{tg } \delta$.

Сравнение результатов испытаний повышенным напряжением с накладными электродами и без них (напряжение приложено к токоведущему стержню) приведено в табл. 2, из которой видно, что дефекты мастичного заполнения вводов 35 кВ хорошо выявляются при напряжении, равном при-

Таблица 2

Схема испытаний	Испытываемый объект	Показания индикатора частичных разрядов при напряжении							
		10 кВ	20 кВ	30 кВ	40 кВ	50 кВ	60 кВ	70 кВ	80 кВ
Существующая (напряжение приложено к токоведущему стержню)	Мастиконаполненный ввод 35 кВ без дефектов	0	0	0	0	1	7	16	31
	Мастиконаполненный ввод 35 кВ , имеющий дефекты мастичного заполнения	0	0	2	5	19	35	63	96
С накладными электродами (напряжение приложено к бандажам, токоведущий стержень и фланец заземлены)	Мастиконаполненный ввод 35 кВ без дефектов	0	0	0	3	7	21	40	55
	Мастиконаполненный ввод 35 кВ , имеющий дефекты мастичного заполнения	0	6	20	43	76	100	Большее 100	Значительно больше 100

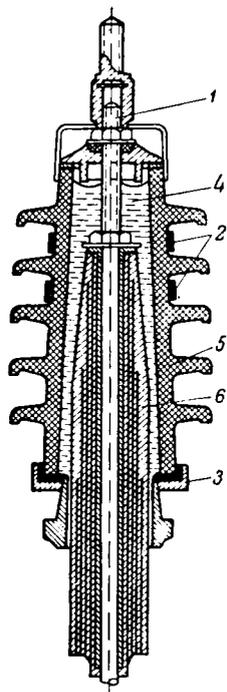


Рис. 4. Мастиконаполненный ввод 35 кВ с накладными электродами. 1 — токоведущий стержень; 2 — накладные электроды (бандажи); 3 — фланец; 4 — мастичное выполнение; 5 — фарфоровый чехол; 6 — бакелитовая (конденсаторная) основа.

мерно 50 кВ. При больших напряжениях индикатор частичных разрядов и дефектоскоп реагируют также на корону, возникающую на соединительных проводах и накладных электродах, поэтому нет надобности для вводов 35 кВ применять напряжение, превышающее 50 кВ. Измерением $\text{tg } \delta$ и испытанием повышенным напряжением при промышленной частоте и без накладных электродов мы выявляем преимущественно дефекты бакелитовой основы.

Накладные электроды можно также применять при испытании повышенным напряжением мастиконаполненных вводов 110 кВ с целью выявления сосредоточенных дефектов в мастичном заполнении. Необходимое при этом испытательное напряжение ниже 100 кВ. Накладные электроды должны выполняться более тщательно, а подводка в целях повышения коронного напряжения должна осуществляться толстыми проводами.

Выводы. 1. Опыт эксплуатации показывает, что повышение эффективности профилактических испытаний мастиконаполненных вводов может быть достигнуто только путем коренного изменения существующей методики профилактических испытаний.

2. К более эффективным методам профилактических испытаний мастиконаполненных вводов 35 и 110 кВ относятся: а) измерение $\text{tg } \delta$ при частоте $f = 1000 \dots 1100$ гц и при напряжении 220... 250 в; б) испытание повышенным напряжением при частоте 50 гц с применением накладных электродов (бандажей).

3. Измерение $\text{tg } \delta$ при частотах 1000... 1100 гц, помимо улучшения выявляемости дефектов, дает возможность пользоваться портативной легкой установкой, так как для этой цели оказывается достаточным ламповый генератор мощностью 1... 2 вт.

4. Испытание повышенным напряжением при частоте 50 гц с применением накладных электродов потребует обязательного применения индикатора частичных разрядов или дефектоскопа. Но это не является усложнением, так как существующие испытания повышенным напряжением при частоте 50 гц без применения этих приборов можно считать нецелесообразными.

Приложение. Техника измерения $\text{tg } \delta$ на частоте 1000... 1100 гц. Генератором частоты 1100 гц является ламповый генератор. Измерение $\text{tg } \delta$ при этой частоте

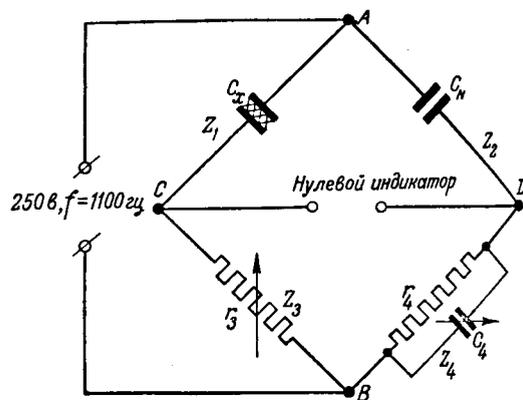


Рис. 5. Схема моста Шеринга.

можно производить теми же методами, которыми обычно проводятся измерения $\text{tg } \delta$ при частоте 50 гц.

Рассмотрим применение моста Шеринга для измерения $\text{tg } \delta$ при $f = 1000 \dots 1100$ гц.

Схема моста Шеринга с соответствующими обозначениями приведена на рис. 5. Условия равновесия моста

$$\frac{Z_1}{Z_3} = \frac{Z_2}{Z_4},$$

или

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3, \quad (1)$$

где $Z_1 = r_x - j \frac{1}{\omega C_x}$ (если диэлектрик представлен следовательно схемой замещения);

$$Z_2 = -j \frac{1}{\omega C_N}; \quad Z_3 = r_3;$$

$$Z_4 = \frac{1}{\frac{1}{r_4} + j\omega C_4} = \frac{r_4}{1 + j\omega C_4 r_4}.$$

Изменяя сопротивление r_3 и емкость C_4 , добиваемся отсутствия тока в диагонали моста; тогда по условию равновесия:

$$\left(r_x - j \frac{1}{\omega C_x} \right) \frac{r_4}{1 + j\omega C_4 r_4} = -j \frac{1}{\omega C_N} r_3.$$

Преобразуя это выражение, получим:

$$r_x r_4 \omega^2 C_x C_N - j \omega C_N r_4 = -j \omega C_x r_3 + r_3 r_4 C_x \omega^2 C_4. \quad (2)$$

Приравнявая отдельно вещественные и мнимые части найдем:

$$r_x C_N = r_3 C_4; \quad r_x = \frac{r_3 C_4}{C_N}; \quad (3)$$

$$-j r_4 C_N = -j r_3 C_x; \quad C_x = C_N \frac{r_4}{r_3}; \quad (4)$$

$$\text{tg } \delta = \omega C_x r_x = \omega C_N \frac{r_4}{r_3} \cdot \frac{r_3}{C_N} C_4 = \omega C_4 r_4. \quad (5)$$

При частоте 1100 гц параметры моста Шеринга можно взять следующие:

$$C_N = 100 \text{ мк.мкф}; \quad r_4 = \frac{10000}{2,2 \pi} = 1440 \text{ ом};$$

$$\text{tg } \delta \% = 1000 C_4; \quad C_{4(\text{макс})} = 0,05 \text{ мк.ф.},$$

так как для получения $\text{tg } \delta = 50\%$ нужно, чтобы

$$C_4 = \frac{\text{tg } \delta \%}{1000} = 0,05 \text{ мк.ф.};$$

$$r_{3(\text{мин})} = \frac{C_N r_4}{C_{x(\text{макс})}} = \frac{1440}{1000} \cdot 100 = 144 \text{ ом};$$

$$r_{3(\text{макс})} = \frac{C_N r_4}{C_{x(\text{мин})}} = \frac{1440}{50} \cdot 100 = 2880 \text{ ом}.$$

В качестве нулевого индикатора применяется ламповый индикатор [Л. 5].

Измерение можно вести по любой схеме: нормальной (заземлена точка B), перевернутой (заземлена точка A), обратной (заземлены точки C и D) и без заземления узлов моста.

При использовании для измерений обычных мостов, предназначенных для измерений $\operatorname{tg} \delta$ при частоте 50 гц, подсчет $\operatorname{tg} \delta$ производится по следующей формуле:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 r_4 = \frac{2\pi \cdot 100 C_4 \cdot 1000}{\pi} = 2,2 C_4, \quad (1,6)$$

где C_4 в мкф, или

$$\operatorname{tg} \delta \% = 220 C_4.$$

Обычно у моста Шеринга $r_4 = \frac{1000}{\pi}$.

Литература

1. А. И. Долгинов. Профилактические испытания высоковольтных изоляторов. Электрические станции, № 10, 1946.
2. А. К. Герцик. К статье т. Долгинова „Профилактические испытания высоковольтных изоляторов.“ Электрические станции, № 11, 1946.
3. Обсуждение статьи А. И. Долгинова „Профилактические испытания высоковольтных изоляторов.“ Электрические станции, № 3, 1947.
4. В. И. Коваленков. Применение теории абсорбции к расчету искусственных линий связи. Известия Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина), вып. XX, 1937.
5. Б. М. Царев. Электронные индикаторы настройки и их применение. Известия электропромышленности слабого тока, № 6, 1939.

[11. 12. 1951]



О регулировании мощности ветроэлектрической станции

Кандидат техн. наук В. Н. АНДРИАНОВ и инж. А. И. ПОКАТАЕВ

Москва

Параллельная работа ветроэлектрических станций с местной электросетью является наиболее эффективным способом использования энергии ветра для целей электрификации. Необходимым условием практического осуществления такого режима является обеспечение надежной работы ветроэлектрической станции при больших скоростях ветра.

Как показали теоретические исследования [Л. 1], а затем материалы опытной проверки [Л. 2], в районах со среднегодовой скоростью ветра до 5 м/сек устойчивость синхронного генератора при непосредственном соединении его с ветродвигателем Д-18 практически может считаться обеспеченной при любых ветровых режимах. Опасность нарушения устойчивости возникает лишь в случаях, когда мгновенная скорость ветра возрастает в 2...3 раза по сравнению с расчетной, определяющей номинальный режим (расчетная скорость ветра берется в пределах $1,5V_0 < V_{расч} < 2V_0$, где V_0 — среднегодовая скорость ветра). Повторяемость ветров с такой скоростью для указанных районов очень мала [Л. 3].

Однако скорости ветра, превышающие величину $V_{расч}$, могут быть частыми и продолжительными. Все эти случаи будут сопровождаться перегрузкой как генератора, так и ветродвигателя, поскольку центробежное аэродинамическое регулирование ветродвигателя Д-18 при синхронном режиме и жесткой связи генератора с ветродвигателем проявить своего действия не может, и ветроэлектрическая установка будет работать факти-

Показано, что при параллельной работе ветроэлектрической станции на общую сеть ограничение вращающего момента ветроколеса при повышении скорости ветра возможно с помощью электромагнитной муфты скольжения, устанавливаемой между ветроколесом и синхронным генератором. Приведены результаты опытной эксплуатации ветроэлектрической станции с ветродвигателем Д-18.

чески без регулирования [Л. 1].

Величина перегрузки быстро растет по мере увеличения разности $v - V_{расч}$ (v — мгновенная скорость). Длительные наблюдения над ветром позволили нам оценить наиболее вероятные колебания скорости ветра следующей приближенной формулой: $v - V_{ср} = 0,3V_{ср}$. Отсюда следует, что перегрузки можно ожидать при $V_{ср} \geq \frac{V_{расч}}{1,3}$, т. е. при таких средних скоростях воздушного потока, которые меньше расчетной скорости. С возможностью таких скоростей ветра, несомненно, приходится считаться. Величина ожидаемых перегрузок ветроагрегата при $V_{ср} = V_{расч}$ будет доходить до 60...70%. В тех же случаях, когда $V_{ср} > V_{расч}$, возможны еще большие перегрузки, которые являются нежелательными прежде всего для ветродвигателя, поскольку, будучи даже кратковременными, они могут явиться опасными для его механической прочности.

Следовательно, надежная работа ветроэлектрической станции, кроме обеспечения электрической устойчивости, требует разрешения вопроса об ограничении мощности на ветроколесе с целью предупреждения аварийных поломок отдельных узлов ветродвигателя при повышении скорости ветра. Эта задача является довольно трудной; она дополнительно осложняется специфическими условиями работы ветроэлектрических станций.

Как известно, ветру присущи порывистость σ_v , характеризующая колебание скорости ветра относительно средней ее величины, и изменчивость δ ,

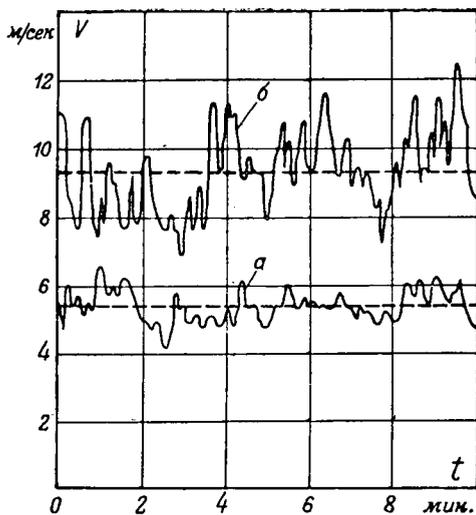


Рис. 1. Кривые, иллюстрирующие влияние изменения средней скорости ветра на его порывистость.

$a - V_{cp} = 5,4 \text{ м/сек}; \sigma_v = 0,47 \text{ м/сек}; b - V_{cp} = 9,3 \text{ м/сек}; \sigma_v = 1,24 \text{ м/сек}.$

характеризующая изменение скорости ветра за короткий промежуток времени. Обе эти величины не являются неизменными, а зависят от ряда метеорологических и местно-географических факторов, изменяющихся с течением времени.

При прочих неизменных условиях σ_v и δ зависят от V_{cp} , иллюстрацией чего могут служить две записи скорости ветра в одной и той же точке и в одни и те же часы, но в разные дни (рис. 1).

Отсутствие данных о переходных режимах ветра затрудняет разрешение вопроса о регулировании мощности ветроэлектрической станции. Однако разрешение его возможно в нескольких направлениях: 1) применение к быстроходным ветродвигателям аэродинамической передачи, предложенной А. Г. Уфимцевым и разработанной Н. В. Красовским и Б. А. Васильевым применительно к ветроэлектрическим станциям с синхронными генераторами [Л. 4]; 2) использование свойств аэродинамического саморегулирования ветродвигателя с повышенной быстроходностью [Л. 3]; 3) применение механического регулятора момента, воздействующего на установку углов стабилизатора быстроходного ветродвигателя, в зависимости от скорости ветра; 4) применение гибкой связи — муфт скольжения.

Первые два способа регулирования требуют создания новых конструктивных типов ветродвигателей, которое связано с рядом трудностей. При осуществлении третьего способа предпринимались попытки создать те или иные схемы регулирования, но эти работы не вышли за рамки предварительных опытов. В настоящее время вопрос о создании регулятора момента для ветроэлектрических станций снова привлек к себе внимание.

Особенности четвертого способа заключается в том, что с введением гибкой связи между генератором и ветродвигателем в виде муфты того или иного типа ветроколесо получает возможность работать с переменной скоростью вращения, диа-

пазон изменения которой должен быть несколько больше зоны нечувствительности собственного центробежного регулятора ветродвигателя. Муфта скольжения, передавая предельный момент, на который она рассчитана или отрегулирована, позволит удержать нагрузку генератора и ветродвигателя в пределах расчетной, а избыточная мощность на ветроколесе при любых скоростях ветра, превышающих $V_{расч}$, будет погашаться действием существующей системы регулирования ветродвигателя.

Принципиальная схема такого способа регулирования путем применения гидравлической муфты впервые была разработана в СССР при проектировании ветроэлектрической станции Д-50 мощностью 1000 кВт в 1934 г., а еще раньше была осуществлена на Балаклавской ветроэлектрической станции с асинхронным генератором мощностью 100 кВт в видоизмененной форме в виде электрического регулятора скольжения [Л. 5].

В 1948 г. А. И. Покатаевым была предложена схема регулирования с электромагнитной муфтой скольжения, являющейся одновременно муфтой соединительной и ограничительной. В пользу этого предложения говорит применимость электромагнитной муфты скольжения к ветродвигателю с существующим центробежным аэродинамическим регулированием. Практическое осуществление предложенного метода стало возможным после сооружения в Запорожском филиале ВИЭСХ опытной ветроэлектрической станции с ветродвигателем Д-18 и создания опытного образца электромагнитной муфты скольжения.

Не останавливаясь на описании принципа действия и методики расчета электромагнитной муфты скольжения, что с достаточной полнотой сделано в специальной литературе, рассмотрим вопрос о возможности применения ее как средства, позволяющего ограничивать момент, а также вопрос о соответствии ее механической характеристики специфическим требованиям, возникающим при параллельной работе ветроэлектрической станции.

В связи с тем, что установленная мощность ветроэлектрической станции и использование самого ветродвигателя могут изменяться в зависимости от ветровых условий, необходимо, чтобы номинальный момент генератора при любом аэродинамическом режиме работы ветроколеса удовлетворял условию

$$M_n \leq i M_{расч}, \quad (1)$$

где i — передаточное отношение от вала ветроколеса к валу генератора; $M_{расч}$ — расчетный момент ветродвигателя.

Если электромагнитную муфту скольжения рассчитать таким образом, чтобы ее момент в любой части характеристики от $s=0$ до $s=s_{расч} + h$ (h — нечувствительность регулятора) удовлетворял условию

$$M \leq i M_{расч}, \quad (2)$$

то этим решается задача ограничения момента, передаваемого ветродвигателем генератору при любой скорости ветра, превышающей $V_{расч}$.

Если электромагнитная муфта скольжения рассчитана так, что на участке кривой $M=f(s)$, находящемся в интервале от $s_1=s_{расч}-h$ до $s_2=s_{расч}+h$ (рис. 2),

$$\frac{dM}{ds} \rightarrow 0, \quad (3)$$

а регулятор настроен таким образом, что

$$n_{рег} = \frac{in_n}{1-s_{расч}}, \quad (4)$$

где n_n — номинальная скорость вращения генератора, то этим исключаются возможность перехода генератора в двигательный режим при падении скорости ветра, а также резкое колебание мощности ветроэлектрической станции в процессе регулирования, обусловленное наличием зоны нечувствительности регулятора.

Окончательное суждение о том, какая из характеристик наиболее приемлема для ветроэлектрической станции, должно быть сделано с учетом того, что для уменьшения веса муфты необходимо, чтобы $s_{расч}$ было минимальным. Но для того чтобы колебания мощности ветроэлектрической станции имели по возможности плавный характер, что важно в случае работы со станцией соизмеримой мощности, желательно некоторое увеличение $s_{расч}$. Кроме того, в последнем случае надо иметь в виду возможность изменения частоты системы, и тогда фактическое скольжение электромагнитной муфты в момент регулирования

$$s_{\phi} = s_{расч} \pm \delta. \quad (5)$$

Здесь δ — неравномерность хода системы.

Как видно из рис. 2, $s_{расч} = s_1 + h$. У современных ветродвигателей $h \approx 5\%$. Величина s_1 по конструктивным соображениям не может быть меньше 2,5%. С другой стороны, максимальная величина s_1 не может быть больше 25%, так как в противном случае, как показывают расчеты, начинает резко падать эффективность ветроэлектрической станции из-за увеличения потерь мощности в муфте. Кроме того, вес последней несоизмерно увеличивается. Следовательно, практически целесообразная величина $s_{расч}$ будет лежать в пределах от 7,5 до 30%.

На ветроэлектрической станции, работающей с достаточно мощной системой, когда колебания мощности ветроэлектростанции, возникающие вследствие изменчивости ветра, не могут оказать какого-либо существенного влияния на систему, может быть использована более легкая муфта с характеристикой типа *a* (рис. 2). Для такой муфты $s_{расч} = s_{макс}$. Форма кривой $M=f(s)$ правее точки $s_{расч} + h$ при стабильности частоты в мощной системе может быть произвольной.

В случае же, когда ветроэлектрическая станция должна работать с системой соизмеримой мощности, наиболее приемлемой будет муфта с характеристикой типа *б* (рис. 2).

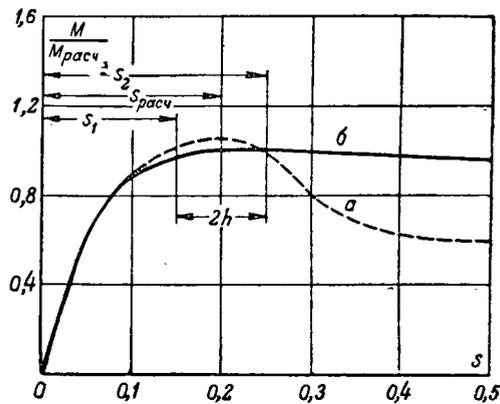


Рис. 2. Расчетные характеристики электромагнитной муфты скольжения.

Особых конструктивных затруднений при изготовлении электромагнитных муфт скольжения с необходимой характеристикой не возникает. Это будут, главным образом, муфты с якорем из двух сплошных колец, одно из которых (массивное стальное) является магнитопроводом, другое (тонкое медное) — токопроводом.

Из сказанного следует, что на ветроэлектрической станции с успехом может быть применена самая простая муфта с неизменной статической характеристикой, не требующая, как это иногда рекомендуется, регулирования возбуждения [Л. 6].

В связи с применением на ветроэлектрической станции электромагнитных муфт скольжения сле-

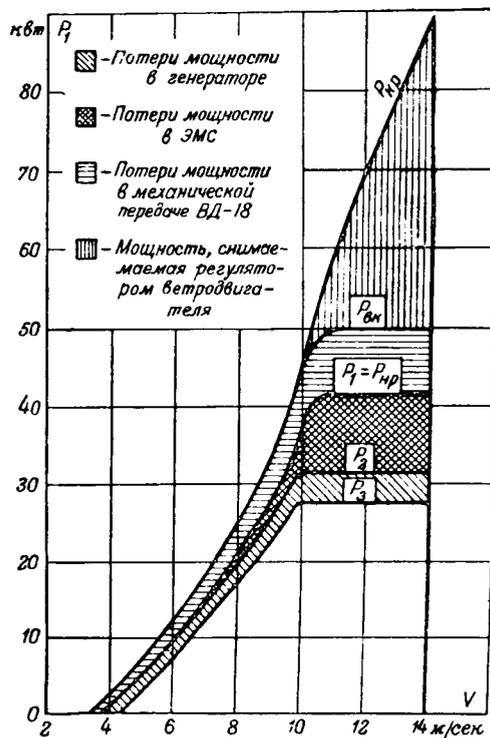


Рис. 3. Энергетический баланс ветроэлектрического агрегата.

$P_{кр}$ — мощность на крыльях ветродвигателя Д-18 при нормальном угле установки стабилизатора; $P_{вк}$ — мощность на валу ветроколеса; $P_{нр}$ — мощность на валу нижнего редуктора; P_1 — мощность на ведущем валу электромагнитной муфты скольжения; P_2 — мощность на валу генератора; P_3 — мощность на зажимах генератора.

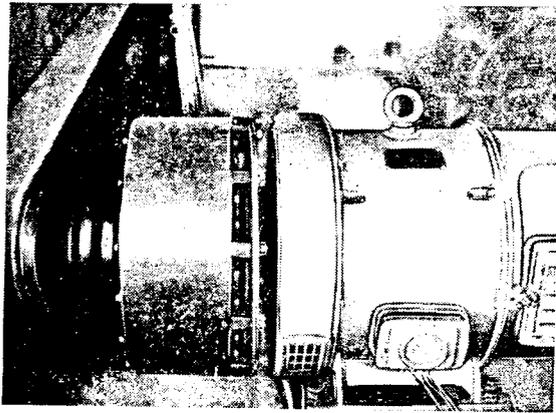


Рис. 4. Внешний вид синхронного генератора с электромагнитной муфтой скольжения.

дует рассмотреть вопрос об изменении энергетических показателей станции ввиду наличия потерь в муфте, а также вопрос о нагреве самой муфты.

На рис. 3 представлен энергетический баланс ветроэлектрической станции, построенный путем совмещения рабочих характеристик ветродвигателя Д-18 с механической характеристикой электромагнитной муфты скольжения, для которой $s_{расч}$ принято равным 20%. График, на котором даны потери в муфте при различных скоростях ветра, позволяет с помощью кривой повторяемости последних оценить годовые потери энергии в ней.

При рассмотрении энергетического баланса ветроэлектрической станции в целом следует учитывать то обстоятельство, что электромагнитная муфта скольжения, автоматически изменяя передаточное число между ветродвигателем и синхронным генератором, при некоторых скоростях ветра, меньших расчетной, может перевести ветродвигатель на более выгодные аэродинамические режимы. Благодаря этому потери в муфте в известной степени компенсируются за счет лучшего использования ветродвигателя при малых ветрах.

Муфта указанного выше типа выгодно отличается от других муфт тем, что основная доля тепла выделяется во внешнем ее элементе — якоре, нагрев которого лимитируется только условиями сохранения механической прочности при больших скоростях вращения. Для известного диапазона мощностей эти условия могут быть соблюдены в достаточной мере.

Применение электромагнитной муфты скольжения позволяет несколько выровнять пульсирующий график отдачи ветроэлектрической станции при работе ее до предела регулирования благодаря проявлению инерционных свойств ветроагрегата. Кроме того, ветроагрегат, обладая относительно большим моментом инерции и работая при переменной скорости вращения, является своего рода аккумулятором ветровой энергии. Емкость этого аккумулятора пропорциональна выражению

$$n_{рег}^2 [(1+h)^2 - (1-s_{расч})^2].$$

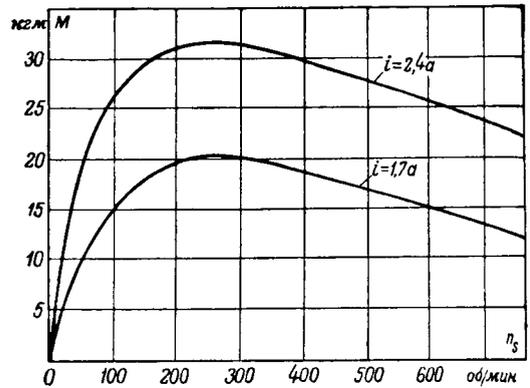


Рис. 5. Характеристики электромагнитной муфты скольжения опытной установки.

Например, величина запасенной энергии ветродвигателя Д-18 при $h=0,05$, $n_{рег} = 40 \frac{об}{мин}$ и $s_{расч} = 0,2$ составит 215 *квт·сек*. Ввиду этого наличие электромагнитной муфты скольжения позволяет ветроагрегату поддерживать отдачу ветроэлектрической станции в течение некоторого промежутка времени даже в случае резкого провала ветра вплоть до величины, соответствующей холостому ходу агрегата.

Синхронизация ветроэлектрической станции осуществляется методом самосинхронизации. Избыточный момент снимается путем перевода ветродвигателя во время пуска на сниженные аэродинамические характеристики передвижением вручную муфты регулятора [Л. 2]. Полная автоматизация процесса самосинхронизации в таких условиях затруднена.

При наличии электромагнитной муфты скольжения снятие избыточного момента осуществляется путем снижения тока возбуждения до величины, соответствующей M_0 агрегата, что легко может быть автоматизировано.

Опытное исследование регулирования мощности было произведено на ветроэлектрической станции Запорожского филиала ВИЭСХ в 1951 г при параллельной работе с мощной энергосистемой.

Опытная электромагнитная муфта скольжения разработанная А. Р. Грековым, была установлена на генераторе типа СГС-30/6 (рис. 4). Механическая характеристика этой муфты $M=f(n_s)$ представлена на рис. 5. Расчетный момент муфты был получен при токе возбуждения 2,4 а и $s_{расч} = 20\%$.

Мощность генератора записывалась регистрирующим прибором, скорость ветра и скорость вращения ветродвигателя записывались через каждые 5 *сек* с помощью электроанемометра и электротахометра.

На рис. 6а показана диаграмма мощности ветроэлектрической станции при средней скорости ветра $V_{ср} = 6 \text{ м/сек}$ и незначительной порывистости. Ветродвигатель работал на естественной характеристике, а муфта — на восходящей части своей характеристики.

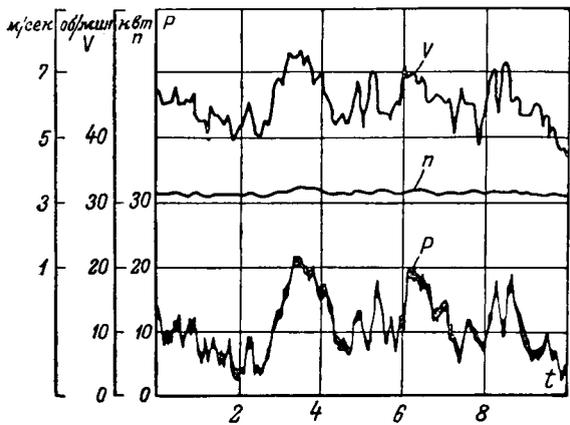


Рис. 6а. Диаграмма работы ветроэлектрической станции до предела регулирования при наличии электромагнитной муфты скольжения.

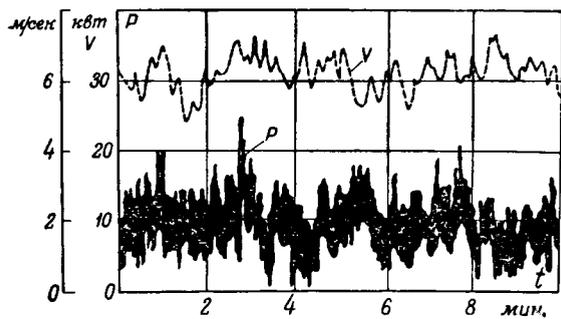


Рис. 6б. Диаграмма работы ветроэлектрической станции до предела регулирования при жесткой связи генератора и ветродвигателя.

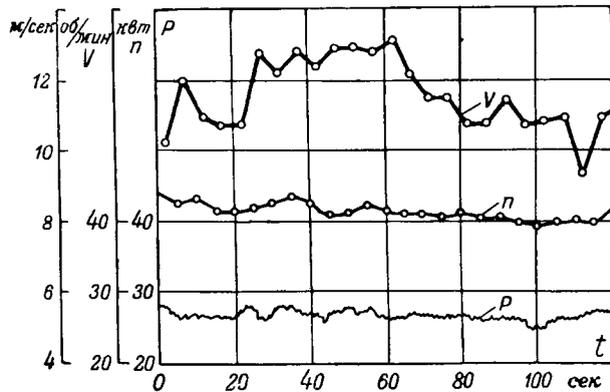


Рис. 7. Диаграмма работы ветроэлектрической станции при регулировании ($V_{cp} = 11,6$ м/сек).

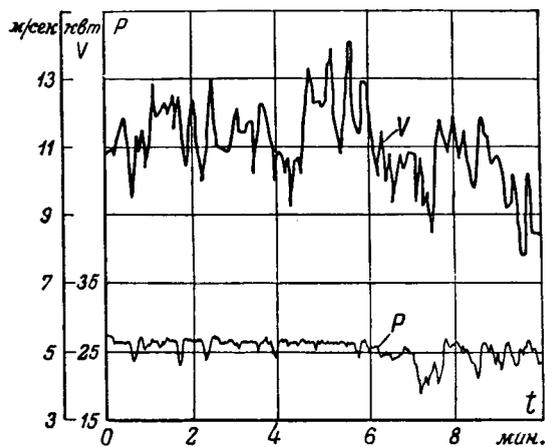


Рис. 8. Диаграмма работы ветроэлектрической станции в течение 10 мин при сильном ветре.

Колебания мощности ветроэлектрической станции, как это видно на рис. 6а, следуют одновременно за колебаниями скорости ветра. Сопоставляя диаграмму рис. 6а с диаграммой мощности, снятой при практически одинаковых ветровых условиях, но при жестком соединении генератора с ветродвигателем (рис. 6б), мы отчетливо видим сглаживающее действие маховых масс ветроколеса при наличии электромагнитной муфты скольжения.

Диаграммы мощности при регулировании и при сильном ветре ($V_{cp} \approx 11,6$ м/сек) показаны на рис. 7 и 8, из которых отчетливо видно действие электромагнитной муфты скольжения как ограничителя нагрузки. В конце диаграмм видно поддержание мощности на генераторе при провале скорости ветра и снижении числа оборотов ветродвигателя как за счет статизма регулятора, так и перехода на естественную характеристику.

Заслуживают внимания некоторые данные, полученные за месяц опытной эксплуатации ветроэлектрической станции. Выработка электроэнергии при среднемесячной скорости ветра 4,4 м/сек составила 3922 кВтч; средняя нагрузка генератора, отнесенная к общей продолжительности его работы, 12 кВт; продолжительность непрерывной работы станции с нагрузкой от 25 до 28 кВт—6 час; максимальная температура якоря муфты 200° С и обмотки возбуждения 70° С.

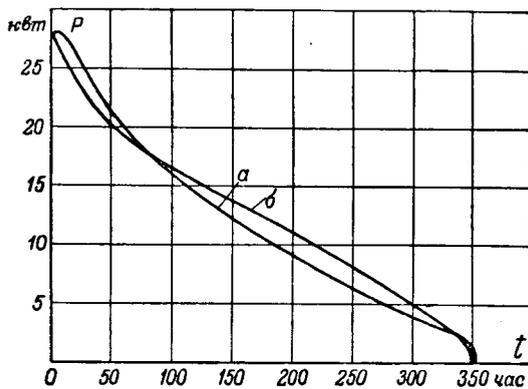


Рис. 9. Кривые обеспеченности ветроэлектрической станции с двигателем Д-18 при среднемесячной скорости ветра 4,4 м/сек. а — теоретическая; б — опытная.

В это время среднечасовые скорости ветра доходили до 10,6 м/сек, а мгновенные—до 15 м/сек.

Для сравнения на рис. 9 даны кривые обеспеченности при среднемесячной скорости ветра 4,4 м/сек: а) теоретическая—при жестком соединении генератора с ветродвигателем и б) опытная—при соединении их посредством электромагнитной муфты скольжения. Превышение фактической отдачи над теоретической при малых нагрузках объясняется тем, что энергия пульси-

рующего природного потока при одинаковых средних скоростях всегда больше энергии теоретического потока, а также тем, что электромагнитная муфта скольжения позволяет ветродвигателю работать в более выгодном аэродинамическом режиме. С увеличением нагрузки разница между фактической и теоретической отдачей постепенно уменьшается и, наконец, становится отрицательной за счет увеличения потерь в муфте, а также за счет действия регулирования, погашающего энергию порывов ветра.

Выводы. 1. Как показали опыты, применение электромагнитных муфт скольжения является одним из возможных способов решения трудной задачи ограничения вращающего момента ветродвигателя при параллельной работе с сетью связанного с ним синхронного генератора. С увеличением передаваемой мощности возрастают потери в муфте, и сохранение температуры нагрева ее частей в допустимых пределах делается все более затруднительным. Однако сравнительная простота этого способа и отсутствие каких-либо других способов, которые могли бы быть применены на практике, настоятельно требуют исследования электромагнитных муфт скольжения

с целью расширения применения их на ветряных электрических станциях.

2. Благоприятные результаты опытной эксплуатации говорят о возможности параллельной работы ветроэлектрических станций, оборудованных ветродвигателями Д-18 с неветровыми станциями. В первую очередь это должно найти применение в сельской электрификации.

Литература

1. В. Н. Андрианов. Устойчивость синхронного генератора при работе от ветродвигателя на мощную сеть. *Электричество*, № 10, 1949.

2. В. Н. Андрианов и Д. Н. Быстрицкий. О параллельной работе ветроэлектрической станции с мощной сетью. *Электричество*, № 5, 1951.

3. Е. М. Фатеев. Ветродвигатели и ветроустановка. Сельхозгиз, 1948.

4. Н. В. Красовский. Схема ветряного двигателя с аэродинамической передачей для мощностей 100...3000 квт. *Известия технического отделения АН СССР*, № 5, 1939.

5. В. Р. Секторов. Современное состояние проектирования и опытного строительства крупных ветроэлектрических станций. *Электричество*, № 2, 1933.

6. Ю. И. Аносов. Асинхронные муфты скольжения. *Электричество*, № 8, 1951.

[28. 1. 1952]



Расчет магнитных полей в зазоре явнополюсной синхронной машины

Доктор техн. наук, проф. Т. Г. СОРОКЕР, инж. И. И. ГОРЖЕВСКИЙ

НИИ МЭП

1. Магнитное поле в зазоре синхронной машины определяет собой ряд важнейших ее параметров — реактивностей, знание которых необходимо для расчета и исследования установившихся, пусковых и переходных процессов.

Поле в воздушном зазоре создается совместным действием всех обмоток. Тем не менее, полагая, как это обычно принято, магнитную проницаемость стали неизменной (и весьма большой по сравнению с проницаемостью воздуха), можно определять магнитное поле в зазоре как слагаемое из магнитных полей, созданных каждой обмоткой в отдельности.

Для расчета установившихся процессов синхронной машины требуется определить потоки в продольной оси, созданные обмотками возбуждения и якоря, а также поток в поперечной оси, созданный обмоткой якоря. Расчет пусковых или переходных процессов требует дополнительного определения потоков, обусловленных демпферной обмоткой в продольной и поперечных осях.

В настоящей работе рассмотрено определение магнитных потоков, созданных обмоткой

Приведена полная система коэффициентов, определяющих магнитные поля, созданные обмотками возбуждения, якоря и демпферной в зазоре явнополюсной синхронной машины. Даны формулы и графики для определения этих коэффициентов.

возбуждения, а также потоков основной волновой н. с. обмотки якоря в продольной и поперечной осях. Даны также

формулы для расчета полей, созданных в продольной и поперечной осях каждой парой демпферных стержней, симметрично расположенных по отношению к рассматриваемой оси. Поля, обусловленные высшими гармоническими н. с. обмотки статора, а также поля, обязанные своим происхождением зубчатому строению якоря и полюсных башмаков, здесь не рассматриваются.

2. Вопрос об определении магнитных полей в зазоре явнополюсной синхронной машины не раз рассматривался в периодической технической литературе и в монографиях по теории электрических машин.

Наибольший интерес представляет недавно опубликованная статья М. П. Костенко и Б. Е. Коники [Л. 2], в которой показаны недостатки известной работы Виземана [Л. 3] и предложены кривые для определения коэффициентов, характеризующих магнитные поля якоря.

Впервые на ошибочность данных Виземана, особенно явную для малых зазоров, было указано

М. П. Костенко [Л. 1]. Следует добавить, что некоторые из графиков Виземана весьма неудобны в практическом применении, ибо содержат семейства немонотонных причудливо изгибающихся кривых, что крайне затрудняет необходимое при работе интерполирование на глаз.

Авторы настоящей работы, на основе своей практики расчетов и исследований синхронных машин, также пришли к выводу о неудовлетворительности работы Виземана и разработали расчетные методы и графики для определения коэффициентов, характеризующих магнитные поля в зазоре явнополюсных синхронных машин. Эти методы изложены ниже. Они в некоторых пунктах отличаются от методов, принятых М. П. Костенко и Б. Е. Конином.

3. При расчете синхронных машин обычно принимают, что обмотка якоря в силу своего выполнения (распределение по пазам, укороченный шаг, дробное число пазов на полюс и фазу, иногда скос пазов или полюсных башмаков) взаимодействует (в смысле обмена энергией) только с основной волной потока в зазоре. Само собой разумеется, что сосредоточенная обмотка возбуждения взаимодействует с полным потоком в зазоре. Отсюда следует, что при расчете синхронной машины необходимо уметь определять как полные потоки, созданные всеми обмотками, так и их основные волны¹.

Все эти потоки определяются, исходя из максимальной индукции в зазоре B_m , посредством расчетных коэффициентов. Могут быть предложены различные системы коэффициентов. Обычно в расчетной практике применяются следующие коэффициенты:

а) Полный поток в зазоре, созданный обмоткой возбуждения Φ_δ , определяется посредством коэффициента α_i , равного отношению средней индукции на полюсном делении к максимальной индукции под серединой полюса B_m :

$$\alpha_i = \frac{\Phi_\delta}{B_m \tau l_i}, \quad (1)$$

где τ — полюсное деление; l_i — расчетная длина машины. Коэффициент α_i называют идеальной полюсной дугой.

Иногда вместо коэффициента α_i применяют коэффициент k_λ , предложенный Виземаном. k_λ представляет собой отношение потока в зоне полюсного башмака к полному потоку полюса и дает возможность рассчитать среднюю индукцию в зоне полюсного башмака.

б) Основная волна потока возбуждения $\Phi_{\delta 1}$ характеризуется коэффициентом

$$k_\Phi = \frac{\Phi_\delta}{\Phi_{\delta 1}}. \quad (2)$$

в) Основная волна потока якоря в продольной оси Φ_{d1} определяется коэффициентом k_d , равным

отношению потока Φ_{d1} к потоку $\Phi_{\delta 1}$ при амплитуде н. с. якоря, равной н. с. обмотки возбуждения:

$$k_d = \frac{\Phi_{d1}}{\Phi_{\delta 1}}.$$

г) Полный поток якоря в продольной оси Φ_d связан с основной волной потока якоря коэффициентом

$$k_a = \frac{\Phi_d}{\Phi_{d1}}. \quad (3)$$

Нетрудно доказать, что при принятых упрощениях существует соотношение

$$k_a = \frac{4}{\pi} k_d.$$

В силу этого достаточно вычислить только один из этих коэффициентов — k_a или k_d . В дальнейшем будем вычислять коэффициент k_a .

д) Основная волна потока якоря в поперечной оси Φ_{q1} характеризуется коэффициентом k_q , равным отношению Φ_{q1} к Φ_{d1} при одинаковых амплитудах н. с. якоря:

$$k_q = \frac{\Phi_{q1}}{\Phi_{d1}}. \quad (4)$$

4. Указанные выше 4 коэффициента (α_i , k_Φ , k_a , k_q) полностью определяют магнитное поле якоря и возбуждения и достаточны для расчета параметров установившегося режима синхронной машины, а также переходного режима машины, не имеющей демпферной клетки. Если полюсы машины снабжены демпферной клеткой, то обычно ее заменяют некоторой эквивалентной обмоткой; известны формулы для приближенного определения параметров этой обмотки [Л. 4].

Однако иногда возникает необходимость более точного рассмотрения явлений, связанных с наличием демпферной системы. В этом случае пользуются полными схемами замещения по продольной и поперечной осям [Л. 5, 6], в которых каждой паре демпферных стержней, расположенных симметрично по отношению к продольной и соответственно поперечной осям, относят особый участок или контур схемы замещения. Для расчета параметров, соответствующих участкам схемы замещения, необходимо определение магнитных потоков, созданных в зазоре каждой парой стержней, и основных волн этих потоков.

Магнитные потоки демпферных стержней в продольной и поперечной осях могут быть определены следующими коэффициентами:

б) Полный поток какой-либо k -той пары демпферных стержней (рис. 1) в продольной оси $\Phi_{\delta d}^k$ определяется коэффициентом $\alpha_{id}^{(k)}$, равным отношению средней индукции на полюсном делении к максимальной индукции, соответствующей минимальному зазору под серединой полюса B_m :

$$\alpha_{id}^k = \frac{\Phi_{\delta d}^{(k)}}{B_m \tau l_i}. \quad (5)$$

¹ Здесь и в дальнейшем под основной волной потока понимается поток основной волны нормальной составляющей индукции в воздушном зазоре.

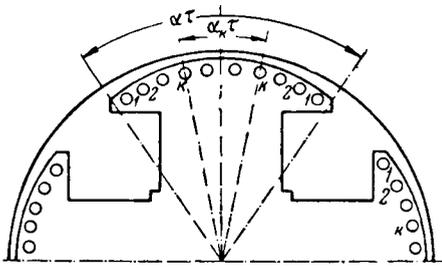


Рис. 1.

б) Основная волна потока k -той пары демпферных стержней в продольной оси $\Phi_{\partial d 1}^{(k)}$ определяется коэффициентом $k_{\partial q}^{(k)}$:

$$k_{\partial \Phi}^{(k)} = \frac{\Phi_{\partial d}^{(k)}}{\Phi_{\partial d 1}^{(k)}}. \quad (6)$$

в) Полный поток k -той пары стержней, расположенных симметрично по отношению к поперечной оси, $\Phi_{\partial q}^{(k)}$ удобнее всего можно определить, введя коэффициент $\alpha_{i q}^{(k)}$, равный отношению средней индукции на длине полюсного деления в поперечной оси к фиктивной максимальной индукции, соответствующей зазору под серединой полюса:

$$\alpha_{i q}^{(k)} = \frac{\Phi_{\partial q}^{(k)}}{B_m \tau l_i}. \quad (7)$$

г) Основная волна потока k -той пары стержней в поперечной оси $\Phi_{\partial q 1}^{(k)}$ определяется коэффициентом $k_{\partial q}^{(k)}$:

$$k_{\partial q}^{(k)} = \frac{\Phi_{\partial q 1}^{(k)}}{\Phi_{\partial d 1}^{(k)}}. \quad (8)$$

Такова полная система коэффициентов, знание которых необходимо для расчета параметров полных схем замещения в продольной и поперечной осях.

5. Для определения расчетных коэффициентов необходимо построить поля, создаваемые в зазоре явнополюсной синхронной машины обмотками статора и ротора. Форма поля зависит от распределения н. с. вдоль окружности якоря и конфигурации воздушного зазора.

Практика построения полей показала полную целесообразность разделения поля на две части: первую (главную) часть, занимающую зону полюсного башмака, и вторую (дополнительную) часть — в пространстве между полюсами. С достаточной для практики точностью можно считать, что конфигурация междуполюсного пространства не влияет на форму поля под полюсом и, наоборот, конфигурация полюсного башмака не влияет на форму поля в пространстве между полюсами.

В этом отношении наш метод полностью совпадает с методом М. П. Костенко и Б. Е. Коница [Л. 2].

Конфигурация поля в зоне полюсного башмака при заданном распределении н. с. определяется

формой полюсного башмака и характеризуется тремя относительными величинами:

- относительными шириной полюсной дуги α ;
- отношением максимального зазора под краем полюсного башмака δ_m к минимальному зазору (под серединой полюса) δ :

$$\gamma = \frac{\delta_m}{\delta};$$

- отношением минимального зазора δ к полюсному делению τ .

Обычно контур поверхности полюсного башмака образуется дугой окружности, эксцентрично расположенной по отношению к окружности якоря. Ввиду относительно малых величин зазоров индукцию в каждой точке поля можно с вполне достаточной для практики точностью рассматривать как частное от деления н. с. в данной точке на зазор. Величина зазора, или длина силовой линии в воздухе, может быть определена как отрезок радиуса окружности якоря, измеренный в данной точке между полюсом и якорем.

При принятых упрощениях главные части потоков, созданных обмотками возбуждения и якоря, в продольной оси определяются интегралом вида

$$\Phi = 2l_i \int_0^{\frac{\alpha\tau}{2}} \frac{A_x}{\delta_x} dx, \quad (9)$$

где A_x — намагничивающая сила в точке x ; δ_x — величина зазора в точке x .

Для обмотки возбуждения

$$A_x = \text{пост} = A_g.$$

Для продольного потока якоря

$$A_x = A_a \cos \frac{\pi}{\tau} x, \quad (10)$$

где A_a — амплитуда н. с. якоря.

Главные части основной волны этих потоков могут быть определены интегралом вида

$$\Phi_1 = \frac{4}{\pi} 2l_i \int_0^{\frac{\alpha\tau}{2}} \frac{A_x \cos \frac{\pi}{\tau} x}{\delta_x} dx. \quad (11)$$

Главная часть основной волны потока якоря в поперечной оси

$$\Phi_{q1} = \frac{4}{\pi} 2l_i \int_0^{\frac{\alpha\tau}{2}} \frac{A_x \sin \frac{\pi}{\tau} x}{\delta_x} dx, \quad (12)$$

где в этом случае

$$A_x = A_a \sin \frac{\pi}{\tau} x. \quad (13)$$

Для продольного потока k -той пары демпферных стержней полный поток и его основная волна

содержат только главные части, которые определяются равенствами:

$$\Phi_{\partial a}^k = 2l_i \int_0^{\frac{\alpha_k \tau}{2}} \frac{A_{\partial}^k}{\delta_x} dx; \quad (14)$$

$$\Phi_{\partial d1}^k = \frac{4}{\pi} 2l_i \int_0^{\frac{\alpha_k \tau}{2}} \frac{A_{\partial}^k \cos \frac{\pi}{\tau} x}{\delta_x} dx, \quad (15)$$

где A_{∂}^k — н. с. k -той пары демпферных стержней; α_k — относительное расстояние между рассматриваемыми стержнями (рис. 1).

Главные части поперечного потока k -той пары демпферных стержней и его основной волны определяются формулами:

$$\Phi_{\partial q}^k = 2l_i \int_{\frac{\alpha_k \tau}{2}}^{\frac{\alpha \tau}{2}} \frac{A_{\partial}^k}{\delta_x} dx, \quad (16)$$

$$\Phi_{\partial q1}^k = \frac{4}{\pi} 2l_i \int_{\frac{\alpha_k \tau}{2}}^{\frac{\alpha \tau}{2}} \frac{A_{\partial}^k \sin \frac{\pi}{\tau} x}{\delta_x} dx. \quad (17)$$

Таким образом, для определения главной части потоков необходимо знать функцию δ_x .

Обычно [Л. 2, 5, 6] эту функцию задают в виде параболы:

$$\delta_x = \delta \left[1 + (\gamma - 1) \left(\frac{2x}{\alpha \tau} \right)^2 \right].$$

Практически лучшее приближение можно получить, задавая функцию δ_x в виде отрезка синусоиды, имеющей период 2τ :

$$\delta_x = \delta \left[1 + (\gamma - 1) \frac{1 - \cos \frac{\pi}{\tau} x}{1 - \cos \frac{\pi}{2} \alpha} \right]. \quad (18)$$

Такое приближение имеет еще и то преимущество, что позволяет легко взять интегралы (9), (11) и т. д. для всех указанных выше видов функции A_x и для решения не требует разложения в ряд.

6. Для междуполюсного пространства невозможно подобрать какую-либо функцию δ_x , одинаковую для всех видов распределения н. с. (A_x), которая позволила бы определять поля интегралами вида (9), (11) и (12).

Поэтому здесь приходится решать задачу посредством графического построения полей с последующим подбором соответствующего выражения для величины потока или основной волны потока.

Задача определения полей в пространстве между полюсами облегчается тем, что эти поля малы по сравнению с главной частью поля, в

особенности для продольных н. с. Поэтому построение полей в междуполюсном пространстве может быть произведено с меньшей точностью.

Построения этих полей показали, что поле в пространстве между полюсами весьма мало зависит от формы краев полюсных башмаков (см. также [Л. 2]). Поэтому форма поля определяется только распределением н. с. A_x и отношением максимального зазора (под краем полюсного башмака) к расстоянию между соседними полюсными башмаками $\frac{\delta_m}{\tau(1-\alpha)}$.

В результате анализа полей удалось подобрать функции, которые с достаточной точностью позволяют определить дополнительные потоки для различных видов н. с.

Соответствующие формулы даны в приложении.

Следует отметить, что подобранные формулы для всех потоков, за исключением Φ_{a1} , Φ_a и Φ_{d1} , соответствуют в междуполюсном пространстве некоторым эквивалентным равномерным зазорам.

Для продольной оси (поток Φ_a) этот зазор

$$\delta_{ad} = 1,5 \delta_m + \frac{\tau(1-\alpha)}{4}.$$

Для поперечной оси (потоки Φ_{q1} , Φ_{dq} , Φ_{dq1})

$$\delta_{aq} = 1,2 \delta_m + \frac{\tau(1-\alpha)}{5}.$$

Для потоков Φ_{a1} , Φ_a и Φ_{d1} такой простой зависимости подобрать не удалось.

7. При уменьшении зазора под серединой полюса (т. е. параметра $\frac{\delta}{\tau}$) относительная величина потоков в междуполюсном пространстве уменьшается, и в пределе, при $\frac{\delta}{\tau} \rightarrow 0$, она также стремится к нулю. Поэтому является целесообразным определить по указанным выше интегралам предельные значения расчетных коэффициентов при $\frac{\delta}{\tau} \rightarrow 0$.

Расчеты показали, что все расчетные коэффициенты могут быть представлены как суммы (разности) главной, предельной части и дополнительной, малой части. Последнюю, дополнительную часть во всех случаях удалось представить в виде функции только двух параметров. Это позволило построить для коэффициентов простые и удобные для интерполирования графики, приведенные на рис. 3...5.

Для коэффициента α_i оказалось возможным аппроксимировать полученное при помощи инте-

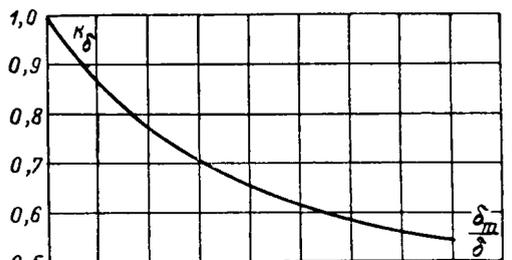


Рис. 2.

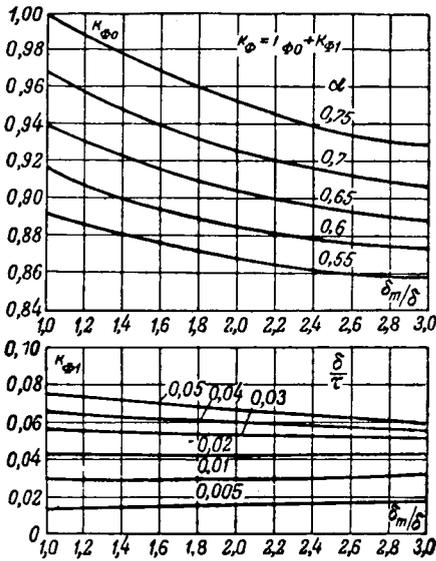


Рис. 3.

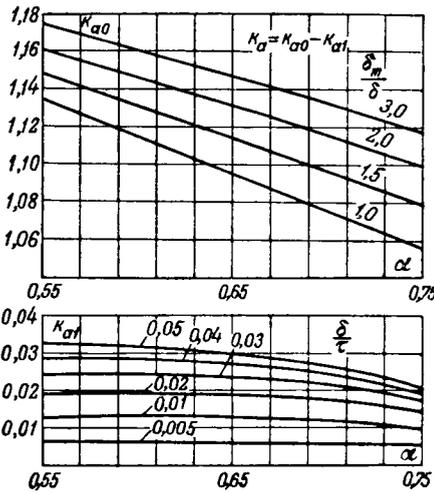


Рис. 4.

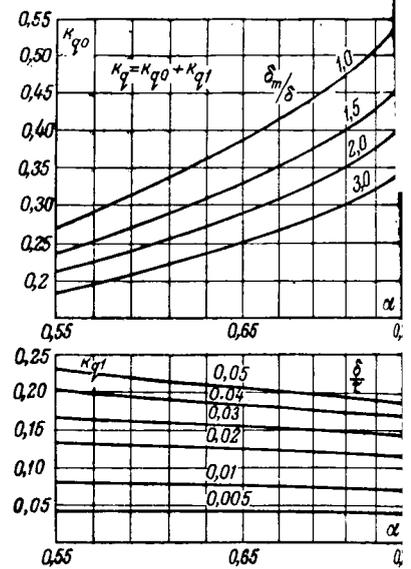


Рис. 5.

графа (9) решение произведением α на функцию k_δ , зависящую только от $\frac{\delta_m}{\delta}$ (приложение). График этой функции представлен на рис. 2.

На рис. 3, 4 и 5 главная „предельная“ часть коэффициентов (соответствующая полю в зоне полюсного башмака) нанесена на верхних графиках. Как и следовало ожидать, значения коэффициентов, найденные по этим графикам, весьма близки к значениям, которые можно вычислить по данным М. П. Костенко и Б. Е. Коники (для кривых $\frac{\delta}{\tau} = 0$). Дополнительная часть коэффициентов, соответствующая полю в междуполюсном пространстве, нанесена на нижних графиках.

Все графики рис. 3, 4 и 5 выполнены для значений: α — в пределах от 0,55 до 0,75; $\frac{\delta_m}{\delta}$ — в пределах от 1,0 до 3,0 и $\frac{\delta}{\tau}$ — в пределах от 0 до 0,05, что практически охватывает все встречающиеся конфигурации воздушного зазора явнополюсных синхронных машин.

В заключение отметим, что для главных частей коэффициентов существует соотношение $k_q = \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \frac{k_\Phi}{k_a} - 1$, которое легко может быть установлено из выражений для потоков.

Приложение. 1. Положим в дальнейшем н. с. обмотки возбуждения A_δ и каждой пары демпферных стержней $A_\delta^{(k)}$ равными единице. Амплитуду н. с. обмотки якоря A_a также положим равной единице.

Каждый поток или основную волну потока представим как сумму главной части, обозначив ее индексом (0), и дополнительной части — индекс (Δ).

Таким образом, полный поток обмотки возбуждения

$$\Phi_\delta = \Phi_\delta^{(0)} + \Phi_\delta^{(\Delta)}$$

Аналогичные равенства могут быть написаны для всех остальных потоков.

В соответствии с уравнениями (9) и (18) для главной части потока возбуждения получим:

$$\Phi_\delta^{(0)} = \frac{4}{\pi} \frac{I_i \tau}{\delta} \frac{\operatorname{tg} \frac{\pi}{4} \alpha}{\sqrt{\frac{\gamma}{\cos^2 \frac{\pi}{4} \alpha} - 1}} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\gamma}{\cos^2 \frac{\pi}{4} \alpha} - 1}$$

Для дополнительной части потока возбуждения найдено:

$$\Phi_\delta^{(\Delta)} = \frac{4I_i}{1 + \frac{6\delta_m}{\tau(1-\alpha)}}$$

Отсюда согласно (1):

$$a_i = \frac{4}{\pi} \frac{\operatorname{tg} \frac{\pi}{4} \alpha}{\sqrt{\frac{\gamma}{\cos^2 \frac{\pi}{4} \alpha} - 1}} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\gamma}{\cos^2 \frac{\pi}{4} \alpha} - 1} + \frac{4 \frac{\delta}{\tau}}{1 + 6 \frac{\delta}{\tau} \frac{\gamma}{1-\alpha}}$$

Для $\gamma = 1 \dots 3$ и $\alpha = 0,5 \dots 0,8$ с весьма большой точностью справедливо равенство

$$\begin{aligned} \frac{4}{\pi} \frac{\operatorname{tg} \frac{\pi}{4} \alpha}{\sqrt{\frac{\gamma}{\cos^2 \frac{\pi}{4} \alpha} - 1}} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{\gamma}{\cos^2 \frac{\pi}{4} \alpha} - 1} &= \\ &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \sqrt{\frac{4}{3} \gamma - 1} \quad \alpha = k_\delta a. \end{aligned}$$

Таким образом,

$$a_i = \alpha k_\delta + \frac{4 \frac{\delta}{\tau}}{1 + 6 \frac{\delta}{\tau} \frac{\gamma}{1-\alpha}}$$

График коэффициента k_δ приведен на рис. 2. Коэффициент k_λ определяется из выражения

$$k_\lambda = k_\delta \frac{a}{a_i}$$

Посредством этого коэффициента находят среднюю индукцию в зоне полюсного башмака $B_\lambda = \frac{\Phi k_\lambda}{a\tau l_i}$, где Φ — полный расчетный поток машины.

В этом случае расчетный воздушный зазор должен быть вычислен по формуле $\delta_{cp} = \frac{\delta}{k\delta}$.

2. Основная волна потока возбуждения

$$\Phi_{\delta 1} = \Phi_{\delta 1}^{(0)} + \Phi_{\delta 1}^{(\Delta)},$$

где $\Phi_{\delta 1}^{(0)}$ в соответствии с уравнениями (11) и (18) равен

$$\Phi_{\delta 1}^{(0)} = \frac{4}{\pi} \left[\frac{\gamma - \cos \frac{\pi}{2} \alpha}{\gamma - 1} \Phi_s^0 - \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2} \alpha}{\gamma - 1} \frac{l_i \tau}{\delta} \alpha \right].$$

$\Phi_{\delta 1}^{(\Delta)}$ найдено в виде:
$$\Phi_{\delta 1}^{(\Delta)} = \frac{4}{\pi} l_i \frac{3 \cos \frac{\pi}{2} \alpha}{1 + 6 \frac{\delta}{\tau} \frac{\gamma}{1 - \alpha}}.$$

Отсюда согласно определению (2) рассчитаны значения коэффициента k_Φ (рис. 3).

3. Поток якоря в продольной оси $\Phi_d = \frac{\pi}{4} \Phi_{\delta 1}$, что

легко показать на основании принципа взаимности.

4. Основная волна потока якоря в продольной оси

$$\Phi_{d1} = \Phi_{d1}^{(0)} + \Phi_{d1}^{(\Delta)},$$

где в соответствии с (10), (11) и (18)

$$\Phi_{d1}^{(0)} = \frac{\gamma - \cos \frac{\pi}{2} \alpha}{\gamma - 1} \Phi_{\delta 1}^{(0)} - \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2} \alpha}{\gamma - 1} \frac{8}{\pi^2} \sin \frac{\pi}{2} \alpha \frac{l_i \tau}{\delta}.$$

Для $\Phi_{d1}^{(\Delta)}$ найдено:

$$\Phi_{d1}^{(\Delta)} = \frac{4}{\pi} l_i \frac{3 \cos^2 \frac{\pi}{2} \alpha}{1 + 6 \frac{\delta}{\tau} \frac{\gamma}{1 - \alpha}}.$$

По этим формулам в соответствии с (3) найдены значения коэффициента k_a (рис. 4).

5. Основная волна потока якоря в поперечной оси

$$\Phi_{q1} = \Phi_{q1}^{(0)} + \Phi_{q1}^{(\Delta)},$$

где в соответствии с (12), (13) и (18)

$$\Phi_{q1}^{(0)} = \frac{4}{\pi} \Phi_s^{(0)} - \Phi_{d1}^{(0)},$$

а $\Phi_{q1}^{(\Delta)}$ найдено в виде:

$$\Phi_{q1}^{(\Delta)} = \frac{2}{\pi} \left[1 + \frac{\sin \pi \alpha}{\pi(1 - \alpha)} \right] \frac{5l_i}{1 + 6 \frac{\delta}{\tau} \frac{\gamma}{1 - \alpha}}.$$

Отсюда согласно (4) определены значения коэффициента k_q (рис. 5).

6. Продольный поток k -той пары демпферных стержней

(рис. 1) содержит только главную часть, и на основании (14), (18) и (5)

$$a_{i\delta}^k = \frac{4}{\pi} \frac{\operatorname{tg} \frac{\pi}{4} \alpha}{\sqrt{\frac{\gamma}{\cos^2 \frac{\pi}{4} \alpha} - 1}} \times \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left\{ \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_k \pi}{4}}{\operatorname{tg} \frac{\pi}{4} \alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\cos^2 \frac{\pi}{4} \alpha} - 1} \right\}.$$

Для основной волны потока k -той пары демпферных стержней согласно (15) и (18)

$$\Phi_{\delta d}^k = \frac{4}{\pi} \left[\frac{\gamma - \cos \frac{\pi}{2} \alpha}{\gamma - 1} \Phi_{\delta d}^k - \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2} \alpha}{\gamma - 1} \frac{l_i \tau}{\delta} \alpha_k \right];$$

отсюда легко вычислить согласно (6) коэффициент $k_{\delta\Phi}^k$.

7. Поперечный поток пары демпферных стержней содержит главную часть и добавочную, причем последняя, очевидно, одинакова для всех пар стержней:

$$\Phi_{\delta q}^{(k)} = \Phi_{\delta q}^{(k0)} + \Phi_{\delta q}^{(\Delta)},$$

где в соответствии с (16) и (18)

$$\Phi_{\delta q}^{(k0)} = \Phi_s^{(0)} - \Phi_{\delta d}^{(k)}, \quad \text{а} \quad \Phi_{\delta q}^{(\Delta)} = \frac{5l_i}{1 + 6 \frac{\delta}{\tau} \frac{\gamma}{1 - \alpha}}.$$

Отсюда согласно (7) легко может быть вычислен коэффициент $a_{i\Phi}^k$.

Для основной волны потока k -той пары демпферных стержней

$$\Phi_{\delta q1}^{(k)} = \Phi_{\delta q1}^{(k0)} + \Phi_{\delta q1}^{(\Delta)},$$

где согласно (17) и (18)

$$\Phi_{\delta q1}^{(k0)} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\tau l_i}{\delta} \frac{1 - \cos \frac{\pi}{2} \alpha}{\gamma - 1} \times \frac{\gamma \left(1 - \cos \frac{\pi}{2} \alpha \right)}{\gamma \left(1 - \cos \frac{\pi}{2} \alpha_k \right) + \left(\cos \frac{\pi}{2} \alpha_k - \cos \frac{\pi}{2} \alpha \right)},$$

а

$$\Phi_{\delta q1}^{(\Delta)} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\cos \frac{\pi}{2} \alpha}{1 - \alpha} \frac{5l_i}{1 + 6 \frac{\delta}{\tau} \frac{\gamma}{1 - \alpha}};$$

отсюда в соответствии с (8) может быть получен коэффициент $k_{\delta q}^{(k)}$.

Литература

1. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть. Госэнергоиздат, 1949.
2. М. П. Костенко и Б. Е. Коник. Определение основной и третьей гармоники поля якоря и поля полюсов явнополюсной синхронной машины. Электричество, № 3, 1951.
3. R. W. Wieseman. Graphical Determination of Magnetic Fields (Practical Applications to Salient Pole Synchronous Machine Design). Transactions AIEE, p. 141, 1927.
4. А. Е. Алексеев и М. П. Костенко. Турбогенераторы. Госэнергоиздат, 1939.
5. Т. М. Linville. Starting Performance of Salient Pole Synchronous Machines. Transactions AIEE, p. 531, 1930.
6. A. W. Rankin. The Direct and Quadrature-Axis Equivalent Circuits of the Synchronous Machine. Electrical Engineering, v. 64, p. 861, 1945.



Автоматическое регулирование скорости короткозамкнутых трехфазных асинхронных двигателей

Кандидат техн. наук А. Г. ИВАХНЕНКО

Институт электротехники Академии наук Украинской ССР

Введение. Автоматическое регулирование скорости отличается наличием замкнутого цикла передачи воздействия; двигатель—регулятор—двигатель. По принципу осуществления замкнутого цикла можно различить два основных вида регуляторов: а) компенсационные, реагирующие на отклонения скорости от заданного значения (принцип Ползунова—Уатта), и б) компаундирующие регуляторы, реагирующие на изменение какой-либо величины, связанной с тем или другим возмущающим воздействием, например с моментом нагрузки двигателя (принцип Понселе). Известно много схем регуляторов скорости асинхронных двигателей, использующих тиратроны или магнитные усилители [Л. 1 и 2]. Они основаны на принципе чистого компаундирования, так как реагируют на изменение момента нагрузки или связанных с ним величин тока, напряжения и скорости двигателя. Эти схемы имеют тот недостаток, что они поддерживают заданное значение скорости только при изменении момента нагрузки. Влияние других возмущений (напряжения и частоты питания, изменения внутренних параметров системы) не устраняется. В отличие от этого рассматриваемые ниже схемы с магнитными усилителями осуществляют компенсационный или принцип компаундирования при наличии жесткой сильной обратной связи. Нами экспериментально и теоретически [Л. 8] доказано, что только при наличии сильной обратной связи система компаундирования в установившемся режиме по своим свойствам не отличается от компенсационных систем. Чем сильнее обратная связь, тем меньше различие. Несмотря на отсутствие в компаундирующих схемах тахогенератора, характерного для компенсационных систем, регулятор реагирует на отклонение скорости двигателя от заданного значения, и он стабилизирует скорость как при изменении момента нагрузки, так и при изменении напряжения и частоты питающей сети, равно как и при изменении параметров системы (например, сопротивления обмоток и выпрямителей при нагревании и т. п.). По динамическим свойствам компаундированная система с обратной связью значительно лучше компенсационной.

Автоматическое регулирование скорости позволяет получить устойчивую работу асинхронного трехфазного двигателя в широком диапазоне изменения скорости порядка 1:10 при большой жесткости регулирования. Указывается, что рациональный выбор величины номинального скольжения путем применения специальных конструкций ротора (в частности, массивного ротора Шенфера) значительно увеличивает предельно допустимый момент двигателя. Приводятся элементы методики расчета и некоторые данные опытного образца привода с применением дросселя насыщения (магнитного привода). Рассмотрены реверсивные схемы магнитного привода.

Выбор параметров ротора двигателя. Свойства замкнутых систем автоматического регулирования позволяют по-новому подойти к выбору параметров ротора двигателя. Например, в настоящее время с целью достижения жесткости характеристики $n(M)$ обычной разомкнутой

схеме применяются асинхронные двигатели со сравнительно малым активным сопротивлением ротора, что дает небольшое номинальное скольжение. При автоматическом регулировании можно произвольно изменять жесткость характеристик в широких пределах. Чем больше коэффициент усиления схемы в разомкнутом состоянии, тем меньше коэффициент статизма:

$$\gamma = - \frac{\frac{\Delta n}{n_c}}{\frac{\Delta M}{M_{ном}}}$$

Кроме того, статизм можно регулировать введением компаундирующих связей по моменту нагрузки двигателя. Таким образом, при автоматическом регулировании оказывается выгоднее вернуться назад—к старым типам двигателей, и с целью повышения предельно допустимого момента и устойчивости регулирования применить ротор с увеличенным активным сопротивлением. Для того чтобы температура изоляции обмоток статора не превышала допустимой, потребуется, чтобы потери в роторе, пропорциональные скольжению, оставались постоянными и равными номинальному значению:

$$P_s = Ms = M_{ном} s_{ном} = const.$$

Отсюда находим простую формулу:

$$M_{пр} = \frac{M_{ном} s_{ном}}{s} = \frac{M_{ном} s_{ном} n_c}{n_c - n},$$

позволяющую определить наибольший предельно допустимый момент нагрузки двигателя на заданной скорости. Формула может быть использована для выбора двигателей ($M_{ном}$, $s_{ном}$) по заданному моменту нагрузки $M_{пр}$ при наименьшем зна-

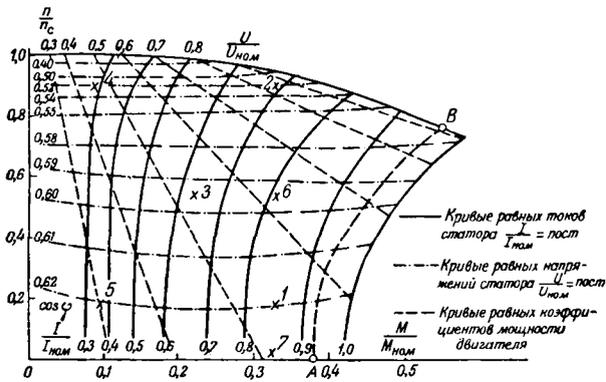


Рис. 1. Характеристика двигателя ТАГ с ротором Шенфера.

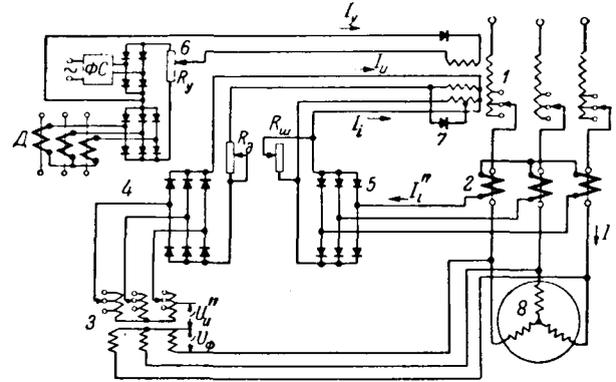


Рис. 2. Схема магнитного привода без тахогенератора с двумя дифференциальными обмотками.

чении скорости вращения $n = n_{мин}$. Очевидно, что при широком регулировании скорости выгодно использовать двигатели с повышенным номинальным скольжением, например типа МТК, двигатели серии АС и АОС, двигатели с двойной клеткой или глубоким пазом, а также промежуточные типы. Наши эксперименты показали, что особенно выгодно замена заводского двигателя с беличьей клеткой двигателем с массивным стальным ротором Шенфера [Л. 3].

1. Номинальное скольжение (при котором нагрев изоляции статора достигает $80^\circ C$) двигателя с ротором Шенфера составляет около $s_{ном} = 0,30 \dots 0,35$, что позволяет повысить предельно допустимый момент двигателя в области малых скоростей в 4...6 раз по сравнению с ротором типа беличьей клетки. Привод с ротором Шенфера обеспечивает длительную передачу не менее 30...35% номинального момента двигателя во всем диапазоне скоростей.

2. Характеристика предельного момента¹ (линия АВ, рис. 1) двигателя с ротором Шенфера почти совпадает с кривой, где ток статора равен номинальному, что свидетельствует о рациональном соотношении параметров статора и ротора.

3. Применение ротора Шенфера значительно повышает устойчивость регулирования за счет увеличения так называемого саморегулирования двигателя $F = \frac{\Delta n}{\Delta M}$.

Тиратронные приводы по компенсационной схеме описаны нами ранее [Л. 4, 5 и 6] и здесь не рассматриваются.

Схема магнитного привода. Схема магнитного привода, осуществляющего принцип компаундирования при наличии сильной обратной связи, дана на рис. 2. Привод состоит из асинхронного трехфазного двигателя 8, трехфазного силового дросселя насыщения 1, трансформатора тока 2, трансформатора напряжения 3, полупроводниковых выпрямителей 4 и 5, реостатов управления $R_{ш}$, $R_{д}$, $R_{у}$, запирающего вентиля 7.

Дроссель имеет три обмотки постоянного тока: управления, обмотку напряжения и обмотку тока, токи в которых обозначены через I_y , I_u , I_i . В схеме одновременно осуществлены положительная компаундирующая связь по току и отрицательная обратная связь по напряжению двигателя. Обмотки напряжения и тока включены дифференциально (навстречу друг другу). Полярность выпрямителей 4 и 5 такова, что увеличение тока двигателя повышает, а увеличение напряжения снижает скорость двигателя.

Действие схемы состоит в том, что при увеличении скорости вращения выше заданного значения ток в обмотке напряжения I_u возрастает, а в обмотке тока I_i уменьшается при $M = const$, что приводит к размагничиванию сердечников дросселя. Индуктивное сопротивление обмоток переменного тока увеличивается, что вызывает снижение скорости двигателя до требуемого значения.

При снижении скорости процесс регулирования происходит в обратном направлении — в сторону ее увеличения. Схема, поддерживая заданное соотношение между током и напряжением двигателя, одновременно решает задачу поддержания заданного значения скорости его вращения. Требуемое значение скорости двигателя при $I_y = const$ устанавливается при помощи реостатов $R_{ш}$ и $R_{д}$ или изменением чисел витков трансформаторов тока и напряжения.

Изменение скорости можно также осуществить путем изменения тока I_y в обмотке управления. Для устойчивости н. с. управления $I_y w_u$ должна совпадать по знаку с н. с. тока двигателя $I_i w_i$. При следящем регулировании ток управления I_y берется от датчика Д (рис. 2), вырабатывающего ток, пропорциональный заданному параметру, изменения которого должна „повторить“ скорость двигателя. Датчик Д и стабилизатор ФС включены встречно.

Чем больше величина н. с. тока и напряжения относительно их разности, тем меньше статизм (в пределах линейности характеристики магнитного усилителя). Ориентировочно мощность трансформатора тока и напряжения для обеспечения статизма порядка $\gamma = 0,1$ должна составлять около 5% мощности регулируемого двигателя. Мощность измерительной части схемы

¹ Геометрическое место точек на плоскости $\left(\frac{n}{n_c}, \frac{M}{M_{ном}} \right)$, в которых температура изоляции статора в установившемся режиме равна $80^\circ C$.

(трансформаторов и выпрямителей) нельзя увеличивать чрезмерно, и в некоторых случаях с целью повышения жесткости регулирования в схеме применяется промежуточный магнитный усилитель. Однако промежуточное усиление уменьшает быстродействие и устойчивость регулирования.

Переходные процессы и вопросы устойчивости регулирования в настоящей статье не рассматриваются.

Элементы расчета магнитного электропривода. Для расчета схемы рис. 2 необходимо знать статические характеристики элементов системы.

Уравнения статики двигателя с ротором Шенфера:

$$\frac{I}{I_{ном}} = f_1\left(\frac{n}{n_c}, \frac{M}{M_{ном}}\right); \quad (1)$$

$$\frac{U}{U_{ном}} = f_2\left(\frac{n}{n_c}, \frac{M}{M_{ном}}\right) \quad (2)$$

представлены на рис. 1. Зависимость отклонений скорости от тока и напряжения в фазах статора можно приблизительно считать линейной.

Линеаризуя и переходя к отсчету переменных в отклонениях, получим:

$$\frac{\Delta I}{I_{ном}} = -\alpha_5 \frac{\Delta n}{n_c} + \alpha_6 \frac{\Delta M}{M_{ном}}; \quad (1')$$

$$\frac{\Delta U}{U_{ном}} = \alpha_7 \frac{\Delta n}{n_c} + \alpha_8 \frac{\Delta M}{M_{ном}}. \quad (2')$$

Коэффициенты линеаризованных уравнений (1') и (2') можно приблизительно определить для любой точки линеаризации. Например, для испытанного дросселя в точке $\frac{M}{M_{ном}} = 0,22$; $\frac{n}{n_c} = 0,54$ (рис. 1):

$$\alpha_5 = \left(\frac{\frac{\Delta I}{I_{ном}}}{\frac{\Delta n}{n_c}} \right)_{M = \text{пост}} = 0,20;$$

$$\alpha_6 = \left(\frac{\frac{\Delta I}{I_{ном}}}{\frac{\Delta M}{M_{ном}}} \right)_{n = \text{пост}} = 1,75;$$

$$\alpha_7 = \left(\frac{\frac{\Delta U}{U_{ном}}}{\frac{\Delta n}{n_c}} \right)_{M = \text{пост}} = 0,27;$$

$$\alpha_8 = \left(\frac{\frac{\Delta U}{U_{ном}}}{\frac{\Delta M}{M_{ном}}} \right)_{n = \text{пост}} = 1,12.$$

Уравнение статики силового дросселя насыщения может быть получено любым способом, позволяющим учесть противо-э. д. с. двигателя.

Ток выхода дросселя (ток двигателя) зависит как от напряженности поля, так и (незначительно) от скорости вращения двигателя:

$$\frac{I}{I_{ном}} = f_3\left(H_-, \frac{n}{n_c}\right). \quad (3)$$

Линеаризуя уравнение и переходя к отсчету переменных в отклонениях, получим:

$$\frac{\Delta I}{I_{ном}} = \alpha_3 \Delta H_- - \alpha_4 \frac{\Delta n}{n_c}. \quad (3')$$

Коэффициенты линеаризованного уравнения (3') легко определить для каждой заданной точки характеристики усилителя.

Для испытанного усилителя, например в точке $\frac{M}{M_{ном}} = 0,22$; $\frac{n}{n_c} = 0,54$, коэффициенты:

$$\alpha_3 \approx \frac{I_{\epsilon p}}{W_{\sim} I_{ном}},$$

в предположении, что $H_- = H_{\sim}$;

$$\alpha_4 = \left(\frac{\frac{\Delta I}{I_{ном}}}{\frac{\Delta n}{n_c}} \right)_{H = \text{пост}} = 0,10.$$

Для измерительной части схемы можно составить следующие уравнения:

$$F_- = I_i W_i - I_u W_u + I_y W_y;$$

$$I_i = 1,227 k_i I_3 \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_i},$$

где

$$I_u = 2,3 k_u U_{\phi} \frac{1}{R_d + R_u + R_{вн}}.$$

Здесь приняты следующие обозначения:

F_- — сумма н. с. всех обмоток постоянного тока магнитного усилителя;

I_i — ток выпрямителя, питаемого от трансформатора тока;

I_u — ток выпрямителя, питаемого от трансформатора напряжения;

k_i — коэффициент трансформации трансформаторов тока;

k_u — коэффициент трансформации трансформатора напряжения;

I — ток регулируемого двигателя;

U_{ϕ} — напряжение двигателя (фазное);

R_i, R_u — сопротивления обмоток магнитного усилителя, питаемых от трансформаторов тока и напряжения.

Коэффициенты 1,227 и 2,3 учитывают преобразование токов и напряжений в трехфазной схеме Ларионова. Исключая промежуточные переменные I_i, I_u , находим уравнение статики измерительной части схемы:

$$H_- = \alpha_i \frac{I}{I_{ном}} - \alpha_u \frac{U}{U_{ном}} + H_y; \quad (4)$$

$$\alpha_i = 1,227 k_i W_i I_{ном} \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_i} \frac{1}{I_{cp}};$$

$$\alpha_u = 2,3 k_u W_u U_{\phi} \frac{1}{R_d + R_u + R_{вн}} \frac{1}{I_{cp}}.$$

При отсчете переменных в отклонениях получим:

$$\Delta H_{-} = a_i \frac{\Delta I}{I_{ном}} - a_u \frac{\Delta U}{U_{ном}}. \quad (4')$$

Уравнение статики всей системы в целом находим из уравнений статики элементов системы, исключая промежуточные переменные.

Линеаризованное уравнение статики имеет вид:

$$\frac{\Delta n}{n_c} = -\gamma \frac{\Delta M}{M_{ном}},$$

где

$$\gamma = \frac{a_6 + a_u a_3 a_8 - a_i a_3 a_6}{a_i a_3 a_5 + a_u a_3 a_7 + a_4 - a_5}$$

— коэффициент статизма системы в режиме, отбавляющем точке линеаризации уравнений.

Для расчета измерительной части схемы необходимо определить три режима:

1. Режим, в котором движки реостатов управления стоят в среднем положении (где $R_\delta = 0$ и $R_{ш} = R_{ш макс}$) при среднем значении скорости и момента нагрузки. Допустим, что этот режим отвечает точке 3 рис. 1. Для этой точки по графику рис. 1 находим напряженность поля, создаваемого обмоткой управления (удобно положить $H_y = 0$); относительное значение тока двигателя $\left(\frac{I}{I_{ном}}\right)_{сред}$; относительное значение напряжения двигателя $\left(\frac{U}{U_{ном}}\right)_{сред}$; коэффициенты линеаризованных уравнений статики a_3, a_4, a_5, a_6, a_7 и a_8 .

Кроме того, по характеристике дросселя насыщения находим для рассматриваемого режима значение H_{-} .

2. Режим, в котором плотность тока в обмотке, питаемой от трансформатора тока, принимает наибольшее значение (точка 6, рис. 1).

Для этого режима определяем относительную величину тока двигателя $\left(\frac{I}{I_{ном}}\right)_{макс}$.

3. Режим, в котором плотность тока в обмотке, питаемой от трансформатора напряжения, наибольшая (также точка 6, рис. 1).

Для этого режима определяем относительную величину напряжения двигателя $\left(\frac{U}{U_{ном}}\right)_{макс}$.

Расчет производим в следующем порядке.

Пользуясь уравнениями, составленными для режима средней скорости и средней нагрузки (точка 3):

$$H_{-} = a_i \left(\frac{I}{I_{ном}}\right)_{сред} - a_u \left(\frac{U}{U_{ном}}\right)_{сред} + H_y;$$

$$a_i = 110 s_i \frac{\left(\frac{I}{I_{ном}}\right)_{сред}}{\left(\frac{I}{I_{ном}}\right)_{макс}} \cdot \frac{1}{I_{cp}};$$

$$\alpha_u = 110 s_u \frac{\left(\frac{U}{U_{ном}}\right)_{сред}}{\left(\frac{U}{U_{ном}}\right)_{макс}} \cdot \frac{1}{U_{cp}};$$

$$\gamma = \frac{a_6 + a_u a_3 a_8 - a_i a_3 a_6}{a_i a_3 a_5 + a_u a_3 a_7 + a_4 - a_5},$$

определяем параметры системы a_i, a_u, γ и $s = s_u + s_i$. При этом по заданной величине коэффициента статизма γ можно определить требуемую величину обмоточного пространства дифференциальных обмоток s или, наоборот, по заданному s определить получающийся при нем коэффициент статизма γ . Последний путь практически удобнее. Число витков дифференциальных обмоток определяем по формулам:

$$w_i = 110 \frac{s_i}{I_{i макс}}; W_u = 110 \frac{s_u}{I_{u макс}},$$

где токи $I_{i макс}$ и $I_{u макс}$ определяются предельно допустимым током соответствующих выпрямителей. Цифра 110 физически представляет собой число ампервитков, которое можно разместить в каждом квадратном сантиметре обмоточного пространства при плотности тока около 2,5...3,0 а/м.м².

Регулирование скорости вверх от среднего значения (при $I_y = 0, R_{ш} = R_{ш макс}$) производится за счет увеличения сопротивления R_δ . Подставив в (4) значения $\frac{I}{I_{ном}}, \frac{U}{U_{ном}}$, отвечающие верхнему пределу регулирования скорости (точка 2), находим наибольшее значение сопротивления R_δ . Снижение скорости вниз от среднего значения (при $I_y = 0, R_\delta = 0$) производится путем уменьшения сопротивления $R_{ш}$. Подставив в то же уравнение значения переменных, отвечающих нижнему пределу регулирования скорости (точка 1), находим наименьшее значение $R_{ш}$ (его нерегулируемую часть). Как указывалось, регулирование скорости может также производиться путем изменения тока I_y (при $R_\delta = 0, R_{ш} = R_{ш мин}$). Этот способ удобно использовать для группового регулирования скорости нескольких двигателей, например питателей пыли для котлов. Наибольшая величина тока управления определяется аналогично предыдущему из уравнения статики измерительной цепи (4) по предельным значениям переменных.

Переходим к расчету статических характеристик системы. Наибольшее практическое значение имеют три характеристики, построенные для: а) $R_\delta = R_{\delta макс}, R_{ш} = R_{ш макс}$; б) $R_\delta = 0, R_{ш} = R_{ш макс}$ и в) $R_\delta = 0, R_{ш} = R_{ш мин}$.

Для каждой пары значений R_δ и $R_{ш}$ находим статическую характеристику системы путем исключения промежуточных переменных (I, U_{cp}, H_{-}) из уравнений статики элементов системы. Так как часть из них задана графически, то вычисления удобно вести в следующем порядке: 1) задаемся рядом значений H_{-} ; 2) по характеристике дросселя насыщения находим отвечающий им

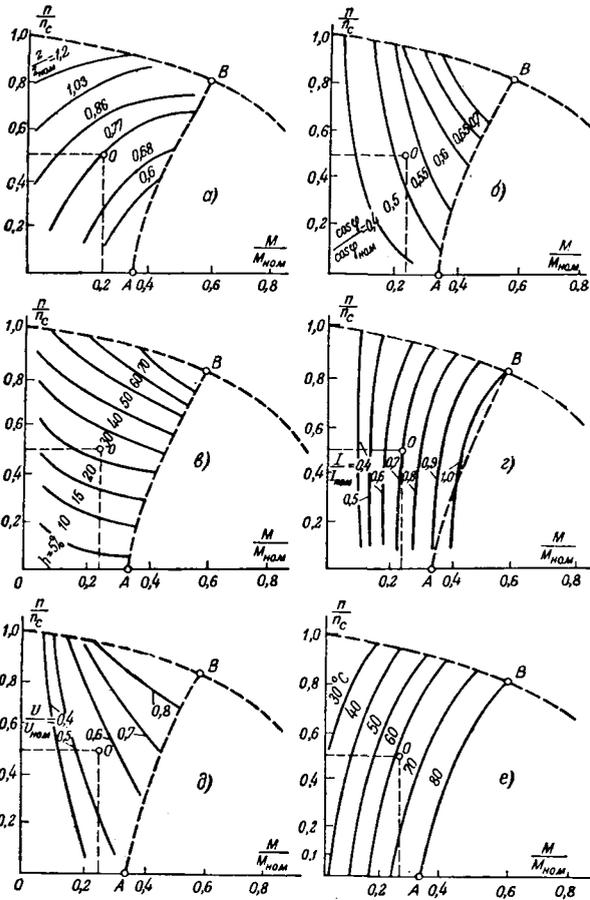


Рис. 3. Экспериментальные характеристики магнитного привода с ротором Шенфера.

а — кривые равных полных сопротивлений ($\frac{Z}{Z_{ном}} = const$); б — равных коэффициентов мощности ($\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_{ном}} = const$); в — равных к. п. д. ($\eta = const$); г — равных токов статора ($\frac{I}{I_{ном}} = const$); д — равных напряжений статора ($\frac{U}{U_{ном}} = const$); е — равных установившихся температур обмотки статора ($t_{уст} = const$).

циенты α_i и α_u ; 4) по характеристикам двигателя (рис. 1) находим скорость вращения и момент нагрузки $\frac{n}{n_c}, \frac{M}{M_{ном}}$.

Результаты вычислений записываются в таблицу и изображаются графически (аналогично рис. 4). На этом расчет статике магнитного привода заканчивается.

Характеристики магнитного привода с двигателем мощностью 3 кВт, снятые экспериментально, даны на рис. 3 и 4. На рис. 3 показаны изменение коэффициента мощности, к. п. д. всего устройства, тока, напряжения, полного сопротивления и установившейся температуры обмотки статора двигателя. Линия АВ является характеристикой предельного момента: она ограничивает область режимов, в которых температура обмотки статора при длительной работе не превышает 80°С при окружающей температуре 25°С. В режиме повторно-кратковременной работы допустимый момент нагрузки двигателя может быть значительно повышен за пределы характеристики АВ. Момент регулируемого асинхронного двигателя почти пропорционален квадрату тока, поэтому здесь можно пользоваться правилом, по которому на заданной скорости среднее арифметическое значение момента не должно превышать значений указанных характеристик АВ.

По данным рис. 3 можно сделать вывод, что плавное регулирование скорости при помощи дросселя насыщения выгодно сочетать с переключением числа пар полюсов двигателя, так как в области, близкой к синхронной скорости вращения, привод обладает сравнительно высоким коэффициентом мощности и к. п. д. Диапазон регулирования скорости расширяется при этом до 1:50 и более. Предельно допустимый момент двигателя (обратно пропорциональный n_c) при снижении скорости переключением полюсов возрастает. Схему с переключением можно рекомендовать, например, для электротракторов, кранов и т. п.

Реверсивные схемы магнитного привода.

В большинстве случаев для реверсирования двигателя достаточно применить реверсирующий магнитный пускатель, переключающий две фазы двигателя. Однако в ряде задач требуется реверсировать и осуществлять торможение противовключением без разрыва контактов (автоматические регуляторы и синхронно-следящие системы). Тиратронный регулятор, позволяющий реверсировать двигатель и осуществлять торможение противовключением, описан нами ранее [Л. 4]. Схемы, изображенные на рис. 5 и 6, решают ту же задачу при помощи дросселей насыщения.

Схема компенсационного типа с тахогенератором. Перемещением движка управляющего делителя 1 (рис. 5) можно изменить скорость вращения исполнительного двигателя 2 от максимальной в одну сторону до максимальной в другую сторону.

Действие схемы состоит в следующем: изменение направления вращения двигателя осуществляется при помощи трехфазного дросселя насы-

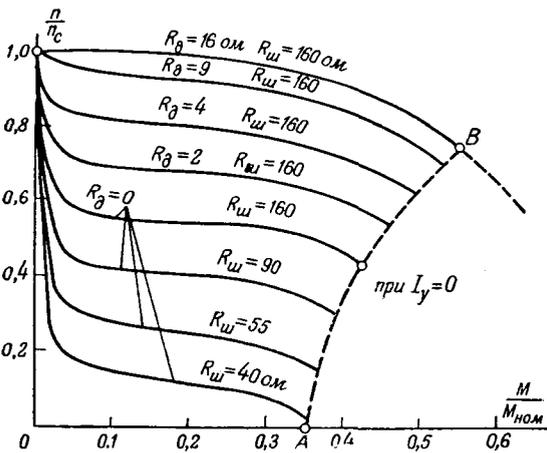


Рис. 4. Экспериментальные статические характеристики магнитного привода по схеме с дифференциальными обмотками.

ток двигателя I ; 3) из уравнений статике измерительной цепи (4) находим напряжение двигателя. Следует учесть, что каждой паре значений R_d, R_w отвечают вполне определенные коэффи-

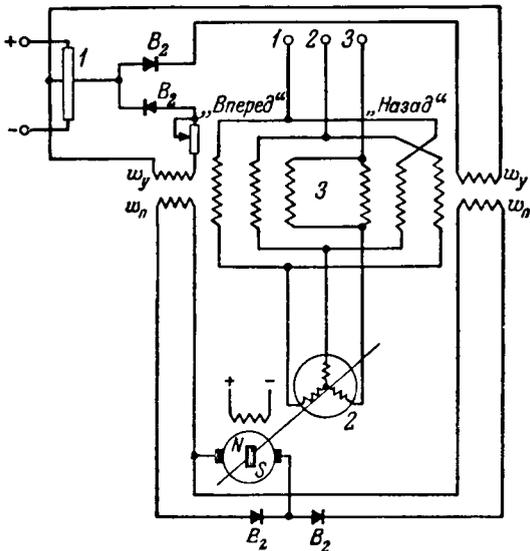


Рис. 5. Схема магнитного привода с тахогенератором.

щения 3, представляющего собой соединение двух обычных трехфазных дросселей насыщения („вперед“ и „назад“). В среднем положении движка управляющего делителя 1 н. с. обмоток равны нулю. Полные сопротивления дросселей здесь велики и равны. Двигатель стоит. Если переместить движок в ту или иную сторону со среднего положения, ток управления начнет проходить через одну из обмоток, сопротивление соответствующего дросселя уменьшится, и двигатель начнет вращаться в требуемую сторону. Скорость будет возрастать до тех пор, пока н. с., обусловленная током тахогенератора, не уравновесит н. с. управления (компенсационный принцип). При перемещении движка делителя в другом направлении осуществляется пропорциональное изменение скорости вращения в другую сторону. Обмотка, питаемая от тахогенератора, осуществляет обратную связь по скорости двигателя, чем обеспечивается линейный характер регулирования. Без наличия этой обмотки схема работала бы релейно по принципу „включено“ — „отключено“. Известно, какое большое значение для автоматических регуляторов имеет исполнительный двигатель с линейной регулировкой скорости. Такой двигатель позволяет значительно повысить скорость регулирования при сохранении устойчивости и хорошего качества переходных процессов.

Интересной особенностью схемы реверсивного магнитного привода является то, что путем введения сопротивлений последовательно с запирающими выпрямителями B_2 характеристику следования $n=f(H_u)$ легко можно сделать несимметричной. При этом характеристика следования будет более пологой в одной ее ветви, чем в другой, что требуется в ряде случаев регулирования (электрические дуговые печи).

Реверсивная компаундирующая схема без тахогенератора (с сильной обратной связью). Основной недостаток схемы рис. 5 — наличие сравнительно большой зоны неподвижности дви-

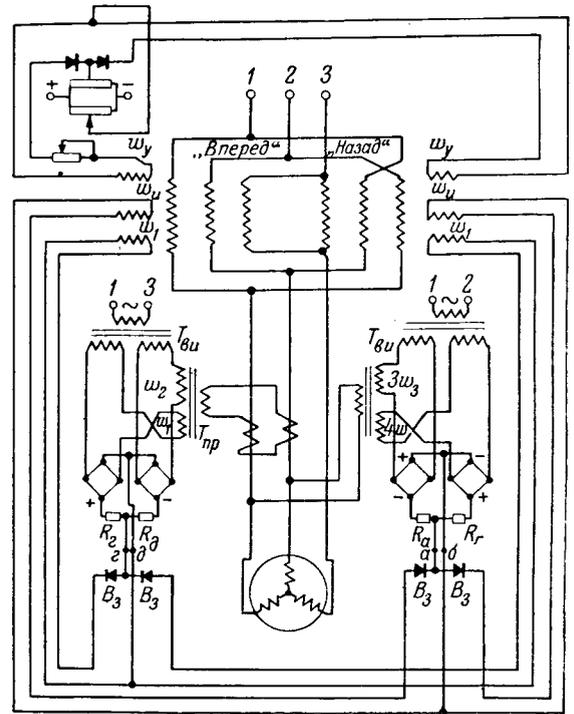


Рис. 6. Схема реверсивного магнитного привода без тахогенератора.

гателя, величина которой пропорциональна моменту нагрузки. Этот недостаток устранен в схеме рис. 6. Здесь вместо тахогенератора используются положительная компаундирующая связь по току и обратная связь по напряжению двигателя.

Для того чтобы в зависимости от направления вращения двигателя н. с. создавались только в соответствующем дросселе, применены фазочувствительные схемы (дискриминаторы), при помощи которых изменение фазы напряжения трансформатора напряжения и тока, имеющее место при изменении направления вращения двигателя, преобразуется в изменение полярности постоянного тока.

Рассмотрим кратко действие фазочувствительной схемы с трансформатором напряжения. Если напряжение двигателя равно нулю, то на выходе схемы (между точками a и b) напряжение также отсутствует, так как выпрямители, питающие балластные сопротивления R_a и R_b , дают равные напряжения, разность которых равна нулю. Если напряжение двигателя не равно нулю, то оно увеличивает напряжение одного и уменьшает напряжение другого выпрямителя, что достигается определенным выбором фазы питания вспомогательного трансформатора T_{vu} . При изменении направления вращения двигателя полярность напряжения между точками a и b изменится на обратную, а величина его остается пропорциональной напряжению двигателя.

Аналогичным образом действует и фазочувствительная схема с трансформаторами тока: величина напряжения между точками g и d пропорциональна току двигателя, а полярность зависит от направления вращения. Фаза питания вспомо-

гательного трансформатора T_{vi} выбирается так, чтобы она соответствовала фазе напряжения трансформаторов тока. Напомним, что фаза двигателя с ротором Шенфера, который применяется в магнитном приводе, почти не зависит от скорости (рис. 1). Ток отстает от напряжения на угол $50—55^\circ$. Вентили B_3 заставляют поступать ток фазочувствительных схем только в обмотку подмагничивания того дросселя, который должен работать при заданном направлении вращения.

Весьма важно, что параметры схемы (при постоянном моменте нагрузки двигателя) могут быть выбраны так, чтобы устранить зону неподвижности двигателя: для этого достаточно, чтобы при заданном моменте нагрузки и неподвижном двигателе (в режиме точки 7, рис. 1) было достигнуто равенство

$$H_y = H_- - H_i + H_u = 0,$$

где $H_- = H_{-}$.

В системах с переменным моментом нагрузки это равенство должно быть выполнено при наименьшем значении момента нагрузки и при неподвижном двигателе. Здесь зона неподвижности только уменьшается, но не устраняется полностью.

Заключение. Схема магнитного привода не имеет ни разрывных контактов, ни движущихся частей, ни электронных ламп или тиратронов и поэтому отличается большой простотой и надежностью. Время разгона привода, необходимое для того, чтобы неподвижный двигатель достиг полной скорости, для описанного выше привода с генератором постоянного тока в качестве нагрузки равно 4... 5 сек. Время установления новой скорости не превышает 3 сек. Быстродействие схемы может быть еще более увеличено путем применения специальных магнитных усилителей трансформаторного типа с так называемой внутренней обратной связью.

Особые преимущества магнитный привод имеет для плавного регулирования скорости двигателя с дуговым статором. Устойчивость регулирования обеспечивается здесь за счет большого момента инерции ротора: чем больше инерции ротора, тем устойчивее система и тем большую жесткость характеристик можно получить в ней. Применение магнитного привода устраняет один из недостатков дугового двигателя — малую жесткость характеристик, т. е. устраняет необходимость наложения беличьей клетки на маховик. Ротор дугового статора имеет большую поверхность охлаждения; следовательно, предельный момент двигателя может быть повышен почти до номинального значения во всем диапазоне скоростей. Все это позволяет думать, что применение магнитного привода для двигателей с дуговым статором будет эффективным и расширит область применения этих двигателей.

Литература

1. Л. А. Бессонов. Электрические цепи со сталью. Госэнергоиздат, стр. 207—209, 1948.
2. С. З. Барский. Асинхронный привод с дроссельным управлением. ВЭП, № 1, 1948.
3. К. И. Шенфер. Асинхронные машины. ГИЗ, 1929 и Электричество, № 2, 1945.
4. А. Г. Ивахненко. Регулирование скорости трехфазного асинхронного двигателя при помощи схемы с тиратроном и серийными трансформаторами. Электричество, № 9, 1948.
5. А. Г. Ивахненко. Тиратронный электропривод для металлорежущих станков. Станки и инструменты, № 4 и 12, 1951.
6. А. Г. Ивахненко и И. К. Парра. Опыт применения тиратронного электропривода с трехфазным короткозамкнутым двигателем для металлорежущего станка. Сборник трудов Института электромеханики АН УССР, № 9, 1951.
7. В. Л. Иносов и Л. В. Цукерник. Электромагнитный корректор напряжения. Электричество, № 9, 1949.
8. А. Г. Ивахненко. Теория параметрических регуляторов. Сборник трудов Института электротехники АН УССР, № 10, 1952.

(4.2.1952)



Резервы повышения точности статического регулирования автоматизированного электропривода

Кандидат техн. наук С. З. БАРСКИЙ

Москва

Изложен метод расчета точности статического регулирования электропривода по системе генератор-двигатель с широким диапазоном изменения скоростей. Рассмотрены принципы управления привода с переменным коэффициентом обратной связи и дана методика расчета таких систем. Приведены различные варианты параметрических систем с переменным коэффициентом обратной связи и даны методы их расчета.

системы в статическом режиме:

$$(e_\sigma - aE_m)k_g - I(R_z + R_\delta) - E_\delta = 0. \quad (1a)$$

Здесь a — коэффициент напряжения потенциометра обратной связи по скорости;

$(R_z + R_\delta)$ — суммарное сопротивление якорной цепи;

$E_\delta = C_\delta n$ и $E_m = C_m n$ — соответственно э. д. с. двигателя и тахогенератора.

Постоянные машины C_δ и C_m определяются по формуле:

$$C = \frac{N p}{a 60} \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Для упрощения последующих расчетов принимаем $C_\delta = C_m = C$, а следовательно, $E_m = E_\delta$; кроме того, полагаем обе главные машины полностью скомпенсированными, а скорость вращения генератора — неизменной.

Ниже будем оперировать относительным значением напряжения управления $\sigma = \frac{e_\sigma}{e_0}$. Повидимому, этот же параметр дает относительное значение скорости идеального холостого хода

$$\sigma = \frac{n_{0\sigma}}{n_0} \text{ при } a = \text{const.}$$

При учете изложенного уравнение для скорости запишется так:

$$n = \frac{\sigma e_0 k_g - I(R_z + R_\delta)}{c(1 + a k_g)}. \quad (1)$$

Положив в формуле (1) скорости $a = 0$, получаем выражение, справедливое для разомкнутой системы. Полагая, далее, $\frac{e_0 k_g}{c} = n_0$ — максимальной скорости при идеальном холостом ходе, $\frac{I(R_z + R_\delta)}{c} = \Delta n$ и $\delta_0 = \frac{\Delta n}{n_0}$, получим упрощенное выражение для скорости привода:

$$n = n_0 \sigma \left(1 - \frac{\delta_0}{\sigma} \right). \quad (2)$$

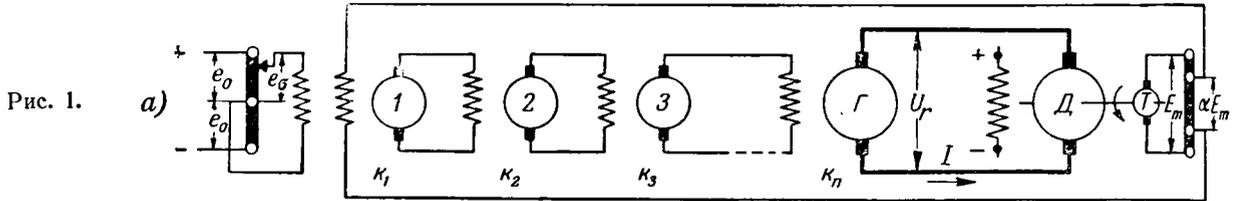
Высокая степень точности статического регулирования является основным и наиболее важным требованием, обуславливающим нормальный режим работы многих промышленных электроприводов. К этой категории могут быть отнесены электроприводы прецизионных станков, электрокатки металлов, а также многие приводы машиностроения и металлургии.

Трудности конструирования таких систем и обеспечения высокой их точности возрастают с расширением диапазона регулирования скорости вниз от максимального значения. В этих условиях высокая точность управления достигается прежде всего за счет дальнейшего увеличения коэффициента усиления системы, что связано с усложнением и удорожанием ее. Кроме того, увеличение коэффициента усиления имеет свои пределы, ограничиваемые динамикой привода.

Ниже будут рассмотрены некоторые принципы обеспечения высокой точности и широкого диапазона регулирования при ограниченных значениях коэффициента усиления, основанные на использовании внутренних возможностей, заложенных в системах автоматизированного привода.

На рис. 1,а изображена некоторая замкнутая система генератор — двигатель без внутренних обратных связей, имеющая в общем случае n звеньев. Будем полагать, что на каждой ступени задаваемой скорости система линейна и сохраняет на этой ступени неизменный коэффициент усиления при всех наблюдаемых значениях нагрузки. Путем элементарных преобразований рассматриваемая система может быть упрощена и приведена к системе с одним генератором, как это показано на рис. 1,б. Приведенная система будет в статическом отношении эквивалентна исходной; ее коэффициент усиления равен $k_g = k_1 k_2 \dots k_n$, а в цепь обмотки возбуждения введены те же значения задающего напряжения e_σ при обратной связи aE_m , снимаемого с тахогенератора.

Напишем уравнение баланса э. д. с. и падевший напряжения в якорной цепи рассматриваемой



Из формулы (2) видно, что относительное отклонение скорости разомкнутой системы при неизменном моменте на валу двигателя возрастает обратно пропорционально скорости: так, при $\sigma = 0,10$, $\delta_s = 10\delta_0$, что и ограничивает нижний предел регулирования скорости.

Вернемся теперь к замкнутой системе. Положив в формуле (1) скорости $a > 0$ и учитывая ранее изложенное, получим:

$$n = n_0 \left[1 - \frac{\delta_0}{\sigma(1 + ak_s)} \right], \quad (3a)$$

где то же значение максимальной скорости идеального холостого хода получаем при подаче на вход системы задающего напряжения

$$e'_0 = e_0(1 + ak_s).$$

При максимальной скорости и неизменном моменте на валу двигателя

$$n = n_0 \left(1 - \frac{\delta_0}{1 + ak_s} \right). \quad (3)$$

Из сопоставления формул (2), (3a) и (3) видно, что при одинаковых скоростях и моментах точность замкнутой системы по сравнению с разомкнутой повышается в $(1 + ak_s)$ раз; отсюда же видно, что характер отклонения скорости от заданного значения при регулировании ее в широких пределах будет в обеих системах одинаковым.

Из изложенного видно, что отклонение скорости разомкнутой и замкнутой систем на широком диапазоне регулирования может быть определено по одной обобщенной формуле:

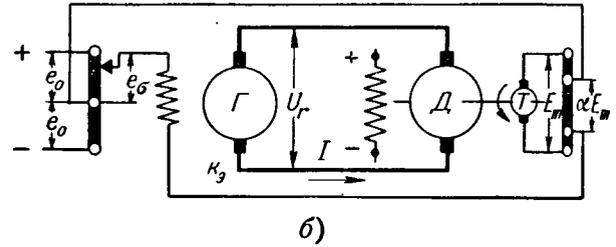
$$\delta_s = \frac{\delta_0}{(1 + k_{oc})\sigma}, \quad (4)$$

где σ — относительное значение скорости идеального холостого хода, а $k_{oc} = ak_s$ — коэффициент усиления обратной связи, который для разомкнутой системы равен нулю.

Таким образом, относительное отклонение регулируемого параметра, или обратная ему величина — точность регулирования, однозначно определяется коэффициентом усиления жесткой отрицательной обратной связи и зависит только от этого параметра.

Иногда удобнее рассматривать отклонение регулируемого параметра от коэффициента усиления k_s замкнутой системы, под которым в дальнейшем мы будем понимать выражение: $k_s = \frac{k_s}{1 + k_{oc}}$

Рассмотрим некоторые принципы обеспечения высокой точности управления приводами с широким диапазоном регулирования скорости при ограниченных значениях их коэффициентов усиления.



Как видно из формулы (1), регулирование скорости может осуществляться не только изменением задающего напряжения $e_s = \sigma e_0$, но также и коэффициентом усиления обратной связи k_{oc} , а этот коэффициент, как было указано, обуславливает точность регулирования. Для обеспечения регулирования скорости вниз от максимальной коэффициент усиления обратной связи, повидимому, должен повышаться, что одновременно приводит к увеличению точности управления в наиболее характерных в этом отношении режимах. Рассматриваемый принцип управления практически осуществляется путем связи аппарата управления с потенциометром обратной связи, как это показано на рис. 2, а, б и в.

Зададимся условием получения при номинальном моменте неизменного относительного отклонения скорости $\delta_s = \xi\delta_0$ ($\xi < 1$) на некотором диапазоне управления. Подставляя это условие регулирования в основную формулу (4) относительного отклонения скорости и решая его относительно коэффициента усиления обратной связи (k_{oc}), получим закономерность изменения последнего со скоростью:

$$k_{oc} = \left(\frac{1}{\sigma\xi} - 1 \right). \quad (5a)$$

Изменение коэффициента усиления обратной связи практически осуществляется путем изменения со скоростью коэффициента напряжения a потенциометра обратной связи, для которого справедливо следующее соотношение:

$$a = \frac{I}{k_s} \left(\frac{1}{\sigma\xi} - 1 \right), \quad (5b)$$

т. е. коэффициент напряжения потенциометра обратной связи должен возрастать по мере снижения скорости, что должно усилить эффективность обратной связи и повысить стабильность характеристик.

Рассмотрим, какова же должна быть закономерность изменения задающего напряжения при указанных выше условиях регулирования. Обратимся с этой целью к исходному уравнению (1a) равновесия э. д. с. и падения напряжения в якорной цепи. Заменив коэффициент обратной связи

его выражением (5а) и решая уравнения для условий $I=0$ относительно e_3 , получим:

$$e = \frac{n_0 c}{\xi k_3} = \frac{e_0}{\xi}, \quad (5)$$

т. е. при указанных условиях регулирования ($\delta = \xi \delta_0 = \text{пост}$) по принципу изменения коэффициента усиления обратной связи входное напряжение системы должно оставаться неизменным. В частном случае при $\xi=1$, $\delta = \delta_0$ и $e = e_0$. На рис. 2,а изображена схема управления по принципу регулирования коэффициента усиления обратной связи при неизменном задающем напряжении. Низший предел скорости по этой схеме определяется в относительном значении по формуле:

$$\sigma_{\text{мин}} = \frac{1}{(1+k_3)\xi}, \quad (6a)$$

что будет иметь место при $k_{\text{ос макс}} = k_3$, а следовательно, $a = a_{\text{макс}}$. Диапазон регулирования скорости по этому принципу может быть расширен путем введения в цепь обратной связи промежуточного усилителя. При этом $a'_{\text{макс}} = k_y$, $k'_{\text{ос макс}} = k_y k_3$ (где k_y — коэффициент усиления усилителя обратной связи), а низший предел скорости определится по формуле

$$\sigma_{\text{мин}} = \frac{1}{(1+k_y k_3)\xi}. \quad (6)$$

Значительный практический интерес представляет принцип двухзонного управления, согласно которому регулирование скорости от нуля до некоторого значения осуществляется по вышеизложенному принципу изменения коэффициента усиления обратной связи при неизменном задающем напряжении; в зоне больших скоростей порядок управления изменяется на обратный, как это показано на рис. 2,б.

Рассмотрим комбинированный принцип управления приводом, при котором одновременно изменяются задающее напряжение и коэффициент напряжения обратной связи. Этот принцип управления осуществлен в схеме включения обмотки возбуждения генератора и механической связи движков потенциометров управления и обратной связи, как это изображено на рис. 2,в. Закономерности изменения выходных напряжений этих потенциометров могут быть самыми разнообразными, но они находятся в однозначной взаимосвязи, устанавливаемой условиями регулирования.

Пусть разомкнутая система имеет коэффициент усиления k_3 и относительное отклонение максимальной скорости при номинальном моменте δ_0 . Если для этих же условий в замкнутой системе требуется обеспечить отклонение скорости $\delta_1 = \xi_1 \delta_0$ ($\xi_1 < 1$), а при низшем значении скорости и том же моменте отклонение скорости должно не превышать $\delta_2 = \xi_2 \delta_0$ ($\xi_2 > \xi_1$), то по этим условиям можно установить параметры схемы комбиниро-

ванного управления. Пользуясь ранее выведенным обобщенным соотношением (4) для отклонения регулируемого параметра и заданными выше условиями регулирования, находим предельные значения коэффициента усиления обратной связи для верхнего и нижнего пределов ($\sigma_{\text{макс}}$) регулирования скоростей

$$k_{\text{ос1}} = \frac{1-\xi_1}{\xi_1} \quad \text{и} \quad k_{\text{ос2}} = \frac{1-\xi_2 \sigma_{\text{макс}}}{\xi_2 \sigma_{\text{мин}}}, \quad (7)$$

а коэффициенты напряжения обратной связи при этом соответственно изменяются от $a_1 = \frac{k_{\text{ос1}}}{k_3}$ до $a_2 = \frac{k_{\text{ос2}}}{k_3}$.

По конструктивным соображениям наиболее удобно осуществить линейное изменение коэффициента напряжения обратной связи со скоростью, что обуславливает также и линейное изменение задающего напряжения:

$$e_3 = e_m \left[1 + \frac{(a_m - a_1) k_3}{1 + a_m k_3} (\sigma - \sigma_m) \right],$$

где $e_m = n_0 c (1 + a_m k_3) \frac{1}{k_3}$ — значение задающего

напряжения на низшем диапазоне скорости.

Значительный интерес представляет вариант комбинированного управления, подчиненного условию $a \sigma n_0 = \text{пост}$ или, что то же самое, $a_3 \sigma = a_1$. Такой режим управления приобретает важное значение в системах, в которых входное звено выполнено с отдельными обмотками управления и обратной связи (например, машинный или магнитный усилитель); режим $a \sigma n_0 \approx a \sigma = \text{пост}$ обеспечивает максимальное использование обмотки

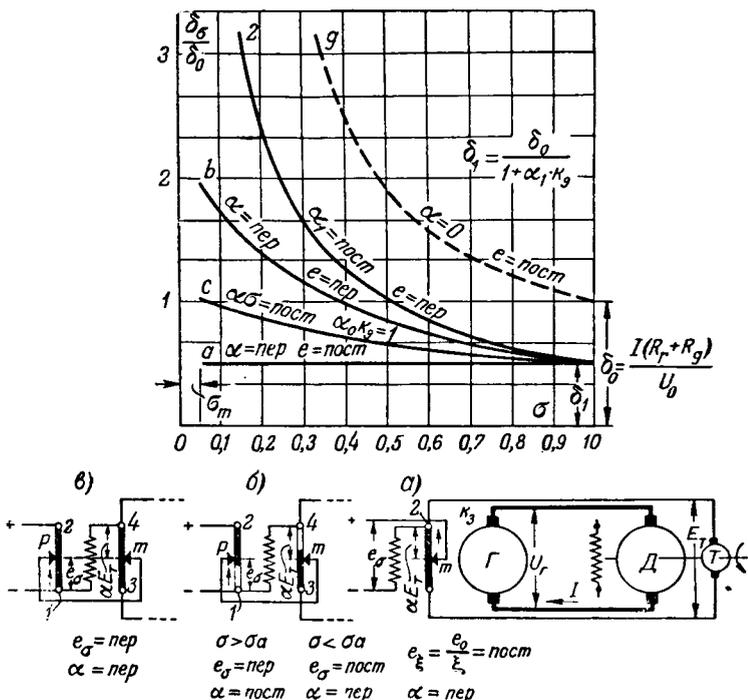


Рис. 2.

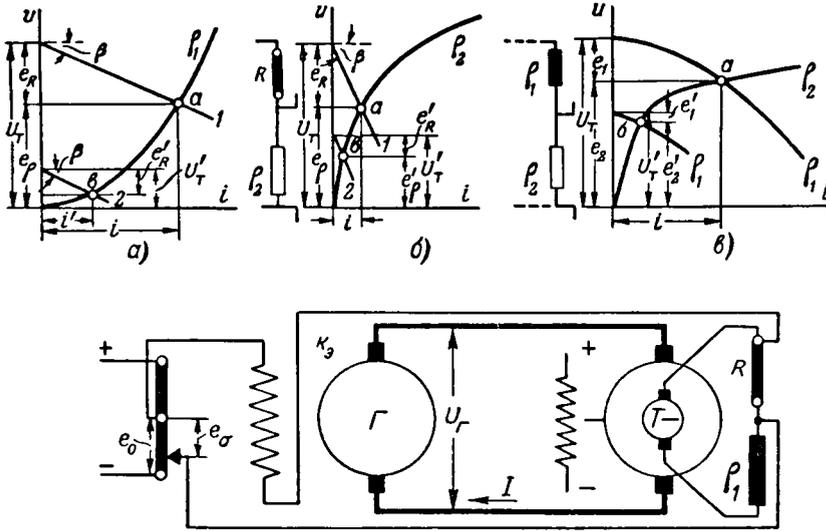


Рис. 3.

обратной связи по нагреву, так как на всем диапазоне управления по ней протекает практически неизменный ток.

Отклонение регулируемого параметра при этом условии управления подчинено соотношению

$$\delta = \frac{\delta_0}{\sigma + \alpha_1 k_3}, \quad (8a)$$

где начальное значение коэффициента напряжения обратной связи α_1 определяется по заданному значению отклонения δ_m регулируемого параметра при низшем пределе скорости ($\sigma_{мин}$):

$$\alpha_1 = \left(\frac{\delta_0}{\delta_m} - \sigma_{мин} \right) \frac{1}{k_3}. \quad (8)$$

На рис. 2 изображены в относительных единицах зависимости отклонения регулируемого параметра от скорости для различных принципов управления при прочих одинаковых условиях.

Пунктирная кривая d соответствует разомкнутой системе, z — замкнутой системе с неизменным значением коэффициента усиления обратной связи, кривая b — комбинированному управлению с линейным законом изменения выходных напряжений потенциометров управления и обратной связи; кривая e соответствует комбинированному управлению, подчиненному условию $az = const$, и, наконец, кривая a соответствует управлению при посредстве потенциометра обратной связи и неизменном значении задающего напряжения.

Изменение коэффициента усиления обратной связи в процессе управления с целью повышения точности авторегулирования может быть также достигнуто при помощи параметрических схем, основанных на использовании характеристик нелинейных сопротивлений. В зависимости от задач и условий управления, типов и характеристик нелинейных сопротивлений и мощности возбуждения системы возможны разнообразные пути осуществления указанного принципа. Ниже мы ограничимся рассмотрением параметрических схем с переменным коэффициентом усиления обратной связи, изображенных на рис. 3.

В схеме a потенциометр обратной связи состоит из последовательно включенных нелинейного сопротивления ρ_1 и линейного сопротивления R , с зажимов которого подается обратная связь на вход системы. В рассматриваемой схеме сопротивление нелинейного элемента параболически возрастает с ростом проходящего через него тока, а следовательно, и напряжения генератора согласно кривой ρ_1 . Подобные вольтамперные характеристики имеют угольные сопротивления, бареттеры и некоторые типы ламп накаливания.

Анализ схемы при различных значениях напряжения генератора может быть осуществлен графическим методом, изображенным на рис. 3, a . В осях u, i отложены вольтамперные характеристики ρ_1 нелинейного и ли-

нейного сопротивлений; линейная характеристика проведена под углом $\beta = \text{arctg } R$ из точки U_m на оси ординат. Точка a пересечения этих характеристик определяет установившийся режим схемы и падения напряжения e_R и e_p на соответствующих участках потенциометра, а коэффициент напряжения обратной связи при этом равен $\alpha_1 = \frac{e_R}{U_m}$. Передвигая вольтамперную характеристику I линейного сопротивления параллельно себе вниз от максимального напряжения, получаем в точках пересечения кривых режимы и значения коэффициентов напряжения обратной связи при меньших значениях скоростей. Как видно из характера кривых, с понижением напряжения a возрастает. Так, при некотором напряжении $U'_m < U_m$ режим схемы определится точкой b ; при этом коэффициент напряжения обратной связи $\alpha' = \frac{e'_p}{U'_m}$ в несколько раз превысит соответствующее значение α_1 при максимальном напряжении.

На рис. 3, b изображен принципиально отличный от ранее рассмотренного вариант нелинейного потенциометра обратной связи, состоящий из линейного R и нелинейного ρ_2 элементов, причем сопротивление ρ_2 уменьшается с ростом тока, как это видно из его вольтамперной характеристики. К этой категории нелинейных сопротивлений могут быть отнесены купроксные и селеновые выпрямители.

В рассматриваемом варианте схемы напряжение обратной связи снимается с зажимов нелинейного элемента, что обеспечивает увеличение коэффициента усиления обратной связи в режимах низких скоростей. Методика графического исследования рассматриваемой схемы аналогична ранее рассмотренной. Точки a и b на рис. 3, b соответствуют режимам работы схемы с напряжениями U_m и $U'_m < U_m$; при этом соответствующие

значения коэффициентов напряжения обратной связи составят $\alpha_1 = \frac{e_p}{U_m}$ и $\alpha_1' = \frac{e_p'}{U_m}$, причем $\alpha_1' > \alpha_1$.

Значительно более высокий эффект может быть достигнут применением нелинейного потенциометра обратной связи, состоящего из двух нелинейных элементов ρ_1 и ρ_2 с ранее приведенными характеристиками. Такая схема изображена на рис. 3, в; тут же показан графический метод расчета схемы для двух режимов работы, подтверждающий высокую ее эффективность. В рассматриваемых схемах осуществляется авторегулирование напряжения. Если на валу двигателя имеется тахогенератор, то подключением к его зажимам рассмотренных нелинейных схем обратной связи достигается авторегулирование скорости.

В технических расчетах часто прибегают к аппроксимации вольтамперных характеристик нелинейных элементов через показательные функции типа $i = AU_{\rho_1}^a$ для элемента ρ_1 и $i = BU_{\rho_2}^b$ для элемента ρ_2 . В этой аппроксимации A , a , B и b постоянны, причем $a < 1$, $b > 1$. В этом случае коэффициенты напряжения обратной связи рассмотренных схем являются корнями трансцендентных уравнений.

Во всех приведенных выше рассуждениях мы пренебрегали влиянием нагрузки на характеристики потенциометра обратной связи, имея в виду систему привода, изображенную на рис. 1, в которой мощность уравнения ничтожно мала.

[24. 11. 1951]



К анализу защиты ротора генератора от замыканий на землю

Инж. Г. А. КИРЕЕВ

Свердловск

Методы исследования сложных схем, содержащих индуктивные связи между различными их элементами, можно условно (в зависимости от применяемого математического аппарата и параметров элементов схем, употребляющихся для расчетов) разделить на три группы.

1. Методы, основанные на составлении для заданной схемы системы уравнений по первому и второму законам Кирхгофа и решении этих уравнений для определения искомых величин, а также методы, непосредственно основанные на законах Кирхгофа (принцип наложения в его различных формах, метод контурных токов и т. д.).

2. Методы, основанные на замене входящих в схему индуктивно связанных цепей (трансформаторов) их схемами замещения; получающиеся в результате этой замены схемы не содержат индуктивных связей между отдельными элементами и поддаются анализу гораздо легче, чем исходные схемы.

3. Методы, основанные на замене трансформаторов (и других элементов схемы) четырехполюсниками. По определенным формулам можно

Анализируется схема защиты турбогенератора от второго заземления в цепях возбуждения с компенсацией переменного тока. На основе теории четырехполюсников выводятся условия, при которых компенсация будет совершенной. Выводятся формулы для определения постоянных четырехполюсника, эквивалентного «поперечному» соединению двух четырехполюсников, и определяется область применимости этих формул¹.

найти постоянные четырехполюсника, эквивалентного последовательному, параллельному и т. д. включениям данных четырехполюсников, и в конце концов свести сложную схему к виду одного четырехполюсника, эквивалентного всей исходной схеме.

Все эти группы методов имеют ряд ограничений в их применимости к тем или иным конкретным случаям, и производство расчетов с помощью какого-либо метода вне пределов возможности его применения может привести к грубым ошибкам.

Одним из примеров такого рода ошибок является анализ, проведенный К. С. Введенским и А. А. Воскресенским [Л. 1] при рассмотрении одной схемы защиты турбоагрегата от второго заземления в цепях возбуждения (рис. 1). Схема основана на принципе уравновешенного моста постоянного тока и снабжена специальными устройствами для того, чтобы исключить ложное срабатывание защиты от действия переменного тока, который может появиться в диагонали моста. (Ток может появиться в результате наведения переменной э. д. с. в волокнах тела ротора и его обмотке вследствие пульсаций магнитного потока ротора, обусловленных различными причинами). Для нейтрализации действия переменного тока реле снабжается специальной компенсирующей обмоткой, одинаковой с основной обмоткой, вклю-

¹ Статья является частью заключительного реферата, выполненного автором в качестве слушателя Факультета усовершенствования дипломированных инженеров Всесоюзного заочного энергетического института.

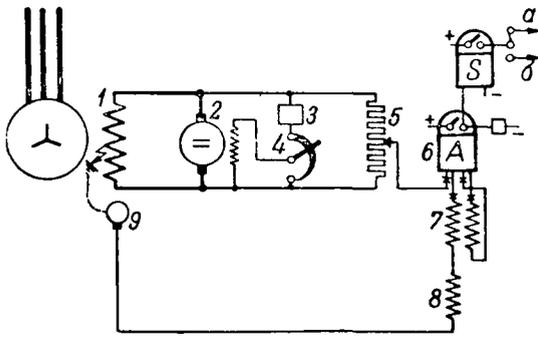


Рис. 1. Принципиальная схема защиты ротора турбогенератора от второго замыканий на землю. 1 — обмотка возбуждения; 2 — возбудитель, 3, 4 — реостаты цепи возбуждения; 5 — потенциометр; 6 — реле максимального тока; 7 — трансформатор, 8 — дроссель; 9 — шетка на валу генератора.

ченной в диагональ моста через разделительный трансформатор.

Основная обмотка включается непосредственно в диагональ моста, и в ней протекают как постоянный, так и переменный токи; компенсирующая обмотка питается только переменной составляющей тока, протекающего в диагонали моста. Обмотки реле и трансформатора включены таким образом, что ампервитки переменного тока компенсирующей обмотки по фазе противоположны ампервиткам переменного тока основной обмотки и при соответствующем подборе параметров схемы почти полностью их компенсируют [Л. 2].

Полученная схема защиты, в которой применяется простое и надежное электромагнитное реле, чувствительна к постоянному току и почти не реагирует на переменный ток (токи трогания реле соответственно 0,1 и более 4,8 а), что в данном случае очень важно, так как делает защиту чувствительной и селективной.

Первая попытка анализа этой схемы была предпринята, как указывалось К. С. Введенским и А. А. Воскресенским [Л. 1], с помощью схемы замещения трансформатора, явно ошибочной и впоследствии (после опубликования автором настоящей статьи критики ряда положений, выдвинутых К. С. Введенским и А. А. Воскресенским [Л. 2]) ими пересмотренной.

А. М. Федосеев и В. Л. Фабрикант [Л. 7] исследовали данную схему путем применения законов Кирхгофа и получили после ряда преобразований уравнения, связывающие токи в схеме с полными сопротивлениями и коэффициентами трансформации разделительного трансформатора и реле. Однако практическое применение уравнений для определения численных значений довольно затруднительно.

Ниже приводится попытка исследования схемы (рис. 1) путем замены реле и трансформатора этой схемы четырехполюсниками (рис. 2).

При этом пренебрегаем несинусоидальностью тока намагничивания трансформатора.

В данном случае, когда между входными и выходными зажимами как реле, так и трансформатора имеется только индуктивная связь, равенство токов обоих входных и выходных зажимов сохраняется всегда, и применение к этому

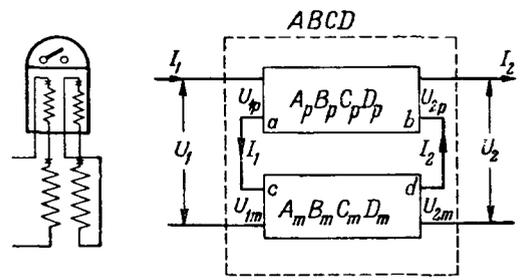


Рис. 2. Схема замещения двумя четырехполюсниками трансформатора и токового реле схемы защиты рис. 1

случаю теории четырехполюсников дает правильное решение задачи.

Составим схему соединения четырехполюсников, замещающих реле и трансформатор в соответствии с их действительным включением (рис. 2). Для такой схемы можно, пользуясь теорией четырехполюсников, найти постоянные четырехполюсника, эквивалентного данному соединению исходных четырехполюсников, которое может быть условно названо „поперечным“.

Обозначим постоянные четырехполюсника, эквивалентного данной схеме включения трансформатора и реле, A, B, C, D . Путем ряда преобразований уравнений, описывающих рабочий процесс четырехполюсников (вывод дан в приложении I), можно получить следующие выражения для постоянных четырехполюсника, эквивалентного поперечному соединению исходных четырехполюсников, через их постоянные:

$$A = \frac{A_p C_m + A_m C_p}{C_p + C_m}; \quad (1)$$

$$B = \frac{A_p D_m + A_m D_p + B_p C_m + B_m C_p - 2}{C_p + C_m}; \quad (2)$$

$$C = \frac{C_p C_m}{C_p + C_m}; \quad (3)$$

$$D = \frac{C_p D_m + C_m D_p}{C_p + C_m}. \quad (4)$$

Так как постоянные эквивалентного четырехполюсника определены, то тем самым устанавливается и связь между первичными и вторичными величинами при любом режиме.

Определим соотношение между постоянными четырехполюсников, замещающих трансформатор и реле, при котором будет иметь место совершенная компенсация ампервитков переменного тока в реле:

$$I_{p1} = I_{p2} \quad (5)$$

(предполагаем, что $\omega_{1p} = \omega_{2p}$).

Пренебрегаем сопротивлением проводов, соединяющих первичные и вторичные обмотки реле и трансформатора, и считаем, что эквивалентный четырехполюсник на выходной стороне замкнут накоротко:

$$\dot{U}_2 = 0. \quad (6)$$

Тогда

$$\dot{U}_1 = B\dot{I}_2; \quad (7)$$

$$\dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2 = CO + D\dot{I}_2 = DI_2,$$

а условие (5) сводится к

$$I_1 = DI_2 = I_2,$$

или

$$D = 1. \quad (8)$$

Но

$$D = \frac{C_p D_m + C_m D_p}{C_p + C_m} = 1,$$

следовательно,

$$C_p D_m + C_m D_p = C_p + C_m,$$

или

$$C_p (D_m - 1) + C_m (D_p - 1) = 0. \quad (9)$$

Предположим, что все данные реле и трансформатора, кроме числа витков его вторичной обмотки, остаются неизменными. При этом постоянные четырехполюсника, замещающего реле, а также активное сопротивление и реактивное сопротивление рассеяния первичной обмотки трансформатора не изменятся. Активное сопротивление и реактивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки трансформатора изменяются пропорционально ω_2^2 или, что то же самое, пропорционально

$$n^2 = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2.$$

Для того чтобы найти конкретное соотношение между параметрами реле и трансформатора, при котором будет иметь место совершенная компенсация, необходимо установить зависимость постоянных четырехполюсника, замещающего трансформатор, от параметров этого трансформатора, в частности от отношения чисел витков его вторичной и первичной обмоток

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Для того чтобы не связывать себя заранее с какой-либо условной схемой, необходимо определить эту зависимость, исходя из заведомо общих уравнений трансформатора [Л. 9]. (Вывод дан в приложении II).

В результате получается, что зависимость между постоянными четырехполюсника, замещающего трансформатор, и параметрами этого трансформатора имеет вид:

$$A = \frac{1}{\frac{\omega_2}{\omega_1}} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_{\mu 0}}\right);$$

$$B = \frac{\omega_2}{\omega_1} \left(Z_1 + Z_{20} + \frac{Z_1 Z_{20}}{Z_{\mu 0}}\right);$$

$$C = \frac{1}{\frac{\omega_2}{\omega_1} Z_{\mu 0}};$$

$$D = \frac{\omega_2}{\omega_1} \left(\frac{Z_{20}}{Z_{\mu 0}} + 1\right),$$

где все величины полных сопротивлений Z_1 , Z_{20} , $Z_{\mu 0}$ постоянны и соответствуют равенству чисел витков первичной и вторичной обмоток

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1} = 1.$$

Для реле принимаем

$$\omega_{2p} = \omega_{1p};$$

для трансформатора обозначаем, как ранее,

$$\frac{\omega_{2m}}{\omega_{1m}} = n.$$

Значения постоянных четырехполюсника, замещающего реле, выразятся в виде:

$$A_p = 1 + \frac{Z_{1p}}{Z_{\mu p}};$$

$$B_p = Z_{1p} + Z_{2p} + \frac{Z_{1p} Z_{2p}}{Z_{\mu p}};$$

$$C_p = \frac{1}{Z_{\mu p}};$$

$$D_p = 1 + \frac{Z_{2p}}{Z_{\mu p}}.$$

Для трансформатора соответственно:

$$A_m = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{Z_{1m}}{Z_{\mu m}}\right);$$

$$B_m = n \left(Z_{1m} + Z_{2m} + \frac{Z_{1m} Z_{2m}}{Z_{\mu m}}\right);$$

$$C_m = \frac{1}{n Z_{\mu m}};$$

$$D_m = n \left(1 + \frac{Z_{2m}}{Z_{\mu m}}\right).$$

Подставляя значения C_p , D_p , C_m , D_m в уравнение условия компенсации (9), найдем значение n , при котором $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$:

$$\frac{1}{Z_{\mu p}} \left[n \left(1 + \frac{Z_{2m}}{Z_{\mu m}}\right) - 1 \right] + \frac{1}{n Z_{\mu m}} \left[\left(1 + \frac{Z_{2p}}{Z_{\mu p}}\right) - 1 \right] = 0. \quad (10)$$

Корни этого уравнения будут:

$$n = \frac{Z_{\mu m} \pm \sqrt{Z_{\mu m}^2 - 4Z_{2p}(Z_{\mu m} + Z_{2m})}}{2(Z_{\mu m} + Z_{2m})}. \quad (11)$$

Таким образом, уравнение (10) имеет два корня, и оба имеют физический смысл. При практически встречающихся значениях полных сопротивлений один из них немного менее единицы, второй — малое число порядка нескольких сотых. Более удобно первое решение, которое можно найти приближенно по упрощенной формуле

$$n = \frac{Z_{\mu m}}{Z_{\mu m} + Z_{2m} + Z_{2p}}.$$

Вообще говоря, n — число комплексное.

Это обозначает, что для совершенной компенсации необходимо иметь не только определенное соотношение чисел витков первичной и вторичной обмоток трансформатора, но и осуществить поворот э. д. с. вторичной обмотки относительно э. д. с. первичной обмотки на некоторый угол, сравнительно небольшой.

Так, при параметрах имевшихся в нашем распоряжении трансформатора и реле $Z_{1m} = \angle 400 \angle 70^\circ \dots 100 \angle 70^\circ \text{ ом}$; $Z_{2m} = 3,5 \angle 45^\circ \text{ ом}$; $Z_{2p} = 10,1 \angle 5^\circ \text{ ом}$; оптимальное n колеблется примерно от $0,98 \angle 2^\circ$ до $0,99 \angle 2^\circ$ и может быть принято равным $0,98$.

При этом некомпенсированный переменный магнитный поток составит $2 \cdot 0,98 \cdot \sin \frac{2^\circ}{2} = 0,034$, а полнота компенсации будет примерно 97% , что и подтверждается опытами.

Выводы.

1. Замена трансформаторов эквивалентными четырехполюсниками и дальнейшее приведение схемы к одному четырехполюснику дает правильный результат всегда, если соблюдается фундаментальное условие теории четырехполюсников — равенство токов, протекающих через оба входных и выходных зажима четырехполюсника.

2. Замена сложной схемы эквивалентным четырехполюсником позволяет наглядно и точно проследить влияние изменения тех или иных параметров элементов схемы на токораспределение в схеме.

3. В некоторых случаях удобна рассмотренная в статье замена „поперечного“ соединения четырехполюсников эквивалентным четырехполюсником.

Приложение 1. Для того чтобы вывести зависимость между постоянными четырехполюсника, эквивалентного поперечному соединению двух заданных четырехполюсников, от постоянных этих четырехполюсников, напишем уравнения для обоих четырехполюсников, имея в виду, что в соответствии со схемой рис. 2 их первичные и вторичные токи одинаковы:

$$\dot{U}_{1p} = A_p \dot{U}_{2p} + B_p \dot{i}_2; \quad (I,1)$$

$$\dot{i}_1 = C_p \dot{U}_{2p} + D_p \dot{i}_2; \quad (I,2)$$

$$\dot{U}_{1m} = A_m \dot{U}_{2m} + B_m \dot{i}_2; \quad (I,3)$$

$$\dot{i}_1 = C_m \dot{U}_{2m} + D_m \dot{i}_2. \quad (I,4)$$

Сравнивая (I,2) и (I,4), находим:

$$\dot{U}_{2p} = \frac{C_m \dot{U}_{2m} + (D_m - D_p) \dot{i}_2}{C_p}, \quad (I,5)$$

но, с другой стороны,

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{2p} + \dot{U}_{2m};$$

отсюда

$$\dot{U}_{2p} = \dot{U}_2 - \dot{U}_{2m}. \quad (I,5a)$$

Сравнивая (I,5) и (I,5a), находим:

$$\dot{U}_{2m} = \frac{C_p \dot{U}_2 + (D_p - D_m) \dot{i}_2}{C_p + C_m}. \quad (I,6)$$

Из (I,5a) и (I,6) находим:

$$U_{2p} = \frac{C_m \dot{U}_2 + (D_m - D_p) \dot{i}_2}{C_p + C_m}. \quad (I,7)$$

Подставляя значения \dot{U}_{2p} и \dot{U}_{2m} в (I,1) и (I,3), найдем:

$$U_{1p} + U_{1m} = \frac{A_p C_m + A_m C_p}{C_p + C_m} \dot{U}_2 + \left[\frac{A_p D_m - A_p D_p + C_p B_p + C_m B_p + A_m D_p - A_m D_m + C_p B_m}{C_p + C_m} + \frac{C_m B_m}{C_p + C_m} \right] \dot{i}_2.$$

Так как для любого пассивного четырехполюсника

$$AD - BC = 1,$$

то

$$\dot{U}_1 = \frac{A_p C_m + A_m C_p}{C_p + C_m} \dot{U}_2 + \frac{A_p D_m + A_m D_p + B_p C_m + B_m C_p - 2}{C_p + C_m} \dot{i}_2;$$

отсюда

$$A = \frac{A_p C_m + A_m C_p}{C_p + C_m};$$

$$B = \frac{A_p D_m + A_m D_p + B_p C_m + B_m C_p - 2}{C_p + C_m}.$$

Для определения C и D подставим (I,6) в (I,4):

$$\dot{i}_1 = \frac{C_p C_m}{C_p + C_m} \dot{U}_2 + \frac{C_m D_p + C_p D_m}{C_p + C_m} \dot{i}_2;$$

отсюда

$$C = \frac{C_p C_m}{C_p + C_m};$$

$$D = \frac{C_p D_m + C_m D_p}{C_p + C_m}.$$

Таким образом, постоянные четырехполюсника, эквивалентного схеме „поперечного“ включения двух исходных четырехполюсников определены.

Приложение II. Для определения зависимости постоянных четырехполюсника, замещающего трансформатор, от параметров трансформатора напишем систему дифференциальных уравнений, описывающих рабочие процессы первичной и вторичной обмоток трансформатора [Л. 9]:

$$u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}; \quad (II,1)$$

$$0 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + u_2. \quad (II,2)$$

Так как мы рассматриваем только установившийся процесс и считаем все токи и напряжения синусоидальными, то от уравнений (II,1) и (II,2), дающих связь между мгновенными значениями токов и напряжений, нетрудно перейти к уравнениям, в которые входят их действующие значения. При этом необходимо разложить полные индуктивности первичной и вторичной обмоток трансформатора на индуктивности S , обусловленные магнитными потоками рассеяния каждой из обмоток, и индуктивности, обусловленные магнитным потоком, который замыкается по стальному сердечнику трансформатора.

Имеем:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 R_1 + I_1 j \omega \left(S_1 + M \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) + \dot{I}_2 j \omega M; \quad (\text{II},3)$$

$$0 = \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 j \omega \left(S_2 + M \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) + \dot{I}_1 j \omega M + \dot{U}_2. \quad (\text{II},4)$$

Обозначим величину взаимной индуктивности первичной и вторичной обмоток при $\omega_2 = \omega_1$ через M_0 . Тогда, очевидно, при изменении ω_2

$$M = M_0 \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Параметры вторичной обмотки трансформатора в предположении постоянства занимаемого этой обмоткой объема изменяются пропорционально квадрату ее числа витков:

$$R_2 = R_{20} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2; \quad S_2 = S_{20} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2.$$

Подставляя значения M , R_2 , S_2 в (II,3) и (II,4) и заменяя $\omega S_1 = X_1$; $\omega S_{20} = X_{20}$, получим:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 R_1 + \dot{I}_1 j X_1 + I_1 j \omega M_0 + \dot{I}_2 j \omega M_0 \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (\text{II},5)$$

$$0 = \dot{I}_2 R_{20} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + \dot{I}_2 j X_{20} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + \dot{I}_2 j \omega M_0 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + \dot{I}_1 j \omega M_0 \frac{\omega_2}{\omega_1} + \dot{U}_2 \quad (\text{II},6)$$

Из (II,4) можно найти I_2 :

$$\dot{I}_2 = -\dot{U}_2 \frac{1}{\frac{\omega_2}{\omega_1} j \omega M_0} -$$

$$- \dot{I}_1 \frac{R_{20} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + j X_{20} \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 + j \omega M_0 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2}{\frac{\omega_2}{\omega_1} j \omega M_0}. \quad (\text{II},7)$$

Подставляя полученное значение I_2 в (II,5), найдем:

$$\dot{U}_1 = -\dot{U}_2 \frac{R_1 + j X_1 + j \omega M_0}{\frac{\omega_2}{\omega_1} j \omega M_0} -$$

$$- \dot{I}_1 \frac{\omega_2 (R_{20} + j X_{20} + j \omega M_0) (R_1 + j X_1 + j \omega M_0) - (j \omega M_0)^2}{j \omega M_0}. \quad (\text{II},8)$$

Уравнения (II,8) и (II,7) по форме являются уравнениями четырехполюсников, но так как при выводе основных уравнений четырехполюсника положительные направления вторичного тока и напряжения принимаются обратными по отношению к положительным направлениям, принятым при выводе дифференциальных уравнений трансформатора, то знаки перед \dot{I}_2 и \dot{U}_2 следует изменить на обратные.

В системе дифференциальных уравнений трансформатора (II,1), (II,2) потери в стали сердечника трансформатора не учтены.

Для их учета достаточно заменить $j \omega M_0$ на

$$Z_{\mu 0} = R_0 + j \omega M_0.$$

Внося эти изменения в уравнения (II,8) и (II,7), а также заменяя для упрощения

$$R_{20} + j X_{20} = Z_{20},$$

$$R_1 + j X_1 = Z_1,$$

получим:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \frac{1}{\omega_1} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_{\mu 0}} \right) + \dot{I}_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} \left(Z_1 + Z_{20} + \frac{Z_1 Z_{20}}{Z_{\mu 0}} \right); \quad (\text{II},9)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_2 \frac{1}{\omega_1} \frac{1}{Z_{\mu 0}} + \dot{I}_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_{\mu 0}} \right). \quad (\text{II},10)$$

Величины всех полных сопротивлений (II,9) и (II,10) не зависят от числа витков вторичной обмотки трансформатора.

Выписывая из (II,9) и (II,10) значения коэффициентов при \dot{U}_2 и \dot{I}_2 , легко определить постоянные четырехполюсника, замещающего данный трансформатор:

$$A = \frac{1}{\omega_1} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_{\mu 0}} \right);$$

$$B = \frac{\omega_2}{\omega_1} \left(Z_1 + Z_{20} + \frac{Z_1 Z_{20}}{Z_{\mu 0}} \right);$$

$$C = \frac{1}{\omega_1 Z_{\mu 0}};$$

$$D = \frac{\omega_2}{\omega_1} \left(1 + \frac{Z_{20}}{Z_{\mu 0}} \right),$$

что и является решением поставленной задачи.

Литература

1. К. С. Введенский и А. А. Воскресенский. Защита роторов генераторов от замыкания на землю в двух точках. Эл. станции, № 2, 1948.

2. Г. А. Киреев. Защита роторов турбогенераторов от второго заземления цепей возбуждения (из опыта выполнения защиты в Свердловэнерго). Эл. станции, № 12, 1949.

3. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники. Ч. 2, Госэнергоиздат.

4. Л. М. Пиотровский. Электрические машины. Госэнергоиздат, 1950.

5. И. К. Васильев. Замечания по материалам ЦСРЗАИ Свердловэнерго. Эл. станции, № 12, 1949.

6. А. А. Воскресенский. Замечания по материалам ЦСРЗАИ Свердловэнерго. Эл. станции № 12, 1949.

7. А. М. Федосеев и В. Л. Фабрикант. К вопросу о защите обмотки возбуждения генератора от двойных замыканий на землю. Эл. станции, № 12, 1949.

8. Saueg, Theorie der linearen Wechselstromschaltungen, Berlin, 1941.

9. М. П. Костенко. Электрические машины. Госэнергоиздат, 1944.

[23. 10. 1951]



Токи небаланса трансформаторов тока нулевой последовательности

Кандидат техн. наук И. М. СИРОТА

Институт электротехники Академии наук УССР

Старые защиты от замыканий на землю, выполненные при помощи фильтра, составленного из трех трансформаторов тока, не обеспечивают требуемой чувствительности, а во многих случаях и селективности срабатывания [Л. 1]. Поэтому Техническим управлением МЭС рекомендованы новые защиты, основанные на применении трансформаторов тока нулевой последовательности.

Исследования Института электротехники Академии наук УССР [Л. 2, 3, 4], разработки ЦНИЭЛ МЭС [Л. 5] и другие работы способствовали тому, что в настоящее время трансформаторы тока нулевой последовательности разных типов успешно эксплуатируются на многих генераторах и других элементах оборудования электростанций.

Основным вопросом, с которым приходится постоянно сталкиваться при разработке, наладке и эксплуатации трансформаторов тока нулевой последовательности, является отстройка от тока небаланса, возникающего во вторичной цепи этих трансформаторов при отсутствии тока нулевой последовательности. Как известно, этот ток небаланса должен быть меньше тока срабатывания реле с учетом коэффициента запаса. Следовательно, первичный ток небаланса [Л. 6] должен быть меньше первичного тока трогания защиты с учетом коэффициента запаса. В свою очередь, ток трогания защиты не должен превосходить расчетного минимального тока неполного замыкания на землю.

В дальнейшем изложении все электрические величины приведены к одному витку.

Общие свойства тока небаланса, не зависящие от конструкции трансформатора тока. Токи небаланса возникают в трансформаторе тока нулевой последовательности любого типа. Причина их возникновения состоит в том, что взаимоиנדукция между разными фазами первичной цепи и вторичной обмоткой неодинакова.

Поскольку потоки взаимоиנדукции проходят значительную часть своего пути по воздуху, качество стали магнитопровода мало влияет на их величину и распределение. Опыты, проведенные на трансформаторах тока нулевой последовательности разных типов и при различных

исследуются условия возникновения и основные свойства токов небаланса, возникающих в трансформаторах тока нулевой последовательности, вследствие несимметричного расположения первичных токов или неравномерной нагрузки жил параллельных кабелей. Указаны основные методы ограничения этих токов, принятые при изготовлении трансформаторов тока нулевой последовательности с магнитопроводом вытянутой прямоугольной формы.

условиях (разный характер несимметрии первичной цепи, наличие и отсутствие подмагничивания) [Л. 2 и 3], показали, что э. д. с. и токи небаланса, вызываемые потоками взаимоиנדукции при синусоидальном первичном токе, незначительно отличаются от синусоидальных.

В этих опытах первичный ток изменялся от нуля до таких значений, при которых напряжение небаланса значительно превосходило величину, необходимую для срабатывания обычного реле с потреблением 0,1...0,2 вА (при чувствительности по первичному току 5...6 А). Во время опытов не наблюдалось заметного нарушения пропорциональности между эффективными значениями первичного тока и напряжения и тока небаланса.

Следовательно, можно с достаточной точностью считать, что для условий, представляющих практический интерес, взаимоиנדуктивности между первичной и вторичной цепями трансформатора тока нулевой последовательности являются постоянными.

Совместное влияние токов трех фаз, произвольно расположенных и расщепленных на несколько параллельных кабелей или шин ($I_A + I_B + I_C = 0$), заменяется влиянием двух бифилярных пар токов: а) током одной из фаз, например I_A , протекающим в жилах фаз А и В, и б) током другой фазы, например I_C , протекающим в жилах С и В. Каждая из этих пар токов создает магнитный поток, замыкающийся в воздухе и частично сцепляющийся со вторичной обмоткой трансформатора (рис. 1).

Обозначив соответствующие взаимоиנדуктивности $M_{нбА}$ и $M_{нбС}$, находим результирующее напряжение небаланса, наводимое во вторичной обмотке:

$$\dot{U}_{нб} = -j\omega (M_{нбА} \dot{I}_A \pm M_{нбС} \dot{I}_C) \quad (1)$$

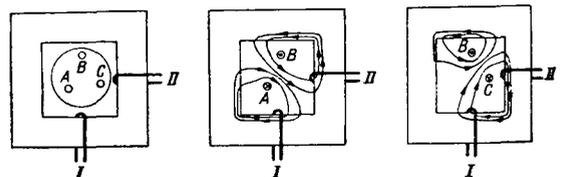


Рис. 1.

или, введя симметричные составляющие токов прямого (\dot{I}_{A1}) и обратного (\dot{I}_{A2}) следования фаз:

$$\dot{U}_{нб} = -j\omega [(M_{нбA} \pm \bar{a}M_{нбC}) \dot{I}_{A1} + (M_{нбA} \pm \bar{a}^2 M_{нбC}) \dot{I}_{A2}]. \quad (2)$$

Знаки плюс или минус в правой части уравнений (1) и (2) зависят от взаимного расположения фаз и обмоток трансформатора тока нулевой последовательности. Например, при одном кабеле, расположенном в окне трансформатора тока (рис. 1), обе первичные петли $A-B$ и $C-B$ при одинаковом направлении токов I_A и I_C создают с обмоткой I однополярные магнитные сцепления, а с обмоткой II — противопололярные. Соответственно в правой части уравнений (1) и (2) перед $M_{нбC}$ в первом случае должен быть плюс, а во втором — минус.

На основании уравнения (2) можно определить, при трехфазном или при двухфазном сквозном металлическом коротком замыкании ток небаланса трансформатора будет больше, если в обоих случаях ток короткого замыкания равен I_k .

Абсолютная величина напряжения небаланса при симметричном трехфазном коротком замыкании

$$U_{нб}^{(3)} = \omega (M_{нбA} \pm \bar{a}M_{нбC}) I_k. \quad (3)$$

При двухфазном коротком замыкании первичные токи связаны между собою соотношениями:

$$I_{A1} = I_{A2} = \frac{I_k}{\sqrt{3}};$$

$$\dot{I}_{A1} = -\bar{a}\dot{I}_{A2} \text{ (замыкание между фазами } A \text{ и } B);$$

$$\dot{I}_{A1} = -\dot{I}_{A2} \text{ (замыкание между фазами } B \text{ и } C);$$

$$\dot{I}_{A1} = -\bar{a}^2\dot{I}_{A2} \text{ (замыкание между фазами } A \text{ и } C).$$

С помощью этих соотношений и уравнения (2) путем подстановки получим соответствующие абсолютные величины напряжения небаланса:

$$U_{нб}^{(2)} = U_{нб}^{A-B} = \omega M_{нбA} I_k;$$

$$U_{нб}^{(2)} = U_{нб}^{B-C} = \omega M_{нбC} I_k;$$

$$U_{нб}^{(2)} = U_{нб}^{A-C} = \omega (M_{нбA} \mp M_{нбC}) I_k.$$

Найдем, в каких пределах может изменяться отношение

$$\frac{U_{нб}^{(2)}}{U_{нб}^{(3)}}.$$

Предположив, что $M_{нбA} \geq M_{нбC} \geq 0$, имеем:

$$\frac{U_{нб}^{A-B}}{U_{нб}^{(3)}} = \frac{M_{нбA}}{|M_{нбA} \pm \bar{a}M_{нбC}|} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dots \frac{2}{\sqrt{3}};$$

$$\frac{U_{нб}^{B-C}}{U_{нб}^{(3)}} = \frac{M_{нбC}}{|M_{нбA} \pm \bar{a}M_{нбC}|} = 0 \dots \frac{2}{\sqrt{3}};$$

$$\frac{U_{нб}^{A-C}}{U_{нб}^{(3)}} = \frac{M_{нбA} \mp M_{нбC}}{|M_{нбA} \pm \bar{a}M_{нбC}|} = 0 \dots \frac{2}{\sqrt{3}}.$$

Эти соотношения подтвердились при испытаниях. Следовательно, ток небаланса при двухфазном коротком замыкании будет во всех случаях того же порядка (не более 115%) или меньше, чем при трехфазном коротком замыкании.

Это свойство трансформатора тока нулевой последовательности весьма благоприятно, так как позволяет при наладке защиты ограничиться лишь измерением тока небаланса при нормальной симметричной нагрузке.

Дальнейшие рассуждения ведутся применительно к симметричному трехфазному короткому замыканию.

Принимаем:

$$U_{нб}^{(3)} = x_{нб} I_k, \quad (4)$$

где

$$x_{нб} = \omega |M_{нбA} \pm \bar{a}M_{нбC}|$$

и является результирующим, приведенным к одному витку сопротивлением взаимоиндукции для токов прямого следования фаз. Сопротивление $x_{нб}$ определяется конструктивными размерами и взаимным расположением обмоток трансформатора тока нулевой последовательности и практически не зависит от марки стали магнитопровода.

Схема замещения трансформатора тока нулевой последовательности для тока небаланса (рис. 2, а) существенно отличается от схемы замещения для тока замыкания на землю (рис. 2, б). В первой из этих схем ветвь намагничивания образуется сопротивлением $x_{нб}$, которое создается, как было указано выше, потоком взаимоиндукции, проходящим в воздухе. Поток, замыкающийся полностью в стали, сцепляется только со вторичной обмоткой. Поэтому в данном случае сопротивление холостого хода z'_0 , создаваемое этим потоком, является сопротивлением самоиндукции вторичной обмотки и играет роль нагрузки трансформатора тока нулевой последовательности. В соответствии с этим z'_0 включено во вторичную цепь последовательно с z_2 , представляющим собой сумму сопротивлений реле, соединительных проводов, рассеяния вторичной обмотки и ее омического сопротивления (рис. 2, а).

В схеме (рис. 2, б) сопротивление холостого хода z_0 , как в обычном трансформаторе тока, является ветвью намагничивания. Обычно $z_0 \geq z'_0$; кроме того, z_0 пропорционально магнитной проницаемости магнитопровода и, следовательно,

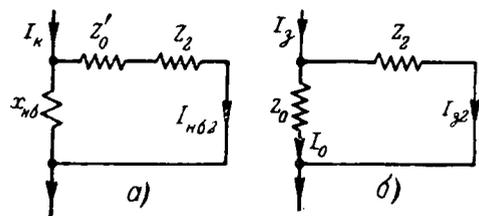


Рис. 2. Схемы замещения трансформатора тока нулевой последовательности. а — для тока небаланса; б — для тока замыкания на землю.

зависит от тока замыкания на землю I_3 . При намагничивающей силе, имеющей место в данном случае, магнитная проницаемость принята постоянной.

Поскольку сопротивление $x_{нб}$ во много раз меньше сопротивлений z'_0 и z_2 , ток небаланса в реле согласно схеме (рис. 2, а)

$$I_{нб2} \approx \frac{I_k x_{нб}}{|Z'_0 + Z_2|}. \quad (5)$$

При проектировании защиты нас интересует не абсолютная величина тока небаланса, а его отношение к току срабатывания реле. На основании схемы рис. 2, б поступающая в реле составляющая тока замыкания на землю

$$I_{з2} = I_3 \frac{z_0}{|Z_0 + Z_2|}. \quad (6)$$

С помощью уравнений (5) и (6) определяем относительную величину тока небаланса:

$$\frac{I_{нб2}}{I_{з2}} = \frac{I_k x_{нб}}{I_3 z_0} \left| \frac{Z_0 + Z_2}{Z'_0 + Z_2} \right|. \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что в трансформаторе тока нулевой последовательности без подмагничивания с уменьшением тока I_3 относительный ток небаланса быстро увеличивается, так как сопротивление z_0 с уменьшением I_3 уменьшается, приближаясь к z'_0 . С увеличением z_2 относительный ток небаланса несколько уменьшается.

Если приближенно принять магнитную проницаемость стали μ_0 при наличии тока замыкания на землю, а также в схеме рис. 2а равной начальной проницаемости μ'_0 , то $z_0 \approx z'_0$. Следовательно, относительная величина тока небаланса

$$\frac{I_{нб2}}{I_{з2}} \approx \frac{I_k x_{нб}}{I_3 z'_0}. \quad (8)$$

Для определения первичного тока небаланса принимаем $I_{нб2} = I_{з2}$ и $I_3 = I_{нб}$, откуда

$$I_{нб} = \frac{I_k x_{нб}}{z'_0}, \quad (9)$$

а относительная величина тока небаланса

$$\frac{I_{нб2}}{I_{з2}} = \frac{I_{нб}}{I_3}. \quad (10)$$

Из уравнений (8), (9) и (10) следует, что относительная величина тока небаланса и первичный ток небаланса трансформатора тока нулевой последовательности, так же как и фильтра, составленного из трех трансформаторов тока, почти не зависят от параметров реле.

При заданных размерах окна трансформатора нулевой последовательности сопротивление $x_{нб}$ в первом приближении пропорционально поверхности магнитопровода, а сопротивление z'_0 — площади его поперечного сечения. Поэтому применение реле с очень малым потреблением при

одновременном сокращении веса трансформатора тока нулевой последовательности обычно приводит к увеличению тока $I_{нб}$.

Первичный ток небаланса можно ограничить только путем уменьшения $x_{нб}$ и увеличения сопротивления холостого хода z_0 . Последнее достигается посредством применения сталей с повышенной начальной магнитной проницаемостью или подмагничивания обычной трансформаторной стали [Л. 2].

В случае применения трансформатора тока нулевой последовательности с подмагничиванием приходится считаться с возможностью снятия подмагничивания в момент короткого замыкания. Поэтому в уравнении (7) можно пренебречь сопротивлением z'_0 по сравнению с сопротивлением z_2 :

$$\frac{I_{нб2}}{I_{з2}} \approx \frac{I_k x_{нб}}{I_3 z_{0\mu}} \left| \frac{Z_{0\mu} + Z_2}{Z_2} \right| \quad (11)$$

и соответственно:

$$I_{нб} \approx \frac{I_k x_{нб}}{z_{0\mu}} \left| \frac{Z_{0\mu} + Z_2}{Z_2} \right|. \quad (12)$$

Здесь $z_{0\mu}$ — сопротивление холостого хода, увеличенное вследствие подмагничивания.

При изменении сопротивления вторичной цепи от оптимального $z_2 = z_{0\mu}$ до $z_2 \gg z_{0\mu}$ ток небаланса изменяется в пределах

$$I_{нб} = (2 \dots 1) \frac{I_k x_{нб}}{z_{0\mu}}.$$

На основании этого при шинных трансформаторах тока нулевой последовательности, когда неблагоприятное расположение ближайших участков ошиновки приводит к повышенным значениям $x_{нб}$, для увеличения коэффициента запаса защиты выбирается реле с повышенным сопротивлением [Л. 4].

На практике при наладке защиты для определения первичного тока небаланса трансформаторов тока нулевой последовательности любого типа и при любом сопротивлении реле удобно пользоваться следующей формулой, вытекающей из уравнений (9), (10), (11) и (12):

$$I_{нб\text{ нр}} = \frac{u_{р\text{ нб}}}{u_{р\text{ тр}}} I_{з\text{ тр}}. \quad (13)$$

Здесь $I_{нб\text{ нр}}$ — первичный ток небаланса при нормальном режиме работы;

$u_{р\text{ нб}}$ — напряжение небаланса, измеренное на зажимах реле при том же режиме;

$u_{р\text{ тр}}$ — напряжение трогания реле;

$I_{з\text{ тр}}$ — первичный ток трогания реле.

Все величины, стоящие в правой части уравнения (13), определяются путем непосредственного измерения.

Совместное включение нескольких трансформаторов тока нулевой последовательности. В тех случаях, когда установка одного общего

трансформатора тока нулевой последовательности, охватывающего все параллельные кабели данного присоединения затруднена, устанавливаются 2 или 3 группы трансформаторов или отдельный трансформатор на каждом кабеле с параллельным или последовательным соединением вторичных обмоток.

Предположим сначала, что все трансформаторы тока нулевой последовательности одинаковы, сопротивления жил кабелей равны между собой, и следовательно, при нормальном режиме работы сумма токов трех фаз в каждом кабеле равна нулю.

Рассмотрим схемы замещения для тока небаланса одного из трансформаторов (рис. 3, а) и для тока замыкания на землю (рис. 3, б) в случае, когда защита выполнена с помощью трех одинаковых трансформаторов тока нулевой последовательности. Сопротивлением вторичных обмоток Z_2 при этом пренебрежем. Нетрудно убедиться, что уравнение для этих схем вполне идентично с уравнением (7) для одного трансформатора, но только в данном случае вместо Z_2 входит его утроенная величина $3Z_2$:

$$\frac{I_{нб2}}{I_{з2}} = \frac{I_k x_{нб}}{3I_3 z_0} \left| \frac{Z_0 + 3Z_2}{Z_0' + 3Z_2} \right|.$$

В общем случае первичный ток небаланса, вызываемый совместным действием э. д. с. отдельных трансформаторов тока нулевой последовательности при их числе, равном n ,

$$I_{нб} = \frac{I_k |x_{нб1} + x_{нб2} + \dots + x_{нбn}|}{n x_0'} \quad (14)$$

Здесь в комплексах $x_{нб1}, x_{нб2} \dots x_{нбn}$ учитываются фазы э. д. с. небаланса.

Учитывая вероятность различия фаз в отдельных трансформаторах тока нулевой последовательности и, следовательно, частичную взаимную компенсацию э. д. с. небаланса, можно приблизительно считать, что результирующий ток $I_{нб}$ в рассматриваемых условиях не превзойдет величины, имеющей место для каждого трансформатора в отдельности.

Следует отметить, что при установке на каждом кабеле достаточно идентичных индивидуальных кольцевых трансформаторов тока нулевой последовательности с распределенной обмоткой и неразъемным магнитопроводом можно достигнуть меньших токов небаланса, чем при групповых или индивидуальных трансформаторах других типов.

Если сопротивления жил кабелей не равны между собой, равновесие токов в параллельных кабелях нарушается, и при неодинаковых трансформаторах тока нулевой последовательности во вторичной цепи защиты возникает дополнительный ток небаланса.

Обозначим суммы первичных токов трансформаторов тока нулевой последовательности через $I', I'', I''' \dots I^{(n)}$ ($I' + I'' + I''' + \dots + I^{(n)} = 0$); сопротивления намагничивания трансформатора —

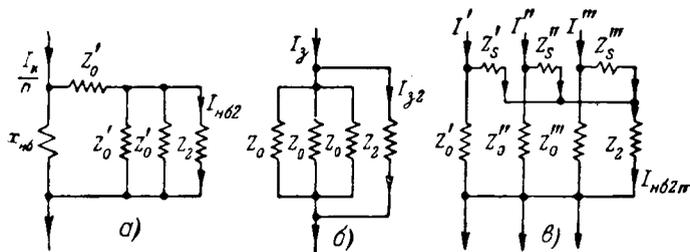


Рис. 3. Схемы замещения параллельно включенных трансформаторов тока нулевой последовательности.

а — для тока небаланса от несимметричных магнитных потоков одного из трансформаторов тока; б — для тока замыкания на землю при одинаковых трансформаторах тока (Z_s принимается равным нулю); в — для дополнительного тока небаланса от неравномерного распределения токов в кабелях.

через $Z_0', Z_0'', Z_0''' \dots Z_0^{(n)}$; сопротивления вторичных обмоток (рассеяния и омическое) и соединительных проводов — через $Z_s', Z_s'' \dots Z_s^{(n)}$; сопротивления холостого хода со стороны вторичных обмоток — через $Z', Z'' \dots Z^{(n)}$. Приближенно принимая магнитную проницаемость каждого трансформатора постоянной, находим согласно схеме замещения (рис. 3, в) дополнительный ток небаланса:

$$I_{нб2n} = \frac{I' Z_0' Z'' Z''' + I'' Z_0'' Z' Z''' + I''' Z_0''' Z' Z''}{Z' Z'' Z''' + Z_s (Z' Z'' + Z' Z''' + Z'' Z''')}.$$

Что касается вторичного тока замыкания на землю, то его величина зависит от распределения первичного тока I_3 по параллельным кабелям. Однако, учитывая, что сопротивления $Z_0', Z_0'', Z_0''' \dots Z_0^{(n)}$ мало отличаются от соответствующих сопротивлений $Z', Z'', Z''' \dots Z^{(n)}$, можно с достаточной степенью точности считать для всех случаев

$$I_{з2} = I_3 \frac{3Z' Z'' Z'''}{Z_s (Z' Z'' + Z' Z''' + Z'' Z''')}.$$

Отсюда определяется относительная величина тока небаланса:

$$\frac{I_{нб2n}}{I_{з2}} = \frac{I' Z_0'}{I_3 Z'} + \frac{I'' Z_0''}{I_3 Z''} + \frac{I''' Z_0'''}{I_3 Z'''} + \dots + \frac{I^{(n)} Z_0^{(n)}}{I_3 Z^{(n)}} \quad (15)$$

Первичный ток небаланса

$$I_{нб1n} = I' \frac{Z_0'}{Z'} + I'' \frac{Z_0''}{Z''} + I''' \frac{Z_0'''}{Z'''} + \dots + I^{(n)} \frac{Z_0^{(n)}}{Z^{(n)}},$$

или

$$-I_{нб1n} = I' \frac{Z_s'}{Z'} + I'' \frac{Z_s''}{Z''} + I''' \frac{Z_s'''}{Z'''} + \dots + I^{(n)} \frac{Z_s^{(n)}}{Z^{(n)}} \quad (16)$$

Из уравнения (16) видно, что первичный ток небаланса, обусловленный неравномерным распределением тока нагрузки по параллельным кабелям, определяется соотношением сопротивлений рассеяния и холостого хода отдельных трансформаторов тока нулевой последовательности.

Следует отметить, что уравнения (15) и (16) действительны, в частности, и для обычного фильтра, составленного из трех трансформаторов тока.

В отличие от (9) и (12) сопротивления $Z', Z'', Z''' \dots Z^{(n)}$, а следовательно, и ток небаланса $I_{нб n}$ при достаточно больших токах $I', I'', I''' \dots I^{(n)}$ зависят от параметров вторичной цепи трансформаторов тока нулевой последовательности. При индивидуальных трансформаторах тока, даже при сравнительно небольшой неравномерности, ток $I_{нб n}$ может достигнуть опасной величины.

Для иллюстрации определим возможный ток $I_{нб n}$ для следующих условий. В одном из параллельных кабелей неуравновешенный ток при нормальной нагрузке равен $15 a$, а при 15-кратном коротком замыкании $225 a$. Трансформатор тока нулевой последовательности, смонтированный на этом кабеле, имеет повышенное отношение $\frac{z_s}{z'} = 0,05$, например вследствие насыщения магнитопровода потоком тока I' , а также аperiodической составляющей тока переходного режима. У остальных трансформаторов тока это отношение равно $0,02$. Сумма неуравновешенных токов в этих трансформаторах тока

$$j'' + j''' + \dots + j^{(n)} = -225 a.$$

По формуле (16) находим первичный ток небаланса:

$$I_{нб n} = 225 (0,05 - 0,02) = 6,75 a.$$

Рассуждая аналогично, нетрудно убедиться, что в случае последовательного соединения обмоток всех трансформаторов тока нулевой последовательности первичные токи небаланса получаются того же порядка, что и при параллельном соединении.

Несмотря на то, что вероятность возникновения больших токов небаланса в условиях трогания токовой блокировки, выводящей защиту из действия, здесь невелика, все же с ней приходится считаться. Если, кроме того, учесть необходимость применения при индивидуальных трансформаторах тока нулевой последовательности сложного реле с очень небольшим потреблением, то следует признать, что в большинстве случаев целесообразно устанавливать один общий трансформатор тока или при невозможности охвата им всех кабелей — два групповых трансформатора.

Методы ограничения сопротивления $x_{нб}$ групповых кабельных и шинных трансформаторов тока нулевой последовательности. Ограничение сопротивления $x_{нб}$ достигается путем рационального выбора геометрической формы и размеров магнитопровода трансформатора тока, расположения и схемы соединения его обмоток.

Ниже кратко изложены результаты опытов, проведенных на изготовленных трансформаторах тока нулевой последовательности. Более подробные данные помещены в [Л. 7 и 8].

Как известно, полное устранение взаимной индукции между первичной ($I_A + I_B + I_C = 0$) и вто-

ричной цепями теоретически достигается на тороидальном магнитопроводе со вторичной обмоткой, распределенной равномерно по всей его длине, без зазоров между витками. Равномерное распределение витков при любой другой форме магнитопровода не устраняет взаимной индукции независимо от схемы соединения обмотки.

Практически даже в тороидальном трансформаторе тока нулевой последовательности с равномерно распределенной обмоткой наличие изоляции между витками в окне и на торцевых сторонах вызывает появление довольно большого напряжения и тока небаланса [Л. 9]. При конструктивных размерах тороида, которые позволяют разместить кабели или шины с их изоляцией, сопротивление $x_{нб}$ получается примерно в 2 раза меньше, чем в кабельных трансформаторах тока, и примерно равным аналогичному сопротивлению шинных трансформаторов тока рассмотренных ниже типов.

К наиболее существенным недостаткам тороидальных трансформаторов тока нулевой последовательности при их применении для охвата группы кабелей относятся трудность выполнения равномерно распределенной обмотки на большом магнитопроводе, а также необходимость монтажа концевых воронок при установке трансформатора тока на действующих кабелях. Кроме того, в конструктивном отношении затруднительно через окно трансформатора тока пропустить пучок всех кабелей защищаемого присоединения.

При практическом осуществлении защиты крупных генераторов Институтом электротехники Академии наук УССР магнитопровод трансформатора тока был принят в виде прямоугольной шихтованной рамки, набираемой из прямоугольных пластин трансформаторной стали. Вторичная обмотка трансформатора с таким магнитопроводом состоит из 2 или 4 сосредоточенных секций. Преимуществом прямоугольных трансформаторов тока является технологическая простота их изготовления и небольшое количество отходов стали. Кабели в окне трансформатора тока располагаются в один ряд или в два ряда в шахматном порядке. Четыре секции обмотки помещаются симметрично на длинных сторонах магнитопровода и соединяются между собой последовательно-параллельно (рис. 4). В трансформаторах тока с подмагничиванием секции помещаются попарно

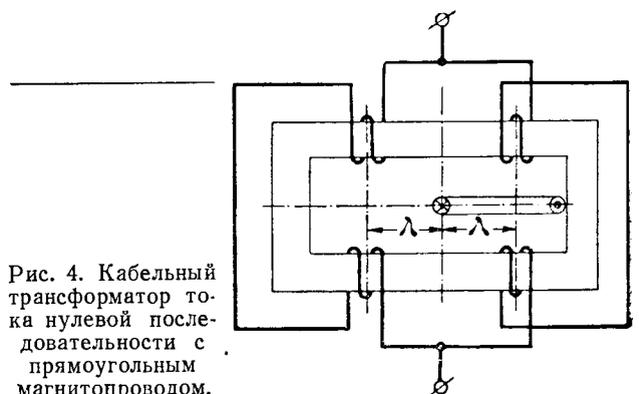


Рис. 4. Кабельный трансформатор тока нулевой последовательности с прямоугольным магнитопроводом.

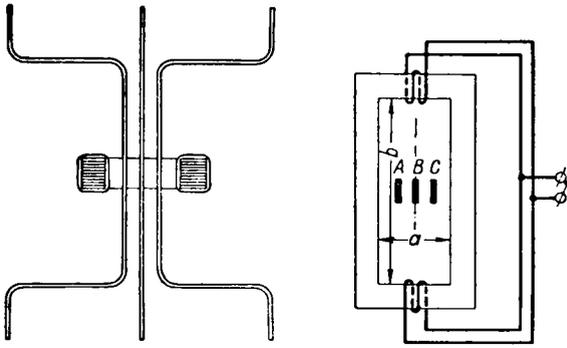


Рис. 5. Схема устройства шинного трансформатора тока нулевой последовательности.

на противоположных сторонах разных магнитопроводов.

Расстояние между секциями 2λ определяется экспериментально для каждого соотношения размеров трансформатора тока нулевой последовательности. При наличии на длинной оси окна широкой несимметричной петли тока (рис. 4) в каждой паре секций должны быть получены равные и прямо противоположные э. д. с.

Такое выполнение обмотки кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности обеспечивает достаточно малые сопротивления $x_{нб}$ и токи $I_{нб}$ при всех практически возможных условиях несимметрии первичной цепи и, следовательно, исключает необходимость в блокировке защиты. По данным наладочных испытаний защиты на ряде генераторов первичный ток небаланса при нормальной нагрузке кабелей и снятом подмагничивании трансформаторов тока не превосходит $I_{нб кр} = 0,07 a$.

В шинных трансформаторах тока нулевой последовательности условия борьбы с токами небаланса являются более тяжелыми, так как здесь первичные токи не расщеплены, как в кабельном трансформаторе тока, на несколько параллельных цепей. Однако и в этих трансформаторах тока путем применения магнитопровода вытянутой формы с отношением сторон окна $\frac{b}{a} = 2,5 \dots 4$

удалось добиться необходимого ограничения $x_{нб}$.

Фазы первичной цепи шинного трансформатора тока располагаются на небольших расстояниях одна от другой на короткой оси окна, а две параллельные секции вторичной обмотки — на торцах магнитопровода (рис. 5). В тех случаях, когда при наладке защиты измеренное на одной из секций напряжение $u_{нб нр}$ оказывается меньше, чем на двух секциях, соединенных параллельно, используется только одна секция. Кроме того, предъявляются определенные требования к размещению ближайших участков ошиновки [Л. 4]. В результате при оптимальном сопротивлении реле, нормальной нагрузке шин и снятом подмагничивании трансформатора тока первичный ток небаланса получается обычно равным $0,1 \dots 0,5 a$.

На основании отмеченной в начале настоящей статьи пропорциональности между первичными токами нагрузки и токами небаланса можно опре-

делять ток при сквозных коротких замыканиях по формуле

$$I_{нб кз} = I_{нб нр} K_{кз},$$

где $K_{кз}$ — ожидаемая кратность тока короткого замыкания.

Для выяснения возможного влияния апериодических составляющих первичных токов, возникающих при переходных процессах, кроме несимметричной петли переменного тока, в окне трансформатора тока помещалась петля постоянного тока с числом ампервитков до 20 000. Для этой петли выбирались наиболее неблагоприятные положения, при которых ее взаимдукция со вторичной обмоткой в несколько раз превосходила наблюдаемую на практике взаимдукцию первичной и вторичной цепей трансформатора тока. При этом эффективные э. д. с., индуцируемые в обмотках кабельных и шинных трансформаторов, оказались независимыми от наличия петли постоянного тока. На основании этих опытов можно считать, что при неустановившихся режимах во вторичной цепи трансформаторов тока нулевой последовательности не могут возникнуть недопустимые токи небаланса при одновременном недостатке тока в шинном трансформаторе для действия блокировки.

Что касается дополнительных токов небаланса, возникающих в трансформаторе тока нулевой последовательности от потоков подмагничивания, то их величина зависит от степени идентичности магнитопроводов, достигнутой при сборке, а также от регулировки числа витков обмотки подмагничивания. На основании опыта серийного изготовления трансформаторов тока следует считать легко достижимыми величинами первичного тока небаланса от подмагничивания $0,2 \dots 0,3 a$.

Выводы. Токи небаланса во вторичной цепи трансформатора тока нулевой последовательности при двухфазном коротком замыкании не могут существенно превзойти токи небаланса при трехфазном коротком замыкании той же кратности. Относительный и первичный токи небаланса при данных параметрах трансформатора тока без подмагничивания мало зависят от сопротивления вторичной цепи. Существенное ограничение этих токов достигается увеличением магнитной проницаемости магнитопровода, в частности посредством его подмагничивания и уменьшения взаиминдукции между вторичной и первичной цепями при отсутствии токов нулевой последовательности.

Сокращение размеров трансформатора тока нулевой последовательности при одновременном уменьшении потребления реле для сохранения заданной чувствительности приводит к увеличению относительного тока небаланса.

При установке отдельных трансформаторов тока на нескольких равномерно загруженных параллельных кабелях с параллельным или последовательным соединением вторичных обмоток всех этих трансформаторов можно принимать ток небаланса таким же, как при одном трансформаторе на одиночном кабеле. В случае неравномерного распределения тока нагрузки по кабелям и

при неодинаковых параметрах трансформаторов возможно появление дополнительного тока небаланса.

Выполняя трансформаторы тока с прямоугольными магнитопроводами, охватывающими все кабели или шины защищаемого присоединения, со вторичной сосредоточенной секционированной обмоткой, можно достигнуть достаточно малого тока небаланса, позволяющего осуществить чувствительную защиту от замыканий на землю.

В испытаниях для настоящей работы приняла участие А. В. Островская.

Литература

1. Г. Т. Грек. Токовые защиты от замыканий на землю генераторов с фазными трансформаторами тока. Эл. станции, № 9, 1950.

2. И. М. Сирота. Чувствительная защита генераторов от замыкания на землю. Сборник научно-технических

статей Института электротехники Академии наук УССР, вып. 3, 1949.

3. И. М. Сирота. Проверка новой защиты генератора от замыканий на землю. Эл. станции, № 6, 1949.

4. И. М. Сирота. Защита генераторов от замыканий на землю с шинными трансформаторами тока нулевой последовательности. Эл. станции, № 12, 1950.

5. И. И. Соловьев и И. Н. Попов. Токовая защита статора генератора от замыканий на землю. Эл. станции, № 6, 1949.

6. Г. И. Атабеков и А. М. Федосеев. Современная релейная защита. Госэнергоиздат, 1948.

7. И. М. Сирота. Методы ограничения напряжений небаланса ТНП. Сборник Института электротехники Академии наук УССР, вып. 10, 1952.

8. И. М. Сирота. Основные параметры защиты от замыканий на землю в сетях 3...10 кВ. Сборник Института электротехники Академии наук УССР, вып. 9, 1952.

9. Е. Г. Марквардт. О токе небаланса трансформаторов тока типа Ферранти. Эл. станции, № 4—5, 1933.

[8. 8. 1951]



Измерение угла диэлектрических потерь при одновременном наложении постоянного и переменного напряжения

Инж. С. К. МЕДВЕДЕВ

г. Серпухов

Во многих электрических конструкциях изоляция находится при одновременном воздействии постоянного и переменного напряжения. В некоторых случаях бывает важно оценить хотя бы приблизительно при указанных условиях величину диэлектрических потерь, так как они влияют на выбор конструкции, обуславливают срок ее службы, надежность в эксплуатации и т. д.

В частности, электрические конденсаторы в ряде промышленных установок находятся в таких условиях. Необходимо знать, какие напряженности электрического поля следует допускать в диэлектрике конденсаторов и какова может быть температура внутри конденсатора при длительной работе в зависимости от величин постоянной и переменной составляющих.

Помимо того, данные измерения угла диэлектрических потерь при одновременном наложении постоянного и переменного напряжения могут представлять теоретический интерес, представляя возможность изучить некоторые новые явления.

В данной статье предлагается способ измерения $\operatorname{tg} \delta$ при одновременном воздействии постоянного и переменного напряжения, заключающийся в следующем. Берутся два конденсатора, изготовленных в одинаковых условиях из одних и тех же материалов и имеющих приблизительно равные емкости и $\operatorname{tg} \delta$. Для проведения измере-

Рассматривается способ измерения тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов, находящихся под напряжением переменного тока при одновременном наложении напряжения постоянного тока. Способ — позволяет использовать существующую аппаратуру для измерения тангенса угла потерь. Приводятся результаты измерения конденсаторов, пропитанных различными жидкими диэлектриками. Дается объяснение причин, вызывающих изменение тангенса угла потерь при одновременном приложении постоянного и переменного напряжения.

ний конденсаторы соединяются последовательно и включаются в плечо моста, предназначенного для измерения $\operatorname{tg} \delta$. На рис. 1 показана схема для измерения $\operatorname{tg} \delta$ при одновременном приложении постоянного и переменного напряжения.

Приняты обозначения:

C_1 и C_2 — емкости конденсаторов, подлежащих измерению; C_3 — емкость эталонного конденсатора; P — рубильник для зарядки конденсаторов от источника постоянного напряжения; U_n — батарея или выпрямитель; G — указатель равновесия моста.

Рекомендуется на время зарядки конденсаторов C_1 и C_2 постоянным напряжением отключать

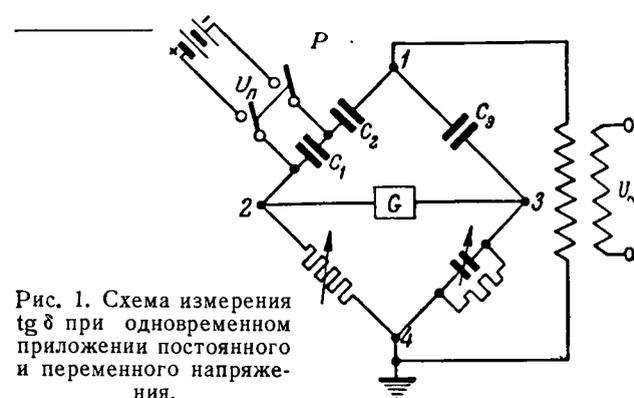


Рис. 1. Схема измерения $\operatorname{tg} \delta$ при одновременном приложении постоянного и переменного напряжения.

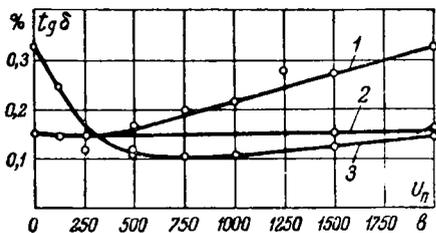


Рис. 2. Зависимость $tg \delta$ от величины напряжения постоянного тока U_n при напряжении переменного тока 250 в, 50 гц при 20° С.

1 — бумага объемным весом 1,0 г/см³, пропитка минеральным маслом; 2 — то же 1,2 г/см³, пропитка соволом; 3 — то же 1,2 г/см³, пропитка кремнийорганической жидкостью.

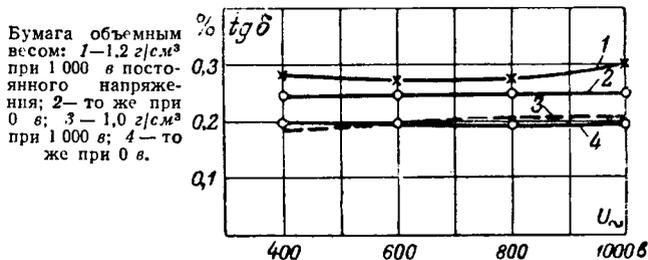


Рис. 4. Зависимость $tg \delta$ (%) от величины напряжения переменного тока 50 гц при 70° С для конденсаторов, пропитанных минеральным маслом.

от сети переменного тока трансформатор, питающий мост. При включении рубильника *P* конденсаторы *C*₁ и *C*₂ оказываются подключенными параллельно к источнику постоянного напряжения, ибо точки 1 и 2 схемы моста связаны друг с другом через высоковольтную обмотку трансформатора и сопротивление в плече 2—4 моста. Если бы мост был отключен от высоковольтной обмотки трансформатора, то для зарядки конденсаторов пришлось бы выключать их из схемы моста, а после зарядки снова подключать. По окончании зарядки конденсаторов *C*₁ и *C*₂ рубильник *P* выключается, и на мост подается переменное напряжение, при котором должно производиться измерение $tg \delta$ и емкости.

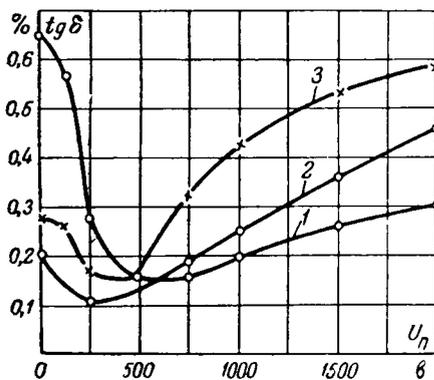
Если измерения производятся длительно, конденсаторы *C*₁ и *C*₂ подзаряжаются, когда это необходимо.

Благодаря тому, что напряжения постоянного тока на конденсаторах *C*₁ и *C*₂ равны и направлены друг против друга, они не оказывают влияния на измерительную часть моста; в то же время каждый из конденсаторов *C*₁ и *C*₂ находится при одновременном воздействии постоянного и переменного напряжения.

Автором, при участии Г. Т. Либиной, был проведен ряд измерений над различными конденсаторами. Результаты этих измерений приведены на рис. 2...5.

На рис. 2 и 3 показана зависимость $tg \delta$ от величины постоянного напряжения при подаче на зажимы 1—4 мостика переменного напряжения эффективной величиной 500 в, которое в процессе измерений не менялось.

Очевидно, что в этом случае на каждый измеряемый конденсатор приходилось по 250 в переменного тока, так как емкости *C*₁ и *C*₂ были взяты равными.



Бумага с объемным весом 1,2 г/см³ для всех случаев. Пропитка: 1 — соволом; 2 — минеральным маслом; 3 — кремнийорганической жидкостью.

Рис. 3. Зависимость $tg \delta$ (%) от величины напряжения постоянного тока U_n при напряжении переменного тока 250 в, 50 гц при 70° С.

Для измерений были взяты образцы конденсаторов из двух видов конденсаторной бумаги:

а) с объемным весом 1,0 г/см³ толщиной 10 мкм при числе слоев между обкладками 6;

б) с объемным весом около 1,2 г/см³ толщиной 8 мкм при числе слоев между обкладками 6.

Для пропитки конденсаторов применялись: а) минеральное очищенное трансформаторное масло; б) совол; в) кремнийорганическая жидкость.

Напряженность поля в диэлектрике от составляющей переменного тока 50 гц была 5,2 кВ/мм для бумаги с объемным весом 1,2 г/см³ и 4,2 кВ/мм для бумаги с объемным весом 1,0 г/см³. Напряженность поля от составляющей постоянного напряжения изменялась в пределах от 0 до 40 кВ/мм для бумаги с объемным весом 1,2 г/см³.

Как видно из результатов испытания, при температуре 20° С (рис. 2) наложение постоянной составляющей у соволовых конденсаторов не вызывает изменения $tg \delta$.

У конденсаторов, пропитанных минеральным маслом, $tg \delta$ возрастает с увеличением постоянного напряжения, а у конденсаторов, пропитанных кремнийорганической жидкостью, вначале происходит заметное снижение $tg \delta$ при увеличении постоянного напряжения, но затем $tg \delta$ снова увеличивается.

При температуре 70° С (рис. 3) у всех конденсаторов наблюдается резко выраженный минимум $tg \delta$ в пределах отношения напряжений постоянного к переменному от 1 до 3, т. е. в пределах, когда постоянное напряжение по величине близко подходит к амплитуде переменного напряжения.

Результаты измерений, произведенные при неизменной величине постоянного напряжения $U_n =$

Пропитка соволом. Бумага с объемным весом 1,2 г/см³. 1 — при 1000 в постоянного напряжения; 2 — то же при 0 в.

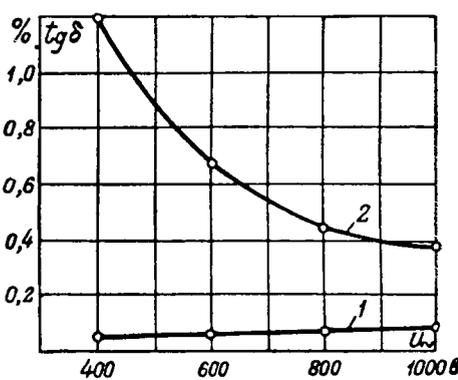


Рис. 5. Зависимость $tg \delta$ от величины напряжения переменного тока 50 гц при 70° С

$= 1000$ в, в зависимости от величины переменного напряжения при температуре 70°C показаны на рис. 4 и 5. Для конденсатора, пропитанного маслом (рис. 4), наблюдается непрерывный рост $\text{tg } \delta$ с увеличением переменного напряжения, в то время как для пропитанного соволом (рис. 5) наблюдается вначале резкое снижение, которое замедляется с возрастанием переменного напряжения. К сожалению, по условиям опыта нельзя было далее повышать напряжение переменного тока на конденсаторах во избежание перекрытия изоляторов.

Проведенные измерения дают возможность сделать некоторые предварительные выводы, а именно: в конденсаторах с жидкой маловязкой пропиткой возможно снижение $\text{tg } \delta$ при наложении постоянного напряжения, близкого по величине к амплитуде переменного, в том случае, если в конденсаторе преобладают потери в жидкости над потерями в бумаге, т. е. в случае, если пропиточные жидкости содержат ионные примеси (загрязнения).

В случае применения высокоочищенных маловязких пропиточных материалов наложение постоянной составляющей приводит к возрастанию $\text{tg } \delta$, а в случае применения очень вязких пропиток не приводит к какому-либо изменению $\text{tg } \delta$.

Изменение $\text{tg } \delta$ при наложении постоянного напряжения можно объяснить следующим образом.

$\text{tg } \delta$ бумажных пропитанных конденсаторов приближенно складывается из двух компонент: первой, зависящей от пропиточного материала ($\text{tg } \delta_n$), и второй, зависящей от бумаги ($\text{tg } \delta_k$):

$$\text{tg } \delta = k_1 \text{tg } \delta_k + k_2 \text{tg } \delta_n;$$

здесь k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие [Л. 2] от величины диэлектрической проницаемости клетчатки и пропиточного материала, а также от плотности бумаги и клетчатки.

Потери мощности в пропиточном материале обусловлены колебаниями свободных ионов и сквозным током.

При наложении постоянного напряжения колебания свободных ионов, заключенных в ограниченных порах внутри бумаги, будут уменьшаться и при достаточном увеличении напряжения постоянного тока прекратятся совсем, когда окажутся притянутыми электрическим полем к стенкам пор. Таким образом, составляющая потерь в жидкости, вызванная колебанием свободных ионов под действием переменного поля, может быть уменьшена или уничтожена совсем. Останется составляющая потерь от сквозного тока, которая, несомненно, будет возрастать с ростом напряженности поля постоянного тока.

Потери компоненты, зависящей от бумаги, называются колебаниями связанных ионов, проявляющимися в периодическом смещении молекул клетчатки.

При наложении постоянного поля получается одностороннее упругое смещение связанных ионов. В этом их положении приходится затрачивать больше энергии на колебания ионов, чем в том случае, когда они находятся в нейтральном положении. Таким образом, составляющая потерь в бумаге возрастет с увеличением поля от постоянного напряжения. Результирующий $\text{tg } \delta$ будет зависеть от преобладания той или другой составляющей потерь в диэлектрике, и кривая в зависимости от величины постоянного напряжения может иметь минимум.

В данной статье дается лишь краткое описание примененного способа измерений и первых его результатов.

Литература

1. Г. И. Сканава. Физика диэлектриков, ГТТИ, 1949.
2. В. Т. Ренне. Расчет диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги. Электричество, № 1, 1949.

[16. 2. 1952]



Электрические бытовые приборы

Кандидат техн. наук, доц. Д. С. ЧУКАЕВ

Москва

Непрерывное повышение материального благосостояния трудящихся в Советском Союзе способствует расширению электрификации быта. В результате выполнения первого послевоенного пятилетнего плана восстановления и развития народного хозяйства СССР значительно превзойден довоенный объем производства электрифицированных машин и приборов для нужд населения и расширен их ассортимент. Предприятия Министерства электропромышленности СССР и других министерств освоили производство новых конст-

Приведены некоторые сведения об электрических стиральных машинах и аппаратах, пылесосах, полотерных машинах, холодильниках, плитах, утюгах и об установочных электроизделиях. Указаны недостатки отдельных конструкций. Выдвинуты первоочередные требования в области разработки и выпуска электрических бытовых приборов в свете общих задач дальнейшего развития электрификации быта.

рукций электрических холодильников, стиральных машин, пылесосов, полотерных машин, электрических плиток и другого оборудования для электрификации быта.

Население предъявляет большой спрос на это оборудование. Электрификация быта освобождает домашнюю хозяйку от тяжелой и трудоемкой работы. Облегчение и повышение производительности труда домашней хозяйки, а также экономия стирочных материалов и горячей воды наиболее ярко могут быть продемонстрированы на примере электрической сти-

ральной машины. Переход от ручной стирки к стирке в машине дает: 1) уменьшение затрачиваемого домашней хозяйкой времени на 70...80% (при применении автоматизированной машины на 95%); 2) снижение расхода горячей воды на 40...50%; 3) уменьшение расхода мыла на 50...60% и соды на 60...70%.

Электрические стиральные машины и аппараты заменяют воздействие рук домашней хозяйки на белье: а) в машине — механическим воздействием вращающейся мешалки или барабана с ребрами; б) в тепловых стиральных аппаратах — процессом отмывания частиц грязи циркулирующим стиральным раствором. Раствор имеет температуру, близкую к температуре кипения, и, непрерывно циркулируя, проходит через толщу заложеного в аппарат белья и пустотелую циркуляционную трубку. Наиболее широкое применение в быту нашли электрические стиральные машины.

1. Технология стирки с кипячением белья применяется при стирке сильно загрязненного хлопчатобумажного и льняного белья. Такая технология требует, чтобы стиральная машина была оборудована устройством для местного подогрева и кипячения белья в стиральном растворе. Введение в технологический процесс стирки операции кипячения белья повышает качество стирки и способствует его дезинфекции. Однако выделяющиеся из машины испарения при кипячении белья ухудшают санитарно-гигиенические условия помещения, в котором установлена машина. Необходимость устройства местного подогрева (мощностью 3...4 кВт) усложняет конструкцию машины и удорожает ее эксплуатацию в домашних условиях. Поэтому в городах с газифицированными домами подогрев стирального раствора может осуществляться на газе, а в небольших населенных пунктах, удаленных от мощных источников электроснабжения, наиболее целесообразным является подогрев воды и стирального раствора на твердом топливе.

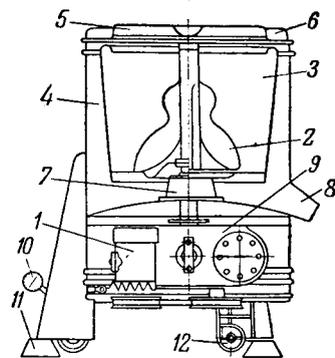
2. Технология стирки без кипячения белья предусматривает применение горячего раствора при температуре от 40 до 80°С в зависимости от рода ткани. Стирка незначительно и среднезагрязненного белья в горячем растворе без кипячения способствует значительному упрощению конструкции машины, создает условия для сравнительно легкой автоматизации процесса стирки, обеспечивает минимальный расход тепловой энергии и устраняет выделение в помещении испарений стирального раствора.

Рассмотрим конструкции электрических стиральных машин.

1. Машины с вращающейся мешалкой, как правило, предназначаются для стирки белья без кипячения (рис. 1). Машины подобного типа изготавливаются с баком емкостью 60—100 л, что соответствует вместимости 3...5 кг сухого белья. Мешалка, имеющая 3...4 лопасти, периодически изменяет направление вращения в целях исключения возможности закатывания и повреждения белья, а также более активного его перемешивания. В течение минуты мешалка

Рис. 1. Бытовая стиральная машина с мешалкой типа ЭАЯ-2 в разрезе.

1 — электродвигатель; 2 — мешалка; 3 — внутренний бак, центрифуга; 4 — наружный бак, кожух; 5 — крышка; 6 — оформительное кольцо; 7 — эластичная манжета; 8 — спускной патрубок; 9 — редуктор; 10 — рычаг подъема; 11 — причес; 12 — ролик.



совершает 50...60 повторных вращений при реверсировании через каждый поворот на угол 90...180°. Машины оборудуются однофазным асинхронным двигателем мощностью 150...200 вт. Отжим белья может осуществляться отжимными вальками, приводимыми в действие от общего электродвигателя, центрифугой конструктивно привязываемой к корпусу машины или отжимом непосредственно в стиральном баке, который при этой операции приводится во вращение со скоростью 500...700 об/мин.

Бытовая электрическая стиральная машина отечественной конструкции завода Министерства электропромышленности типа ЭАЯ-2 выполнена с мешалкой и рассчитана на одновременную вместимость 3 кг сухого белья.

Отжим белья осуществляется вращением стирального бака со скоростью 700 об/мин. При вращении стиральный бак работает как центрифуга, обеспечивая остаточную влажность в белье не выше 65%. Машина оборудована однофазным двигателем мощностью 180 вт. Расход электроэнергии (на привод) составляет около 150 втч, а тепла в виде горячей воды 2 250 ккал на стирку и отжим 1 кг сухого белья. При определении расхода тепла потери в водонагревающем устройстве не учитывались.

Несколько повышенный расход электроэнергии и тепла вызван некоторыми конструктивными недостатками машины (несферичностью формы дна стирального бака, недостаточно эффективным профилем лопастей мешалки и др.), устранение которых должно быть осуществлено в самое ближайшее время.

В стиральных машинах рассматриваемой конструкции оказалось весьма сложным устранить вибрацию ее корпуса при операции отжима белья. Вращение бака при скорости 700 об/мин даже при небольшом нарушении равномерности укладки белья в баке вызывает вибрацию машины.

2. Машины с вращающимся горизонтальным барабаном состоят из кожуха и расположенного в нем рабочего барабана, в который закладывается белье. Рабочий барабан имеет три выступающих внутрь него ребра, необходимых для перемешивания белья при стирке. В целях избежания закатывания белья и для улучшения его отстирывания через каждые 4—8 оборотов изменяется направление вращения рабочего барабана. В течение минуты барабан машины делает 30...50 оборотов. Полезный объем ба-

рабана определяет вместимость машины в 3...5 кг сухого белья.

Неавтоматизированные машины рассматриваемого типа, как правило, оборудуются местным подогревом воды и стирального раствора, а стирка белья проводится с его кипячением.

Электрическая стиральная машина, разработанная Академией коммунального хозяйства, с вращающимся горизонтальным барабаном рассчитана на одновременную вместимость 4 кг сухого белья. Машина имеет электродвигатель мощностью 200 вт.

Расход электроэнергии (на привод) составляет около 100 втч, а тепла в виде горячей воды 1750 ккал на стирку 1 кг сухого белья. При определении расхода тепла потери в водонагревающем устройстве не учитывались. Машина оборудована газовым подогревом.

3. Машины с качающ е-вращающ и м ся сферическим барабаном имеют специальное устройство, сообщающее барабану кроме вращательного также колебательное движение. Получение вращательного и колебательного движения достигается за счет установки сферического барабана, его полюсами на особом кольце, имеющем также полюсы.

Машины этого типа оборудуются устройством для местного подогрева воды и стирального раствора. Для повышения теплоиспользования в верхней части стиральной машины предусматривается установка специального бака, заливаемого водой. Во время операции кипячения белья пар из рабочего пространства машины поступает в верхний бак, нагревая в нем воду, которая используется для первого полоскания.

Стиральная машина рассматриваемого типа была освоена заводом «Газоаппарат». Машина рассчитана на одновременную вместимость 4 кг сухого белья. Она оборудована съемным электроприводом мощностью 180 вт. Подогрев воды и раствора производится газом. Устройство для отжима белья не предусмотрено. Расход электроэнергии (на привод) составляет около 50 втч, а тепла в виде горячей воды 1750 ккал на стирку 1 кг сухого белья. Рассматриваемая стиральная машина как в отношении потребной мощности, так и удельного расхода электроэнергии имеет лучшие в сравнении с другими машинами показатели. К недостаткам машины следует отнести громоздкость конструкции.

4. Автоматизированные стиральные машины сводят обслуживание машины этого типа к загрузке в нее белья, введению стирального раствора и выемке белья после окончания его отжима. Эти машины не имеют местного подогрева воды или стирального раствора. Стирка белья в них производится в горячей воде, получаемой от централизованного источника горячего водоснабжения. Отжим белья осуществляется переводом стирального барабана на повышенное число оборотов 500...600 в минуту.

Автоматизированная стиральная машина средней емкостью 4 кг сухого белья требует установки электродвигателя мощностью 180 вт. Температу-

ра поступающей в машину воды регулируется автоматически при помощи термостатического смешивающего клапана. Количество подаваемой воды регулируется также автоматически с помощью поплавкового регулятора уровня воды. Расход электроэнергии (на привод) составляет 80 втч, а тепла в виде горячей воды 1100 ккал на стирку 1 кг сухого белья. Снижение расхода тепла (горячей воды) по сравнению с неавтоматизированными машинами объясняется точным соблюдением заданной технологии стирки. Большим преимуществом автоматизированных стиральных машин является значительное снижение затраты времени домашней хозяйки на стирку белья. Затрата времени домашней хозяйкой, отнесенная к 1 кг сухого белья, составляет при ручной стирке около 50 мин; при стирке в неавтоматизированных машинах — около 15 мин и при применении автоматизированных машин — около 1,5...2 мин.

5. Тепловые стиральные аппараты (бучильники) состоят из вертикального бака с крышкой, циркуляционной трубки и электронагревательного устройства, монтируемого к дну бака. Белье укладывается в бак рядами вокруг циркуляционной трубки. Стиральный раствор заливается в бак порциями по мере укладки белья. Спустя некоторое время после включения нагревательного устройства аппарата, стиральный раствор на дне бака достигает температуры, близкой к точке кипения, и устремляется по полой цилиндрической трубке вверх, где и разбрызгивается на белье. Стиральный раствор, постепенно спускаясь сквозь толщу заложеного в аппарат белья, возвращается на дно бака. Таким образом, устанавливается непрерывная циркуляция. Стирка в бучильнике обычно проводится без наблюдения домашней хозяйки в течение 6...8 час. Мощность электронагревательного устройства при емкости аппарата 8...10 кг сухого белья около 600 вт. Преимущество стиральных аппаратов заключается в простом их устройстве и невысокой стоимости, а также в возможности проводить вторую стирку цветного белья в стиральном растворе, остающемся от первой стирки.

Расход электроэнергии (на нагрев стирального раствора) составляет около 420 втч, а тепла (горячая вода на полоскание) — около 400 ккал на стирку 1 кг сухого белья.

Электрические пылесосы. Полноценная очистка помещений от пыли возможна только лишь при применении пылесосов. Они могут быть использованы по прямому назначению как аппараты, создающие разрежение воздуха — удаление пыли с очищаемых поверхностей, или как аппараты, создающие напор воздуха — опрыскивание растений, покраска помещений и др. Принцип действия пылесоса заключается в следующем: приводимый от электродвигателя вентилятор создает разрежение и, таким образом, всасывает через пустотелую щетку и металлическую трубку, связывающую корпус пылесоса со щеткой, воздух, а вместе с ним пыль и мелкий мусор при передвижении щетки по очищаемой поверхности. В корпусе пылесоса воздух проходит через фильтр, на котором оседает пыль, а очищенный

воздух поступает из выходного патрубка пылесоса в помещение. Основными элементами конструкции пылесоса являются: а) электрический двигатель — обычно коллекторный универсального типа, с обмоткой последовательного возбуждения, мощностью 60...250 *вт* при 6 000...16 000 *об/мин*; б) вентилятор — обычно двух- или трехступенчатого типа (для снижения шума, создаваемого работающим пылесосом, двигатель и вентилятор монтируются в его корпусе с помощью резиновых амортизаторов; алюминиевые крылатки вентилятора монтируются непосредственно на удлиненном конце вала электродвигателя); в) фильтр — обычно матерчатый. Недоброкачественное изготовление фильтра из несоответствующего назначению материала ведет к тому, что наиболее вредная для организма человека пыль мельчайших размеров не задерживается фильтром и с выходящим из пылесоса воздухом вновь поступает в помещение. Общим недостатком матерчатых фильтров является сравнительно небольшая емкость пористых слоев ткани. Наибольший эффект очистки дают ткани толстые, рыхлые и ворсистые, имеющие много мелких пор. Шерстяные ткани хорошо задерживают пыль, однако их очистка затруднительна. Гладкие ткани можно очищать одним лишь встряхиванием, но для образования на них постоянного слоя пыли, служащего устойчивой фильтрующей средой, необходимо некоторое время.

1. Малогабаритные ручные пылесосы. При пользовании пылесосом этого типа домашняя хозяйка держит его в руках, в связи с чем вес таких пылесосов не должен быть более 2,5...3,5 *кг*. По своим эксплуатационным характеристикам малогабаритные ручные пылесосы не могут заменить универсальные пылесосы, однако при применении в небольшом и среднем домашнем хозяйстве они вполне себя оправдывают. Широкому распространению пылесосов этого типа содействует простота обращения с ними.

В конструктивном отношении малогабаритные ручные пылесосы подразделяются на две группы: а) пылесосы с размещением фильтра внутри кожуха между засасывающим воздухом насадком и электродвигателем — вентилятором и б) пылесосы с прямым соединением засасывающего насадка с вентилятором и незащищенным фильтром.

Положительными особенностями первой конструкции (рис. 2) являются: защита фильтра от возможности механических повреждений и хорошее охлаждение электродвигателя очищенным от пыли воздухом. Недостатки конструкции заключаются в небольшой поверхности фильтра и повышенных сопротивлениях на пути прохождения воздуха. Преимущества пылесосов второй конструкции заключаются в устранении промежуточных сопротивлений потоку воздуха на пути между засасывающим насадком и вентилятором, значительном увеличении поверхности фильтра и снижении веса пылесоса. Недостатки конструкции заключаются в возможности попадания в вентилятор металлических предметов (поскольку в него поступает нефильтранный воз-

дух), в ухудшении условий охлаждения электродвигателя и в возможности механических повреждений фильтра.

Малогабаритный ручной пылесос производства завода «Электроприбор» имеет защищенный фильтр, размещенный в металлическом кожухе пылесоса. Этот пылесос является наиболее распространенным типом малогабаритного ручного пылесоса. Его технические данные: мощность на зажимах двигателя 200 *вт*; поверхность фильтра 450 *см²*; вес пылесоса с трубкой и щеткой 3,5 *кг*; скорость воздушного потока при полном открытии всасывающей трубки 25 *м/сек*; разрежение, создаваемое на всасывающей трубке при полном ее закрытии 550 *мм вод. ст.* Расход воздуха при полном открытии всасывающей трубки 880 *л/мин*.

2. Универсальные бытовые пылесосы обладают высокой эффективностью чистки. Домашняя хозяйка при работе держит в руках металлическую пустотелую удлинительную трубку с насаженной на ее конце щеткой. Металлическая трубка при помощи гибкого шланга соединяется с кожухом пылесоса. Корпус пылесоса монтируется на роликах или салазках для лучшего перемещения на полу. Существующие конструкции универсальных пылесосов могут быть подразделены на следующие два типа: а) пылесосы, размещенные горизонтально, и б) пылесосы, размещаемые вертикально.

Пылесосы первого типа имеют следующие достоинства: небольшие габариты и вес, большую подвижность и хорошее уплотнение в месте соединения кожуха с крышкой. Использование для горизонтальных пылесосов высокоскоростных электродвигателей (12 000...16 000 *об/мин*) и многоступенчатого типа вентиляторов усложняет их производство и требует тщательной балансировки вращающихся частей.

Значительный размер диаметра кожуха вертикального пылесоса позволяет обойтись одноступенчатым или двухступенчатым вентилятором при менее быстроходном двигателе 6 000...8 000 *об/мин*. Положительными особенностями конструкции являются большая поверхность фильтра и отделение крупных частиц загрязнителя на дне кожуха пылесоса. К недостаткам конструкции следует отнести недостаточную подвижность, значительные габариты и вес пылесоса.

Ниже приводятся основные технические характеристики современного, горизонтально размещенного пылесоса: мощность на зажимах двига-

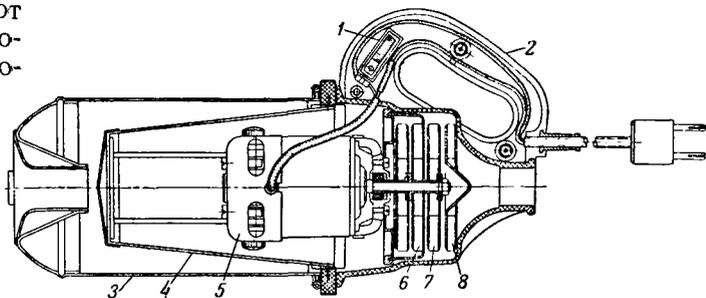


Рис. 2. Малогабаритный ручной пылесос в разрезе.

1 — выключатель; 2 — ручка пылесоса; 3 — металлический кожух; 4 — матерчатый фильтр; 5 — электрический двигатель; 6, 7, 8 — диски вентилятора.

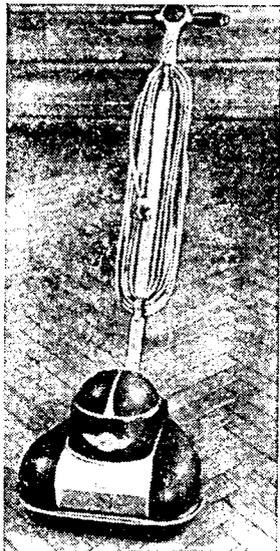


Рис. 3. Электрическая полотерная машина с тремя дискообразными щетками.

теля 450 вт; поверхность фильтра 1275 см²; вес пылесоса с шлангом, трубкой и щеткой 8,2 кг; расход воздуха при полном открытии всасывающей трубки 1550 л/мин; скорость воздуха при полном открытии всасывающей трубки 45 м/сек; разрежение, создаваемое на всасывающей трубке при полном ее закрытии, 990 мм вод. ст.

Первые модели бытовых электропылесосов имели своим назначением удаление пыли только с ковров и пола. Основные конструктивные особенности пылесосов коврового типа сохранились до настоящего времени. Электрический двигатель-вентилятор и засасывающий насадок пылесоса монтируются на роликах и передвигаются по ковру при помощи длинной ручки. Фильтр незащищенного типа имеет большую фильтрующую поверхность и своим верхним концом прикрепляется к ручке пылесоса. В некоторых конструкциях ковровых пылесосов перед засасывающим насадком помещается специальный резиновый валик, вращающийся от общего электродвигателя. При вращении валик, механически воздействуя на ворс ковра, способствует удалению глубоко проникшей в ковер пыли. Мощность на зажимах двигателя равна 250—350 вт.

Электрические полотерные машины. Полотерные машины изготавливаются с цилиндрическими или дискообразными щетками. Полотерные машины снабжаются комплектом щеток, позволяющим производить натирку и полировку полов. Машины с цилиндрическими щетками обычно имеют от 500 до 1000 об/мин, а с дискообразными щетками (рис. 3) 150...200 об/мин. Вес бытовых полотерных машин колеблется от 8 до 12 кг. Длина присоединительного шнура обычно от 6 до 8 м. Производительность при первой натирке пола полотерной машиной составляет 25...50 м² за час. Мощность электродвигателя для бытовых полотерных машин колеблется от 200 до 300 вт.

Электрические холодильники. Длительное сохранение продуктов питания в свежем состоянии может быть обеспечено при применении в быту электрических холодильников. Для обеспечения длительной сохранности продуктов их необходимо хранить при следующих температурах: мясо и рыбу мороженые при —4 ... —2°С; рыбу парную при —2 ... 0°С; масло сливочное при 2 ... 4°С; молоко, консервы, овощи при 4 ... 6°С; напитки при 8 ... 10°С.

Электрические холодильники, используемые в быту, могут быть подразделены на следующие три группы: 1) электрокомпрессионные холодиль-

ники; 2) поглотительные холодильники непрерывного действия; 3) поглотительные холодильник прерывного действия.

В электрокомпрессионном холодильнике при помощи механической силы происходит сжатие паров некоторых веществ, называемых холодильными агентами, обращение их в жидкость и затем испарение, т. е. переход холодильного агента снова в газообразное состояние.

Для компрессионных холодильников используются такие холодильные агенты, которые легко переходят в газообразное состояние и превращаются обратно из газа в жидкость под действием механического сжатия. Температура испарения холодильного агента зависит от давления образующихся паров и лежит значительно ниже нуля, чем и объясняется их охлаждающее действие. В современных бытовых холодильниках наиболее широкое применение нашел холодильный агент фреон-12.

Основными элементами компрессионного холодильника являются: электродвигатель-компрессор (для сжатия газообразного холодильного агента); конденсатор (для превращения холодильного агента из газообразного состояния в жидкое); испаритель (для превращения холодильного агента из жидкого состояния в газообразное); автоматическая аппаратура регулирования температуры.

В наиболее современных конструкциях холодильников электродвигатель и компрессор монтируются на общем валу и размещаются в металлическом герметическом кожухе. Холодопроизводительность холодильного агрегата в зависимости от емкости холодильника обычно составляет 80 ... 200 ккал/час. Для бытовых холодильников полезной емкостью около 150 л мощность на зажимах двигателя определяется 150 вт.

Бытовой компрессионный холодильник ДХ-2 «ЗИС—Москва» имеет полезную емкость 165 л при холодопроизводительности около 120 ккал/час. Наиболее низкая температура внутри холодильника —15°С. Холодильный агент (фреон-12). Мощность на зажимах электродвигателя компрессора 165 вт. Среднечасовой расход электроэнергии 50 втч. Холодильник оборудован однофазным двигателем с пусковой обмоткой. Включение пусковой обмотки в момент запуска двигателя производится с помощью пускового реле. Для защиты двигателя от перегрузок предусмотрено тепловое реле. При установке ручки регулятора температуры в положение «холод», что соответствует непрерывному режиму работы компрессора, температура на средней полке холодильника равна —2°С (при температуре окружающего воздуха около 25°С). При установке ручки регулятора температуры в положение Н (нормальный режим работы холодильника) температура на средней полке равна 1,3°С, а в положении 1—4°С.

Поглотительные холодильники. В холодильниках подобного типа электроэнергия превращается в тепловую с последующим преобразованием ее в холод. Эти холодильники работают за счет поглощения газообразного холодиль-

ного агента каким-либо веществом при низком давлении испарения и последующего выделения его из поглотителя при более высоком давлении. В рассматриваемом типе холодильников компрессор заменен тепловым побудителем, имеющим назначение сжатия паров холодильного агента от давления испарения до давления конденсации. Для поглотительных холодильников поглощающее вещество может быть как твердым, так и жидким. Явление поглощения сопровождается химической реакцией образования нового химического вещества. Во время реакции выделяется тепло. При обратном процессе (выделение газа из поглотителя) химическое соединение распадается и реакция проходит с поглощением тепла.

В поглотительных холодильниках непрерывного действия устанавливается неизменное состояние по температурам, давлениям и тепловым потокам. Основными элементами холодильника являются: подогреватель, конденсатор, испаритель и поглотитель. Непрерывный процесс возможен только при жидком поглотителе. Бытовой холодильник завода «Газоаппарат» типа ЗШ-1 (рис. 4) основан на принципе непрерывного действия. Полезная емкость холодильника 45 л при холодопроизводительности около 15 ккал/час. Наиболее низкая температура в холодильнике — -10°C . Холодильный агрегат заполнен водоаммиачным раствором и водородом под давлением в 18...20 атм. Среднечасовой расход электроэнергии 140 втч. Холодильник оборудован нагревательным элементом, позволяющим иметь три ступени мощности 140, 115 и 105 вт. В жаркое время года холодильник включается на 140 вт. При включении холодильника на полную мощность при температуре окружающего воздуха $+20^{\circ}\text{C}$ гарантируется температура на средней полке не выше $+6^{\circ}\text{C}$.

Основными элементами поглотительных холодильников периодического действия являются подогреватель и испаритель. Подогреватель попеременно служит кипятивником или поглотителем. При включении в подогревательном сосуде нагревательного элемента давление в системе повышается и холодильный агент выделяется из поглотителя в газообразном состоянии, переходя по соединительной трубке в конденсатор, который в это время охлаждается, что приводит к конденсации газов. Через определенный промежуток времени, когда холодильный агент перейдет в испаритель, нагревательный элемент выключается и давление в системе падает.

Начинается обратный процесс: конденсатор превращается в испаритель, а подогреватель в поглотитель. Процесс испарения холодильного агента в испарителе, размещенном внутри холодильной камеры, образует в ней холод. Периодичность включения и выключения холодильника осуществляется автоматически при помощи реле с часовым механизмом. Поглотительные холодильники более просты в изготовлении и стоят дешевле, чем компрессионные. В отношении расхода электроэнергии поглотительные холодильники значительно уступают компрессионным: они потребляют в 3...4 раза больше электроэнергии, чем

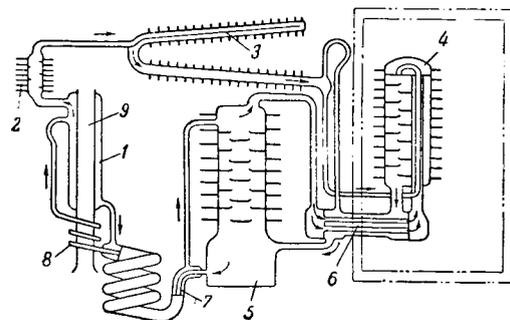


Рис. 4. Схема поглотительного холодильника непрерывного действия

1 — генератор; 2 — ректификатор; 3 — конденсатор; 4 — испаритель; 5 — абсорбер; 6 и 7 — теплообменники; 8 — змеевики; 9 — электрический или газовый нагреватель.

компрессионные при значительно меньшей холодопроизводительности. Электрическая мощность, требуемая для поглотительных холодильников периодического действия, превышает мощность компрессионных в 8...10 раз.

Приведенные технико-экономические показатели для компрессионных и поглотительных холодильников подтверждают необходимость развития компрессионных холодильников.

Электрические плиты и плитки позволяют полностью готовить пищу на электроэнергии. Электрические плиты отличаются высокой мощностью (4...6 кВт) и значительным расходом энергии. Согласно ГОСТ 303-41 на нагревательные приборы максимальная мощность их ограничивается 1 кВт. Министерство электропромышленности выпустило электроплиту с двумя конфорками и духовкой. Применение в плите блокировки, исключающей одновременно включение конфорок и духовки, ограничивает мощность до 1,2 кВт. Каждая конфорка плиты имеет выключатель на три рабочих и одно холодное положение. Соответствующим включением двух нагревательных элементов можно получить мощность конфорки: 600, 470 и 130 вт.

Плитки выпускаются открытого и закрытого типов и имеют широкое распространение. Полужаляющие плитки распространены еще мало, хотя и отличаются многими достоинствами. При закрытой конструкции нагревательного элемента они имеют небольшую теплоаккумулирующую способность, что сокращает время их разогрева. Передача тепла от плитки к посуде в основном происходит излучением, что позволяет использовать обычно применяющуюся в быту тонкостенную посуду. Коэффициент полезного действия этой плитки выше других типов, достигая 60% и более.

Электрические утюги. Обычные утюги без регулировки температуры имеют ряд существенных недостатков. Мощность утюгов ограничивается 350...400 вт, поскольку при более значительной мощности снижаются надежность в эксплуатации и долговечность утюга.

При отсутствии регулировки температура на подошве утюга достигает $350\text{--}450^{\circ}\text{C}$. Глажение при такой высокой температуре приводит к быстрой потере тканью своей прочности и окраски.

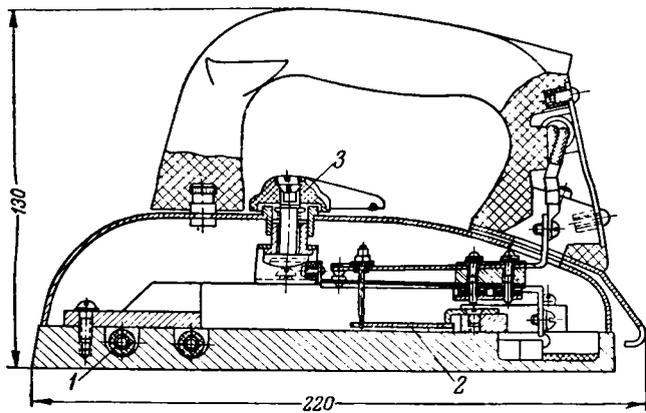


Рис. 5. Внутреннее устройство утюга с регулятором температуры Московского трансформаторного завода.

1 — нагревательная спираль в керамических бусах; 2 — регулятор температуры биметаллического типа; 3 — ручка регулятора температуры.

Недостаточная же мощность утюга вызывает необходимость периодического его подогрева, что снижает производительность труда.

Эти недостатки устранены в утюгах с регулировкой температуры. Предел регулирования температуры определяется оптимальными температурами глажения для различных видов тканей. Минимальная температура на подошве утюга требуется при глажении искусственного шелка $90 \dots 110^\circ \text{C}$ и максимальная при глажении льняной ткани $210 \dots 230^\circ \text{C}$.

Утюги оборудуются (рис. 5) биметаллическими регуляторами температуры, позволяющими при помощи выведенной на верхнюю часть корпуса ручки плавно регулировать температуру в пределах от 90 до 230°C . Мощность утюгов с регулировкой температуры увеличена до $700 \dots 1000 \text{ вт}$, что значительно повысило производительность труда домашней хозяйки. Несмотря на увеличение мощности утюга, удельный расход электроэнергии на 1 кг сухого белья снизился на $10 \dots 15\%$. Современная конструкция утюга кроме регулировки температуры имеет подпаривание белья при глажении. В корпусе такого утюга раз-

мещается бачок для воды емкостью $300\text{—}400 \text{ см}^3$, соединяемый трубкой с отверстиями в его подошве. Через эти отверстия пар из бачка поступает на белье.

Установочные электроизделия. Усовершенствование и обновление установочных электроизделий отстает от потребностей развивающейся электрификации быта. Повышение мощности бытовых приборов и широкое применение пластмассы требуют создания новых, надежных конструкций выключателей, штепсельных соединений, предохранительных устройств и т. п. Однополюсные выключатели с перекидной ручкой и подвижной контактной скобкой не обладают необходимой механической прочностью. Испытания этих выключателей показывают, что в большинстве случаев они не выдерживают более $10\,000 \dots 15\,000$ включений. ГОСТ на выключатели требует не менее $20\,000$ включений. Эти же выключатели, ввиду недостаточной мгновенности выключения, как правило, не выдерживают испытания на разрывную мощность при постоянном токе. Наиболее долговечными и хорошо выдерживающими испытание на разрывную мощность являются выключатели с перекидной ручкой и подвижным контактом в виде рубящего ножа.

Практика эксплуатации штепсельных розеток показывает, что для присоединения нагревательных приборов следует применять розетки с корпусом и основанием из фарфора. На рис. 6 показано разрушение (выгорание) основания штепсельной розетки из пластмассы. Принятая и рекомендуемая в ГОСТ на штепсельные соединения конструкция предохранителя оказалась весьма сложной и дорогой в изготовлении, в связи с чем не нашла применения ни в одной из выпускаемых промышленностью конструкций штепсельных розеток. Штепсельные вилки в большинстве случаев выпускаются без устройства для закрепления проводов, что часто приводит к нарушению контакта в месте присоединения провода к контактными штифтам. После непродолжительной эксплуатации контакт нарушается и пластмассовый корпус вилки в месте закрепления штифтов подгорает.

Требуемая по ГОСТ на штепсельные соединения продольная прорезь у контактных штифтов не оправдала себя в практике. Она не улучшает контакт между штифтом вилки и гильзой розетки, а, наоборот, в силу остаточной деформации в металле штифтов нарушает его (диаметр штифта при сжатии двух половинок уменьшается). Более правильным способом улучшения контакта является установка обжимных колец на гильзах штепсельных розеток.

Контактные колодки

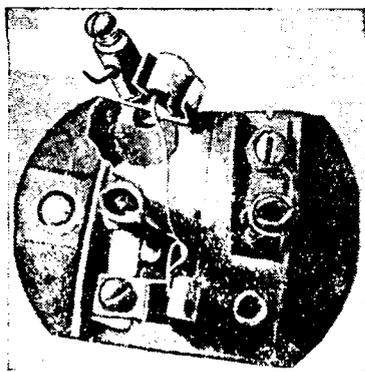


Рис. 6. Основание штепсельной розетки с выгоревшей пластмассой при присоединении нагревательных приборов.



Рис. 7. Контактная колодка с выгоревшей пластмассой при использовании колодки для присоединения нагревательных приборов.

для бытовых приборов изготавливаются с корпусом из пластмассы или из пластмассы с фарфоровым наконечником. Результаты эксплуатации контактных колодок с корпусом из пластмассы для присоединения утюгов, плиток и других нагревательных бытовых приборов оказались неудовлетворительными. Высокая температура на поверхности приборов около контактных штифтов (140...180° С) приводит к обгоранию пластмассы и нарушению контакта (рис. 7).

Необходимо расширить производство контактных колодок с наконечниками из фарфора, укомплектовывая ими присоединительные провода для нагревательных приборов.

Предохранительные автоматы. Большим достижением в улучшении защиты домашней электропроводки от перегрузки и токов коротких замыканий явился массовый выпуск предохранительных автоматов. Электроарматурный завод ММП РСФСР освоил и выпускает автоматы на 6 а — 250 в. Автоматы (рис. 8) создают двойную защиту: от небольших перегрузок при помощи биметаллической пластинки, работающей как тепловое реле, и от коротких замыканий при помощи электромагнитного реле.

На крышке автомата имеется две кнопки, из которых большая кнопка служит для введения в действие автомата, а малая — для выключения автомата от руки.

По устранении причины, поведшей к отключению сети, восстановление подачи электроэнергии достигается нажатием на большую кнопку. В нормальных условиях эксплуатации предохранительный автомат рассчитан на многолетнюю бесшумную работу.

Некоторые задачи дальнейшего развития электрификации быта. Необходимо: ускорить разработку совершенной конструкции автоматизированной стиральной машины, развить производство и улучшить конструкцию стиральной машины с отжимом белья в стиральном баке, разработать ряд конструкций электрических тепловых стиральных аппаратов и организовать их производство; разработать несколько конструкций современных универсальных пылесосов с полным набором вспомогательного оборудования и организовать их производство; организовать массовый выпуск созданных конструкций бытовых полотерных машин и шире внедрять их в быт.

Развитие производства холодильников должно идти в основном за счет компрессионного типа. Следует выпускать холодильники емкостью 80, 100 и 120 л. Целесообразно наладить выпуск электрических поглотительных холодильников

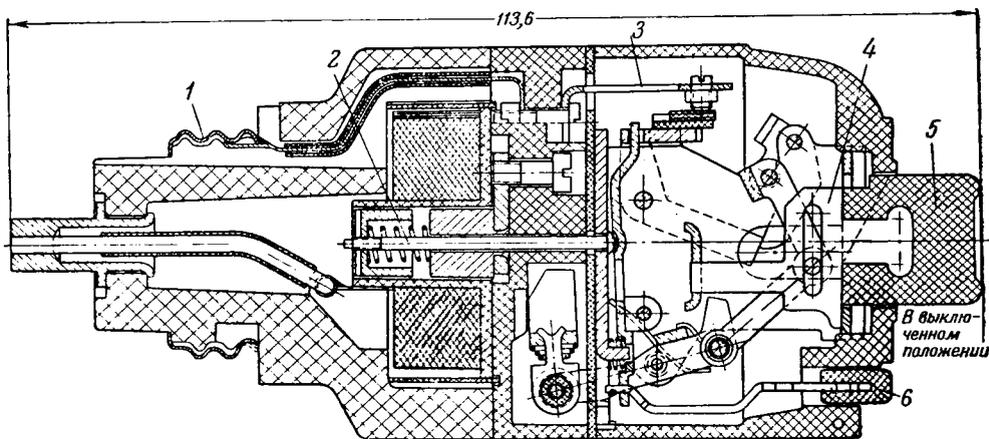


Рис. 8. Предохранительный автомат на 6 а — 250 в производства электроарматурного завода ММП РСФСР.

1 — контактная гильза Е-27; 2 — электромагнитное реле; 3 — биметаллическое реле; 4 — выключающий механизм; 5 — кнопка для включения автомата; 6 — кнопка для выключения автомата от руки.

небольшой емкости 6...12 л. Они будут весьма полезны для одиноких. Необходимо разработать и подготовить выпуск нескольких современных конструкций плит. Следует организовать массовое производство полуизлучающего типа плиток на одну и две конфорки, для этого необходимо развить производство нагревательных элементов трубчатого типа. Мощность плиток должна быть поднята до 1 000...1 200 вт при возможности ее трехступенчатой регулировки. Следует ускорить выпуск выключателей для плиток, позволяющих иметь три рабочих и одно холодное включение.

Установочные электроизделия следует в значительной мере обновить по конструкции и придать им форму, более подходящую к архитектурному оформлению и отделке помещений. Министерству электропромышленности следует расширить выпуск однофазных двигателей небольшой мощности для бытовых машин и приборов.

Научно-исследовательская работа по вопросам электрификации быта, как по охвату научно-исследовательских вопросов, так и по глубине их проработки не может быть признана достаточной. Необходимо усилить научно-исследовательскую работу особенно в части экспериментального исследования новых конструкций машин и аппаратов.

Литературы по вопросам электрификации быта, еще недостаточно. Необходимо выпускать по электрификации быта больше популярных брошюр.

По многим основным бытовым машинам и аппаратам (стиральные машины, холодильники, пылесосы и др.) ГОСТ нет. Имеющиеся ГОСТ на плитки, утюги и установочные изделия устарели и не отражают современных достижений и уровня техники в области производства бытовых машин и приборов.

Во многом дальнейшее развитие электрификации быта зависит и от того, какую помощь этому нужному делу окажет инженерно-техническая общественность.

Электронный датчик малых смещений

Кандидат техн. наук, доц. Л. А. ГОНЧАРСКИЙ

Москва

Электронные датчики малых смещений применяются для измерения и регистрации различных механических величин: длины, смещений, вибраций, ускорения, давления и других механических параметров как в лабораторных условиях, так и для испытаний машин и инженерных сооружений [Л. 3, 5, 6, 7]. Эти датчики являются вакуумными приборами с подвижным электродом, смещающимся в результате воздействия внешних усилий. Для передачи смещений внутрь прибора пользуются либо сильфонами, либо тонкими мембранами или трубками.

Первые приборы этого типа представляли собой разновидность двухэлектродной электронной лампы, в которой относительное смещение подвижного анода под действием внешних усилий позволяло преобразовывать смещения объекта измерений в изменения электрического тока [Л. 1]. Дальнейшее развитие этого принципа привело к разработке целой группы термоэлектронных датчиков, действие которых основано на регулировании анодного тока перемещением подвижного электрода. Наиболее простым по конструкции и механизму действия является диодный датчик с плоскими параллельными электродами. Датчики этого типа обладают высокой чувствительностью по току при относительно небольшой мощности, рассеиваемой на аноде прибора.

Дальнейшее усовершенствование метода управления электрическим полем при помощи подвижного электрода за счет усложнения геометрии поля подвижной или неподвижной сеткой, дает возможность строить датчики, имеющие значительно более высокую чувствительность по напряжению, чем диодные датчики.

Помимо этого способа управления электрическим полем термоэлектронных датчиков, могут быть использованы также некоторые специальные методы, основанные на применении систем электродов, дающих возможность получить более выгодную зависимость относительного изменения напряженности электрического поля у накаливаемого катода как функции смещения управляющего электрода. Одна из таких систем основана на относительном смещении тонкого катода непосредственного канала в однородном поле [Л. 8], а вторая система основана на использовании электродов гребенчатой формы [Л. 9].

Диодный датчик малых смещений [Л. 1], предложенный нами в 1935 г. в качестве звукопринима-

Изложена теория диодного термоэлектронного датчика малых смещений с подвижным электродом. Дан способ определения чувствительности датчика по току и напряжению. Показано, что диодный термоэлектронный датчик с плоскими параллельными электродами является одним из самых чувствительных по току датчиков малых смещений, тогда как возможности повышения его чувствительности по напряжению довольно ограничены.

теля, является простейшим термоэлектронным индикатором малых смещений. Его принципиальная схема показана на рис. 1. Оба помещенные в вакууме электрода — катод 1 и анод 2 — сде-

ланы плоскими и расположены параллельно друг другу. Анод 2, укрепленный на рычаге 3, проходящем сквозь эластичную стенку 4 корпуса датчика, может смещаться в направлении, показанном стрелкой. Внешний конец рычага соединен с контролируемым телом.

Изменение расстояния между катодом и анодом при постоянном анодном напряжении приводит к изменению напряженности электрического поля между этими электродами и соответствующему изменению анодного тока.

Зависимость анодного тока, управляемого объемным зарядом, от расстояния между параллельными электродами может быть выведена при наличии следующих ограничивающих условий [Л. 2].

1. Расстояние между электродами полагаем малым по сравнению с их поперечными размерами, что позволяет считать электрическое поле между электродами однородным.

2. Начальные скорости электронов, вылетающих из катода, полагаем равными нулю.

3. Вакуум в датчике хороший.

4. Анод и катод эквипотенциальны.

Для зависимости анодного тока термоэлектронного датчика от его параметров можно написать:

$$I_a = A \frac{SU_a^{3/2}}{a^2}, \quad (1)$$

где S — поверхность электродов; a — расстояние между ними; U_a — анодное напряжение; $A = 2,34 \cdot 10^{-6}$. Соотношение (1) показывает, что анодный ток между плоскопараллельными электродами диодного датчика обратно пропорционален квадрату расстояния между ними.

Представим теперь приращение анодного тока диодного датчика, являющееся функцией анод-

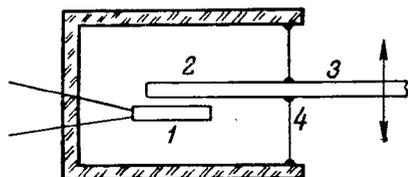


Рис. 1.

ного напряжения и расстояния между электродами, в виде полного дифференциала:

$$dI_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_a} dU_a + \frac{\partial I_a}{\partial a} da. \quad (2)$$

Здесь $\frac{\partial I_a}{\partial U_a}$ характеризует дифференциальную проводимость датчика:

$$\sigma_i = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right)_{\text{при } a = \text{const}} \quad (3)$$

Обратную ей величину, показывающую отношение приращений анодного напряжения к приращениям анодного тока при постоянном расстоянии между электродами датчика, определим как его дифференциальное внутреннее сопротивление:

$$R_i = \left(\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right)_{\text{при } a = \text{const}} \quad (4)$$

Частная производная анодного тока по смещению $\frac{\partial I_a}{\partial a}$ характеризует зависимость анодного тока от расстояния между электродами при постоянном анодном напряжении. Этот член определяет дифференциальную чувствительность датчика по току при малых смещениях. В некоторых электронных датчиках дифференциальная чувствительность может существенно отличаться от чувствительности по току, определенной при больших смещениях. При смещениях малых по сравнению с расстоянием между электродами нелинейностью характеристики можно пренебречь и считать чувствительность по току постоянной. В дальнейшем будем определять только дифференциальную чувствительность по току, которую и назовем просто чувствительностью датчика по току, выражаемую соотношением

$$\psi = - \left(\frac{\partial I_a}{\partial a} \right)_{\text{при } U_a = \text{const}} \quad (5)$$

Определим теперь чувствительность датчика по напряжению как отношение приращения падения напряжения на нем к вызвавшему его смещению анода при постоянном анодном токе:

$$\varphi = \left(\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right)_{\text{при } I_a = \text{const}} \quad (6)$$

Чтобы определить связь между чувствительностями датчика по току и напряжению, воспользуемся уравнением (2), в котором приравняем полное приращение анодного тока dI_a нулю, т. е. положим анодный ток постоянным:

$$\left(\frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right) dU_a + \left(\frac{\partial I_a}{\partial a} \right) da = 0,$$

а вместо частных производных подставим равные им R_i и ψ ; получим:

$$\left(\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right)_{\text{при } I_a = \text{const}} = -R_i \psi, \quad (7)$$

где левая часть равенства представляет собой выражение чувствительности по напряжению. Следовательно, чувствительность датчика по напряжению равна произведению чувствительности

по току, умноженной на его дифференциальное внутреннее сопротивление:

$$\varphi = -R_i \psi. \quad (8)$$

Обратимся теперь к использованию найденных соотношений для определения зависимости параметров диодного термоэлектронного датчика от размеров электродов и режима его работы, полагая анодный ток удовлетворяющим уравнению (1).

Воспользовавшись соотношением (5), найдем величину чувствительности по току:

$$\psi = \frac{2ASU_a^{3/2}}{a^3}. \quad (9)$$

На основании (3) значение дифференциальной внутренней проводимости

$$\sigma_i = \frac{3ASU_a^{1/2}}{2a^2}, \quad (10)$$

а в соответствии с (4) значение дифференциального внутреннего сопротивления

$$R_i = \frac{2a^2}{3ASU_a^{1/2}}. \quad (11)$$

Для чувствительности по напряжению в соответствии с (8) получим:

$$\varphi = \frac{4U_a}{3a}. \quad (12)$$

Так как напряженность однородного электрического поля между плоскими параллельными электродами

$$E = \frac{U_a}{a},$$

то выражение для чувствительности датчика по напряжению может быть представлено в форме:

$$\varphi = \frac{4}{3} E. \quad (13)$$

Таким образом, чувствительность по напряжению диодного термоэлектронного датчика с плоскими параллельными электродами оказывается равной четырем третям напряженности однородного электрического поля, получающегося между этими электродами.

Одновременное увеличение чувствительностей термоэлектронного датчика по току и напряжению, приводящее к возрастанию рассеиваемой внутренней мощности, оказывается невыгодным. Гораздо целесообразнее увеличивать чувствительность датчика по току за счет его чувствительности по напряжению и, наоборот, чувствительность по напряжению за счет чувствительности по току.

Диодный термоэлектронный датчик по своей природе приспособлен к работе на нагрузки с малым сопротивлением, для которых наиболее важной оказывается относительно большая чувствительность датчика по току.

Диодный термоэлектронный датчик с плоскими параллельными электродами, параметры которого мы определяли выше, является наиболее простым из термоэлектронных датчиков как по устройству электродов, так и по структуре электрического поля.

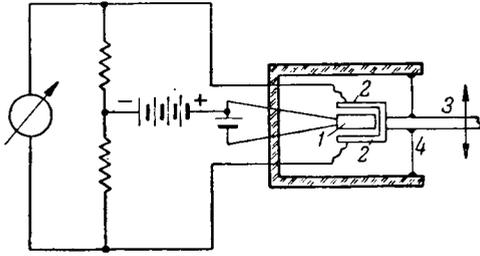


Рис. 2.

Уменьшая зазор между плоскими параллельными электродами, можно получать значительные напряженности электрического поля в зазоре, что, в свою очередь, позволяет получить значительные плотности анодного тока при малых анодных напряжениях. Эта особенность диодных датчиков с плоскими электродами делает их наиболее чувствительными по току из числа термоэлектронных датчиков малых смещений. Нетрудно показать, что другие системы электродов термоэлектронных датчиков малых смещений, позволяющие увеличить параметрическую чувствительность, приводят к увеличению падения напряжения и при равной мощности, рассеиваемой на аноде датчика, будут уступать по токовой чувствительности диодному датчику с плоскими электродами. Только наиболее чувствительный термоэлектронный датчик с гребенчатыми электродами оказывается при равной рассеиваемой мощности не менее чувствительным по току, чем правильно выполненный диодный датчик.

Нелинейность вольтамперной характеристики термоэлектронного диодного датчика побуждает пользоваться симметричным двуханодным датчиком, схематически показанным вместе с мостовой схемой на рис. 2. В этом датчике приближение к катоду одного из анодов сопровождается удалением второго.

Как было показано Ганном [Л. 3], а также Греховой и Васильевым включение в диагональ моста технического чувствительного портативного микроамперметра позволяет осуществить чувствительный микрометр, уверенно и надежно действующий, без всякого усиления с ценой деления порядка 0,1 мкм.

Опыт показывает [Л. 3], что при смещениях, не превосходящих одной десятой зазора между электродами, двуханодный микрометр, включенный в мостовую схему, дает хорошую линейность шкалы. Нелинейность шкалы не превышает 1% максимального отклонения.

При использовании усилителей также может оказаться целесообразным применение двуханодного датчика, особенно в малогабаритных установках, применяемых для изучения динамических процессов.

Приложение. Сигналы, генерируемые любыми параметрическими датчиками малых смещений, в том числе и электронными, имеют обычно неоднозначную зависимость от величины измеряемых смещений. Обусловлено это тем, что интенсивность получаемых электрических сигналов определяется, с одной стороны, изменением основного па-

раметра датчика, а с другой — интенсивностью потока энергии, циркулирующей в датчике.

Упомянутая неоднозначность зависимости сигнала от смещения делает целесообразным пользование универсальным методом сравнительной оценки чувствительности параметрических датчиков, не осложненным необходимостью учета энергетического режима датчика, который представляется относительное изменение одного из основных параметров датчика, отнесенное к вызвавшему его смещению.

Этот критерий мы будем называть в дальнейшем параметрической чувствительностью датчика.

В соответствии с изложенным позволим себе определить параметрическую чувствительность η как частное от деления относительного изменения $\frac{dB}{B}$ основного параметра B на вызвавшее его относительное смещение dt :

$$\eta = \frac{dB}{B dt} [с.м^{-1}].$$

Найдем теперь связь между параметрической и электрическими чувствительностями параметрического датчика, полагая, что основным параметром, по которому определяется его параметрическая чувствительность, является его внутреннее сопротивление R . Тогда мы можем написать выражение для параметрической чувствительности в форме:

$$\eta = \frac{dR}{R dt} с.м^{-1}.$$

Найдем связь токовой чувствительности датчика с его параметрической чувствительностью (при постоянном напряжении на датчике).

Преобразуем для этого последнее выражение, подставив в него значение

$$R = \frac{v}{i}.$$

После преобразования получим на основании (8):

$$\eta = \frac{\phi}{i},$$

или

$$\phi = -\eta i.$$

Стало быть токовая чувствительность параметрического датчика оказывается равной произведению его параметрической чувствительности на текущий в нем ток.

Найдем теперь связь чувствительности датчика по напряжению с его параметрической чувствительностью, подставив в выражение (11) найденное значение токовой чувствительности датчика $\phi = \eta R i$; а подставив сюда значение

$$i = \frac{v}{R},$$

получаем окончательно:

$$\phi = \eta \frac{R_i}{R} v.$$

Стало быть, вольтовая чувствительность параметрического датчика с нелинейными вольтамперными характеристиками, свойственными некоторым электронным датчикам, оказывается равной произведению падения напряжения на датчике на его параметрическую чувствительность и на отношение дифференциального внутреннего сопротивления к полному внутреннему сопротивлению датчика.

Для датчиков с линейными вольтамперными характеристиками

$$R_i = R,$$

и найденное выражение для связи вольтовой и параметрической чувствительностей принимает вид:

$$\phi = \eta v.$$

Литература

1. Л. А. Гончарский. Авторское свидетельство 47827 от 9 декабря 1935. Бюллетень изобретений, № 7, 1936.
2. Г. А. Гринберг. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. Издание АН СССР, 1948.
3. R. Guinn, Journ. of Applied Mechanics, т. 7, № 2, 1941.
4. H. F. Olson. Journ. of Acoust. Soc. of Am., т. 19, № 2, стр. 307, 1947.
5. R. C. Lewis. Journ. of Acoust. Soc. of Am., т. 22, № 3, стр. 357, 1950.
6. Mechanical Displacement Input Electron Tube. Instruments, т. 9, VII, стр. 420, 1946.

7. Mechano-Electronic Transducer RCA 5734. Rev. of Scient. Instr., т. 19, № 12, стр. 926, 1948.
8. Л. А. Гончарский. Авторское свидетельство 80630 от 24 декабря 1948. Бюллетень изобретений, № 3, 1950.
9. Л. А. Гончарский. Авторское свидетельство 78418 от 17 декабря 1948 г. Бюллетень изобретений № 1, 1950.
10. J. Rotstein. Electronics, т. 19, № 3, стр. 230, 1946.
11. В. Н. Мильштейн. Общий метод оценки малых изменений в электрических цепях с помощью эквивалентных схем. Электричество, № 5, 1950.

[11. 9. 1951]



Измерение емкости с помощью дифференциальной схемы на выпрямителях

Инж. А. И. ФЮРСТЕНБЕРГ

Москва

В работе [Л. 1] была предложена дифференциальная схема для измерения емкости, основными элементами которой являлись 4 купроксных выпрямителя и стрелочный гальванометр. Прибор, осуществленный по этому принципу, работал на частоте 50 гц и предназначался для измерения емкости в пределах от 5 пф до 2,4 мкф. При этом малые емкости включались через измерительный трансформатор тока. Таким образом, емкостное сопротивление объекта измерения доходило до 640 мгом, и поэтому сопротивление изоляции конденсатора существенно сказывалось на результатах измерений. Влияние различия в характеристиках применяемых выпрямителей также было причиной того, что описанная схема не получила распространения для точных измерений емкости.

Несколько упростив эту схему, применив метод замещения и частоту 1000 гц, можно заметно повысить точность измерения. Упрощенная принципиальная схема устройства дана на рис. 1. Прибор показывает разность токов, проходящих через измеряемую C_x и образцовую C_o емкости. Блокировочный конденсатор C_b пропускает переменную слагающую тока мимо гальванометра.

В случае использования вентилях с одинаковыми характеристиками стрелка указателя при равенстве емкости левой и правой ветвей схемы находится на нулевой отметке шкалы. Если средние значения сопротивлений выпрямителей (за проводящий полупериод) намного меньше соответствующих емкостных сопротивлений, т. е.

$$r_2 \ll \frac{1}{\omega C_x} \quad \text{и} \quad r_3 \ll \frac{1}{\omega C_o},$$

полные сопротивления обеих цепей в очень небольшой степени зависят от r_2 и r_3 . Если при этом через сравниваемые емкости проходят токи порядка нескольких десятых миллиампера или более и приме-

Описывается применение высокочувствительной дифференциальной схемы для измерения емкости методом замещения. Нулевым указателем служит магнитоэлектрический стрелочный гальванометр. Погрешность измерения неизвестной емкости практически равна погрешности образцовой переменной емкости. Метод пригоден для измерения емкости на звуковых и радиочастотах.

няются малогабаритные (измерительные) купроксные выпрямители, то коэффициенты выпрямления вентилях достаточно велики и их небольшие изменения, вызванные колебаниями напряжения гене-

ратора, не играют роли. При выполнении вышеуказанных двух условий схема практически не реагирует на колебания напряжения источника питания.

При помощи стрелочного гальванометра простой конструкции (например, прибора типа φ) может быть отмечена разность токов, проходящих через C_x и C_o порядка $1 \dots 2 \cdot 10^{-8}$ а. В то же время при $f \approx 1000$ гц и $C_x \approx 1000$ пф через измеряемую и образцовую емкости могут проходить токи порядка 1 ма. В этом случае относительная чувствительность схемы составит примерно $\pm 10^{-3}\%$.

Неизбежное различие в вольтамперных характеристиках выпрямителей приводит к тому, что отсутствие отклонения стрелки гальванометра характеризует лишь примерное равенство емкостей. Применение метода замещения устраняет влияние характеристик купроксов. Высокая чувствительность схемы и независимость от колебаний напряжения генератора дают возможность осуществить измерения с большой точностью (рис. 2).

Емкость вспомогательного конденсатора C_2 должна быть на 2...3% меньше, чем наибольшее значение образцовой переменной емкости $C_{o, макс}$. Подстроечный конденсатор

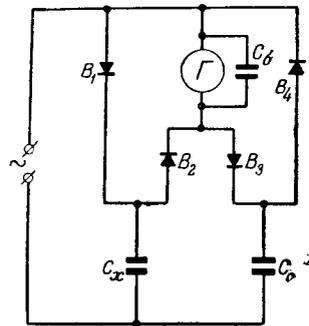


Рис. 1.

B_1, B_2, B_3, B_4 — малогабаритные купроксные выпрямители; Γ — магнитоэлектрический гальванометр; C_o — образцовый конденсатор переменной емкости; C_x — измеряемая емкость; C_b — блокировочный конденсатор.

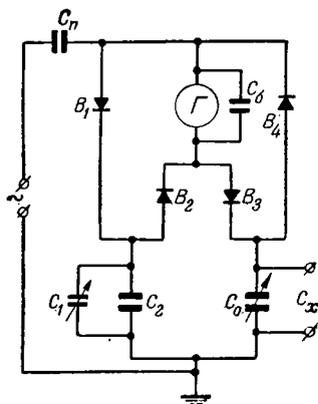


Рис. 2.

C_n — предохранительный конденсатор; C_o — образцовый конденсатор переменной емкости; C_x — зажимы для присоединения измеряемой емкости; C_1 — вспомогательный конденсатор переменной емкости; C_2 — вспомогательный конденсатор постоянной емкости; Γ — магнитоэлектрический стрелочный гальванометр ($1^\circ = 1 \dots 5,10^{-7} \text{ а}$); C_3 — блокировочный конденсатор, $2 \text{ мкф}/160 \text{ в}$.

ванометра на нулевую отметку шкалы. Затем присоединяется C_x и, уменьшая C_o , вновь приводят стрелку на 0. Измеряемая емкость, очевидно, равна изменению емкости образцового переменного конденсатора $C_x = C'_o - C''_o$ и может быть получена непосредственно, без вычисления разности, если воспользоваться градуировочной таблицей или графиком.

Если измеряемый конденсатор имеет экран, к которому присоединен один из зажимов, следует соединить этот зажим с заземленным полюсом C_o .

Перейдем теперь к погрешности измерения, вызванной тем обстоятельством, что замещаемые емкости могут иметь различные активные потери. Наиболее неблагоприятным является случай, когда, с одной стороны, образцовый конденсатор не имеет заметных потерь и, с другой стороны, измеряемая емкость близка по своей величине к наибольшему значению образцовой емкости. Для этого случая при замещении измеряемой емкости известной может быть написано равенство

$$\sqrt{\left(\frac{1}{\omega C_x}\right)^2 + (r + \rho)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\omega C_o}\right)^2 + r^2}; \quad (1)$$

здесь C_x — измеряемая емкость, ϕ ;

C_o — образцовая емкость, ϕ ;

ω — круговая частота колебаний, $1/\text{сек}$;

r — среднее (за проводящий полупериод) сопротивление вентилей, ом ;

ρ — сопротивление, эквивалентное активным потерям в измеряемой емкости, ом (включено последовательно с C_x , причем $\text{tg } \delta = \omega C_x \rho$).

Преобразовав выражение (1), получаем:

$$C_x = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{C_o^2} - 2r\rho\omega^2 - \rho^2\omega^2}}.$$

C_1 должен иметь наибольшую емкость порядка 5% от $C_{o, \text{ макс}}$. Предохранительный конденсатор C_n защищает выпрямители и гальванометр при случайных замыканиях в сравниваемых емкостях. Его величина должна составлять $C_n = 20 \dots 30 C_{o, \text{ макс}}$.

Измерение желательно производить в следующей последовательности. Присоединив проводники, предназначенные для включения измеряемой емкости, устанавливаем наибольшее значение C_o . Включив генератор при помощи подстроечного конденсатора C_1 , устанавливаем стрелку гальванометра на нулевую отметку шкалы. Затем

Погрешность измерения в абсолютных величинах составляет:

$$\Delta C_x = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{C_o^2} - 2r\rho\omega^2 - \rho^2\omega^2} - C_o}.$$

После разложения радикала в ряд и пренебрежения всеми членами выше второго порядка, имеем следующее выражение для относительной погрешности измерения емкости, вызываемой активными потерями:

$$\delta_p = \frac{\Delta C_x}{C_x} = r\omega C_x \text{tg } \delta + 0,5 \text{tg } \delta^2. \quad (2)$$

Так как квадрат коэффициента потерь конденсаторов, применяемых в технике, представляет очень небольшую величину, можно пренебречь вторым слагаемым в выражении (2). Тогда

$$\delta_p \approx 100 \frac{r}{x_c} \text{tg } \delta \%, \quad (3)$$

где x_c — реактивное сопротивление измеряемой емкости.

В целях устранения влияния колебаний напряжения задаемся $\frac{r}{x_c} \leq 0,05$. У измерительных слюдяных конденсаторов $\text{tg } \delta = 10^{-4} \dots 10^{-3}$. Тогда $\delta_p < 0,005 \%$. У бумажных конденсаторов $\text{tg } \delta = 0,5 \dots 2 \%$. Это дает $\delta_p \leq 0,1 \%$, что также вполне приемлемо, так как нестабильные бумажные конденсаторы нет надобности измерять с точностью, превышающей $\pm 0,2 \dots 0,3 \%$. Обычно для этой цели достаточна точность порядка $\pm 1 \%$.

Объект измерения иногда может иметь значительную утечку, вызванную загрязнением или влажностью. Хотя это встречается сравнительно редко, все же необходимо предварительно проверить сопротивление изоляции при помощи мегомметра, если конденсатор имеет достаточное рабочее напряжение, или измерить ток утечки имеющимся в схеме гальванометром. Последний защищается при этой проверке ограничивающим сопротивлением порядка 1 мгом . Сопротивление изоляции должно быть больше емкостного сопротивления конденсатора не менее чем в 100 раз.

Для измерения емкости, превышающей максимальную емкость образцового переменного конденсатора, параллельно последнему можно включить соответствующий образцовый постоянный конденсатор или магазин емкостей, пригодный для использования при данной частоте.

Преимущества и рассматриваемой схемы по сравнению с мостами являются:

- 1) большая относительная чувствительность;
- 2) быстрое уравнивание схемы (обусловлено изменением только одного параметра);
- 3) упрощенное экранирование цепей нужно только при $C_x < 1000 \text{ нф}$;
- 4) возможность работы в широком диапазоне частот с одним и тем же нулевым указателем.

Существенными недостатками схемы являются:

- 1) применение образцовой емкости, изменяющейся в тех же пределах, что и измеряемая;
- 2) невозможность определения активных потерь в конденсаторе;
- 3) необходимость в предваритель-

ной проверке сопротивления изоляции объекта измерения; 4) невозможность точного измерения емкости конденсаторов, имеющих весьма большие активные потери.

При использовании высокочастотных твердых выпрямителей данная схема может быть рекомендована для измерения малых емкостей на радиочастотах. В случае наличия образцовых переменной емкости подходящей величины описанная

дифференциальная схема может быть применена также на частотах звукового диапазона. Минимальная емкость, которая может быть надежно измерена при частоте 1 000 гц, имеет порядок 50 пф.

Литература

1. W. L. Векк. Новый измеритель емкости. Proceedings of the Physical Society, т. 25, ч. 6, стр. 765, № 251, 1933.

[25. 9. 1951]

О длительности импульса, генерируемого реактивной спускной схемой с катодной связью

Кандидат техн. наук, доц. Е. И. МАНАЕВ

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Мультивибратор с катодной связью¹, показанный на рис. 1, широко применяется в импульсной технике для получения прямоугольных импульсов длительностью от нескольких микросекунд до десятков тысяч микросекунд, момент энергирования и частота

повторения которых задаются положительными усиковыми импульсами, подаваемыми на сетку лампы L_1 через конденсатор C_{c1} .

Достоинствами схемы являются ее простота, возможность изменения длительности генерируемых импульсов путем изменения напряжения E_{c1} на сетке лампы L_1 с помощью потенциометра R_2 .

Несмотря на весьма широкое применение данной схемы мультивибратора, для нее до сих пор отсутствует формула, позволяющая определить длительность генерируемого импульса и зависимость длительности импульса от величины напряжения E_{c1} на сетке первой лампы.

Принцип действия. При отсутствии пусковых импульсов схема может сколько угодно долго находиться в состоянии устойчивого равновесия, при котором лампа L_1 (рис. 1) будет открыта благодаря плюсу на сетке, а лампа L_2 закрыта, потому что на ее сетку подается отрицательное напряжение с катодного сопротивления R_k , получаемое за счет протекания через него анодного тока лампы L_2 . На сетку лампы L_1 , кроме того, подается положительное напряжение E_{c1} , в его величина недостаточна для отпирания лампы.

Рассматривается работа специальной схемы мультивибратора с катодной связью для генерации импульсов и выводятся формулы, позволяющие определить длительность импульса. Доказывается, что длительность импульса является функцией отношения сеточного и анодного напряжений и устанавливаются границы существования функциональной зависимости. Расчеты по выведенным формулам подтверждены экспериментально. Работа была доложена 5 апреля 1950 г. на Научно-технической конференции Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина).

В этом состоянии схемы в цепи сетки лампы L_2 течет сеточный ток. Промежуток сетка — катод при положительных напряжениях на сетке обладает сопротивлением около тысячи ом, а утечка сетки E_{c2} имеет величину порядка нескольких миллионов ом, поэтому напря-

жение сетки лампы L_2 относительно катода не превышает 0,1...0,3 в и может считаться практически равным нулю.

Конденсатор C_{c2} будет заряжен до напряжения

$$U_{c, макс} = E_a - U_{k2}, \quad (1)$$

где E_a — напряжение источника питания на зажимах схемы;

U_{k2} — напряжение на катодном сопротивлении при открытой лампе L_2 .

В момент подачи положительного пускового импульса большой величины на сетку лампы L_1 она открывается и напряжение на ее аноде падает, вследствие чего лампа L_2 запирается, потому что

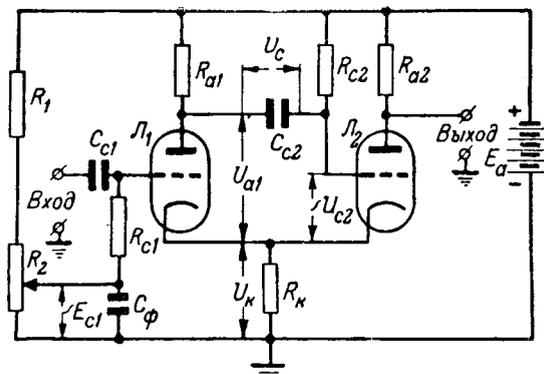


Рис. 1. Схема мультивибратора с катодной связью.

¹ Схему в литературе называют: кипп-реле, реактивный триггер и реактивная спускная схема.

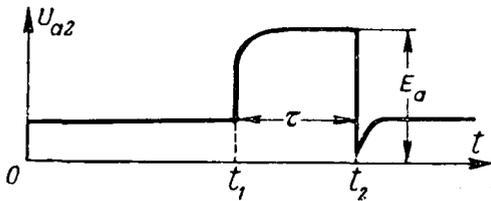


Рис. 2. Напряжение на аноде лампы \mathcal{L}_2 (форма генерируемого импульса).

напряжение на сетке лампы \mathcal{L}_2 относительно катода U_{c2} падает ниже напряжения отсечки второй лампы $E_{омс2}$.

Напряжение сетка—катод второй лампы

$$U_{c2} = U_{a1} - U_{кн}, \quad (2)$$

где U_{a1} —напряжение анод—катод первой лампы; $U_{кн}$ —напряжение на конденсаторе C_{c2} .

Следовательно, отрицательное напряжение на конденсаторе C_{c2} держит лампу \mathcal{L}_2 закрытой, а положительное напряжение U_{a1} на аноде лампы \mathcal{L}_1 стремится открыть лампу \mathcal{L}_2 .

Когда конденсатор C_{c2} настолько разрядится, что U_{c2} будет больше напряжения отсечки $E_{омс2}$ лампы \mathcal{L}_2 , лампа \mathcal{L}_2 откроется. Время, в течение которого лампа \mathcal{L}_2 закрыта, равно длительности положительного импульса τ , генерируемого схемой, зависит как от скорости разряда конденсатора C_{c2} , так и от напряжения на аноде лампы U_{a1} . Увеличивая напряжение E_{c1} , мы уменьшаем U_{a1} , а следовательно, увеличиваем время разряда и длительность генерируемого импульса τ .

На рис. 2 показан график напряжения на аноде лампы \mathcal{L}_2 относительно земли. Время t_1 соответствует моменту приложения пускового импульса, когда лампа \mathcal{L}_2 запирается; t_2 соответствует моменту отпираания лампы \mathcal{L}_2 .

Время разряда конденсатора C_{c2} определяет длительность генерируемого импульса. Эквивалентная схема заряда конденсатора изображена на рис. 3,а. Сопротивление утечки много больше сопротивления промежутка сетка—катод, к тому же

$$R_{c2} \gg R_k, \quad r_{c2} \ll R_{a1}, \quad (3)$$

и схему можно упростить (рис. 3,б).

Согласно схеме б (рис. 3) максимальное напряжение на конденсаторе

$$U_{c, макс} = E_a \frac{R_{a2} + R_{a2}}{R_{a2} + R_{a2} + R_k}. \quad (4)$$

Имея в виду, что сопротивления R_{a1} , R_{a1} и R_k много меньше сопротивления R_{c2} , можно считать, что R_{a1} не зависит от тока разряда конденсатора. Тогда, применяя теорему об эквивалентном генераторе, можно получить упрощен-

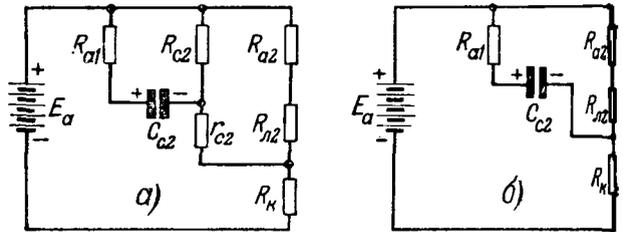


Рис. 3. Эквивалентные схемы заряда конденсатора C_{c2} .

ную эквивалентную схему разряда конденсатора (рис. 4).

Эквивалентная э. д. с. генератора

$$E' = E_a \frac{R_{a1}}{R_{a1} + R_{a1} + R_k}. \quad (5)$$

Из эквивалентной схемы видно, что э. д. с. разряда равна сумме напряжений E' и $U_{кн}$.

Начальное напряжение на конденсаторе равно $U_{c, макс}$, и конденсатор стремится перезарядиться до напряжения E' . Сопротивление лампы можно считать не зависящим от тока разряда конденсатора вследствие его малости по сравнению с анодным током, поэтому можно полагать разряд экспоненциальным и напряжение на конденсаторе изменяющимся по следующему закону (рис. 5):

$$U_{кн} = -(U_{c, макс} + E') e^{-\frac{t}{T}} + E', \quad (6)$$

где

$$T \approx R_{c2} C_{c2}. \quad (7)$$

Разряд конденсатора C_{c2} происходит до тех пор (рис. 5), пока напряжение на нем не достигнет суммы $E_{омс2} + U_{a1}$. Поэтому, изменяя анодное напряжение первой лампы U_{a1} за счет E_{c1} , можно менять длительность импульса τ .

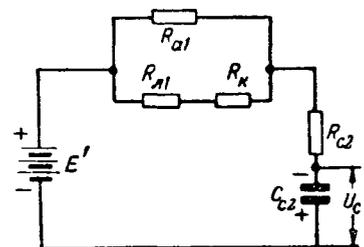


Рис. 4. Эквивалентная схема разряда конденсатора C_{c2} .

Функция $\tau = f(E_{c1})$ является почти линейной в широких пределах E_{c1} , что можно объяснить следующим образом.

Во-первых, лампа \mathcal{L}_1 работает по схеме катодного повторения, что, как известно, обеспечивает линейность напряжения U_{k1} и анодного тока i_{a1}

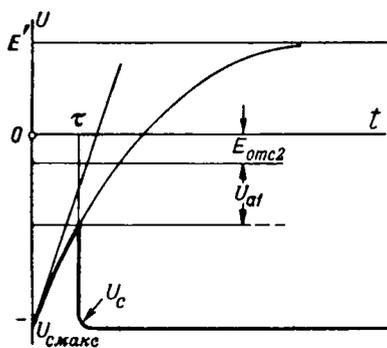


Рис. 5. Напряжение на конденсаторе C_{c2} .

при изменении E_{c1} , а следовательно, и линейность анодного напряжения

$$U_{a1} = E_a - (R_{a1} + R_k) i_{a1}. \quad (8)$$

Во-вторых, благодаря большой э. д. с. разряда, равной $U_{кн. макс} + E'_1$, используется начальный участок экспоненты, не очень сильно отклоняющийся от линейного.

В-третьих, имеет место компенсация влияния нелинейности экспоненты за счет увеличения э. д. с. разряда при увеличении длительности импульса.

В самом деле, при увеличении E_{c1} растет анодный ток и напряжение

$$E' = i_{a1} R_{a1} \quad (9)$$

также увеличивается. Поэтому разряд конденсатора пойдет по более крутой экспоненте, так как начальная э. д. с. в цепи разряда

$$e_{нач} = U_{c. макс} + E' \quad (10)$$

возрастает.

Определение длительности импульса. Разряд конденсатора прекращается, когда напряжение на нем достигает суммы напряжений

$$U_{кн} = -(U_{a1} + E_{омс2}).$$

Подставляя $U_{кн}$ из выражения (6) и заменяя в нем t на τ , получим:

$$\frac{\tau}{T} = \ln \frac{U_{кн. макс} + E'}{E' + U_{a1} + E_{омс2}}. \quad (11)$$

Далее, анодный ток лампы L_1 много больше тока разряда, и можно считать анодное напряжение

$$U_{a1} = E_a \frac{R_{a1}}{R_{a1} + R_{a1} + R_k}. \quad (12)$$

Подставляя в (11) $U_{c. макс}$ из (4), E' из (5) и U_{a1} из выражения (12), получим:

$$\frac{\tau}{T} = \ln \frac{\frac{R_{a2} + R_{a2}}{R_{a2} + R_{a2} + R_k} + \frac{R_{a1}}{R_{a1} + R_{a1} + R_k}}{\frac{R_{a1} + R_{a1}}{R_{a1} + R_{a1} + R_k} + \frac{E_{омс2}}{E_a}}. \quad (13)$$

Формула (13) позволяет определить длительность импульса, генерируемого мультивибратором, если по ламповым характеристикам найти значения сопротивлений R_{a1} и R_{a2} ламп L_1 и L_2 по постоянному току.

Связь между длительностью импульса и параметрами схемы. Сопротивление второй лампы постоянному току при $U_{ck1} \approx 0$ можно считать равным:

$$R_{a2} \approx R_i. \quad (14)$$

Сопротивление первой лампы постоянному току можно определить следующим образом:

$$R_{a1} = \frac{U_{a1}}{i_{a1}} = \frac{R_i}{1 + \mu \frac{U_{ck1}}{U_{a1}}}. \quad (15)$$

Напряжение

$$U_{ck1} = E_{c1} - U_{k1},$$

$$U_{k1} \approx E_a \frac{R_k}{R_{a1} + R_{a1} + R_k}, \quad (16)$$

если, как указывалось выше, пренебречь незначительным падением напряжения на сопротивлениях R_{a1} , R_{a1} и R_k , получающимся за счет прохождения через них тока перезаряда конденсатора C_2 , малого по сравнению с анодным током. Отсюда

$$U_{ck1} = E_{c1} - E_a \frac{R_k}{R_{a1} + R_{a1} + R_k}. \quad (17)$$

Выражения (12) для U_{a1} и (17) позволяют найти отношение $\frac{U_{ck1}}{U_{a1}}$. Подставляя это отношение в (15), получаем:

$$R_{a1} = \frac{R_i + \mu R_k - \mu \frac{E_{c1}}{E_a} (R_{a1} + R_k)}{1 + \mu \frac{E_{c1}}{E_a}}. \quad (18)$$

Это выражение позволяет найти сопротивление лампы L_1 постоянному току, не прибегая к графическим построениям на характеристиках.

Если (14) и (18) подставить в формулу (13), то она примет следующий вид:

$$\frac{\tau}{T} = \ln \frac{1 - \frac{R_k}{R_{a2} + R_i + R_k} + \frac{R_{a1}}{R_{a2}} + \frac{R_{a1}}{R_{a2}} \frac{E_{c1}}{E_a}}{1 - \frac{R_k}{R_{a2}} + \frac{E_{омс2}}{E_a} - \mu \frac{R_k}{R_{a2}} \frac{E_{c1}}{E_a}}, \quad (19)$$

где

$$R_{a2} = R_i + R_{a1} + (\mu + 1) R_k.$$

Формула (19) показывает, что отношение длительности импульса к постоянной времени цепи разряда действительно является функцией отношения напряжений $\frac{E_{c1}}{E_a}$. Эта функция близка к линейной ввиду того, что $\frac{E_{c1}}{E_a}$ изменяется в не-

больших пределах и члены с $\frac{E_{c1}}{E_a}$ входят в числитель и знаменатель логарифма с противоположными знаками.

Всегда $k_{омс} < \mu$. Например, для лампы 6Н8 $\mu = 20$, а $k_{омс} = 13,3$ при $U_a = 200$ в. Можно принять, что напряжение отсечки лампы L_2

$$E_{омс2} = \frac{U_{a2}}{k_{омс}}, \quad (20)$$

где коэффициент отсечки $k_{омс}$ определяется по реальным характеристикам; U_{a2} — напряжение между анодом и катодом второй лампы, когда первая лампа открыта.

Напряжение

$$U_{a2} = E_a - U_{k1},$$

где U_{k1} определяется по (16).

Согласно (20), (16) и (18)

$$\frac{E_{омс2}}{E_a} = \frac{1}{k_{омс}} \left[1 - \frac{R_k}{R_{\Sigma}} - \mu \frac{R_k}{R_{\Sigma}} \frac{E_{c1}}{E_a} \right]. \quad (21)$$

Подставляя (21) в (19), окончательно получим:

$$\frac{\tau}{T} = \ln \frac{1 - \frac{R_k}{R_{a2} + R_i + R_k} + \frac{R_{a1}}{R_{\Sigma}} + \mu \frac{R_{a1}}{R_{\Sigma}} \frac{E_{c1}}{E_a}}{\left(1 + \frac{1}{k_{омс}} \right) \left(1 - \frac{R_k}{R_{\Sigma}} - \mu \frac{R_k}{R_{\Sigma}} \frac{E_{c1}}{E_a} \right)}. \quad (22)$$

Формула позволяет весьма просто определить длительность импульса через параметры схемы и лампы. При некотором значении $\frac{E_{c1}}{E_a} = \left(\frac{E_{c1}}{E_a} \right)_{мин}$

$\frac{\tau}{T}$ равняется нулю.

Тогда

$$\left(\frac{E_{c1}}{E_a} \right)_{мин} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{R_{\Sigma}}{R_{a1} + \left(1 + \frac{1}{k_{омс1}} \right) R_k} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{R_k}{R_{a2} + R_i + R_k} + \frac{1}{k_{омс}} \right) - 1 \right]. \quad (23)$$

При некотором значении $\frac{E_{c1}}{E_a} = \left(\frac{E_{c1}}{E_a} \right)_{макс}$ лампа L_1

не будет запирается напряжением на катоде. Это наступит при

$$E_{c1 макс} - U_{k2} = -E_{омс1}, \quad (24)$$

где

$$U_{a2} = E_a \frac{R_k}{R_{a2} + R_i + R_k}, \quad (25)$$

$$E_{омс1} = \frac{E_a - U_{k2}}{k_{омс1}}. \quad (26)$$

Подставляя (25) и (26) в (24), получим:

$$\left(\frac{E_{c1}}{E_a} \right)_{макс} = \frac{\left(1 + \frac{1}{k_{омс1}} \right) R_k}{R_{a2} + R_i + R_k} - \frac{1}{k_{омс1}}. \quad (27)$$

Очевидно, формула (22) справедлива в пределах изменения $\frac{E_{c1}}{E_a}$ от $\left(\frac{E_{c1}}{E_a} \right)_{мин}$ до $\left(\frac{E_{c1}}{E_a} \right)_{макс}$, определяемых (23) и (27).

Экспериментальная проверка. Для проверки выведенных формул был собран мультивибратор² по схеме рис. 1 на двойном триоде типа 6Н8.

Вначале убедились, что в соответствии с выведенными формулами изменение анодного напряжения не влияет на длительность генерируемого импульса при пропорциональном изменении сетевого напряжения E_{c1} , осуществляемом автоматически с помощью потенциометра R_2 . Затем анодное напряжение E_a было установлено неизменным и равным 300 в, а изменялось лишь напряжение E_{c1} и определялась длительность импульса генерируемого мультивибратором.

Опытные точки нанесены на расчетных графиках, показанных на рис. 6 и 7. Расчетные графики изменения $\frac{\tau}{T} = f \left(\frac{E_{c1}}{E_a} \right)$, построенные на основе вычислений по формуле (22), имеют вид почти прямых линий, начальной и конечной абсциссой которых являются $\left(\frac{E_{c1}}{E_a} \right)_{мин}$ и $\left(\frac{E_{c1}}{E_a} \right)_{макс}$ вычисленные по формулам (23) и (27).

Из приведенных экспериментальных данных видно, что минимальная длительность импульса генерируемого мультивибратором, ввиду наличия паразитных емкостей не может быть сделана равной нулю. Она лишь в 5—10 раз меньше максимальной длительности генерируемого импульса. Это следует учитывать при проектировании мультивибратора с катодной связью.

Параметры схемы для четырех графиков сведены в таблицу.

Номер графика на рис. 6, 7	R_{a11} , ком	R_{a21} , ком	R_{k1} , ком	C_{c21} , пкф	R_{c2} , мгом
1	7,05	7,01	1,90	510	3
2	5,80	5,95	3,00	510	3
3	49,7	49,9	15,2	394	3
4	49,7	49,9	49,0	394	3

При расчетах были приняты параметры лампы 6Н8: $R_i = 7$ тыс. ом; $\mu = 20$; $k_{омс} = 13,3$, и они считались постоянными для всех режимов, хотя в действительности они сильно изменяются³.

Экспериментальные результаты подтверждают формулу (22), а также формулу (23). Формула (27) требует учета изменения $k_{омс1}$ при изменении U_{a1} .

² Сборка мультивибратора и измерения производились лаборантом Г. В. Мармузовым.

³ Если в расчетные формулы подставить параметры лампы, найденные по характеристикам для средних значений напряжений на электродах лампы, то совпадение экспериментальных и расчетных данных улучшится.

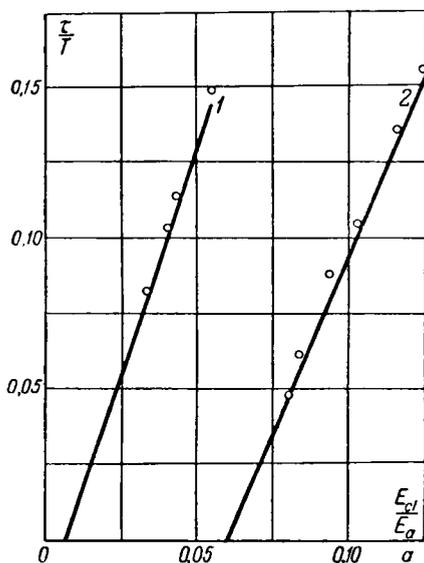


Рис. 6. Расчетные графики зависимости $\frac{\tau}{T} = f\left(\frac{E_{c1}}{E_a}\right)$ и опытные точки (параметры схемы даны в таблице).

При опытах было обнаружено, что сопротивление, гасящее излишек анодного напряжения, или сопротивление фильтра, необходимо блокировать емкостью на землю. Если нет блокирующей емкости, то падение напряжения на фильтрующем сопротивлении за счет токов ламп L_1 и L_2 неодинаково. Это приводит к уменьшению длительности генерируемого импульса по сравнению с расчетным, обусловленного тем, что анодное напряжение E_a при заряде конденсатора меньше расчетного, а анодное напряжение U_{a1} больше расчетного за счет того, что ток лампы L_1 всегда меньше тока L_2 . При наличии блокирующей емкости достаточной величины напряжение, снимаемое с емкости, практически не изменяется и расчетные значения совпадают с опытными.

Реактивная спускная схема нормально запускается большими положительными импульсами напряжения в несколько десятков вольт, подаваемых на сетку первой лампы. Схема значи-

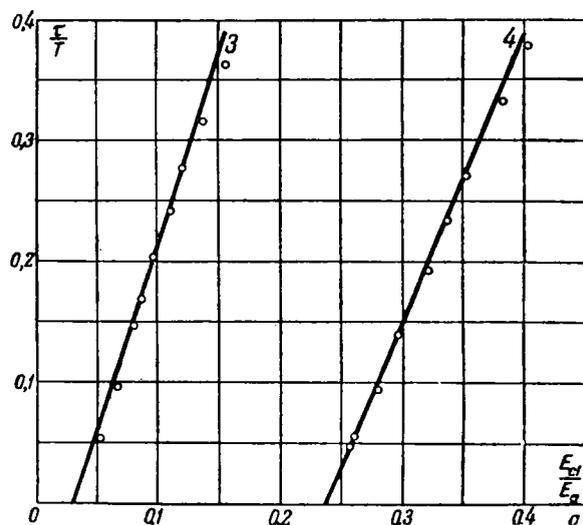


Рис. 7. Расчетные графики зависимости $\frac{\tau}{T} = f\left(\frac{E_{c1}}{E_a}\right)$ и опытные точки (параметры схемы даны в таблице).

тельно более чувствительна к отрицательным импульсам, попадающим на сетку второй лампы. Поэтому для устранения случайных самосрабатываний от напряжений, наводимых на сетку второй лампы, или от отрицательных импульсов, подаваемых на сетку первой лампы, но попадающих на сетку второй лампы через внутриэлектродную емкость C_{ca1} , можно блокировать сетку второй лампы на землю с помощью емкости $C_B \approx 100$ пкф.

Результаты экспериментов показывают, что вполне допустимо применение идеализированных, спрямленных ламповых характеристик для анализа работы мультивибраторов при учете влияния нижнего изгиба реальных характеристик.

Можно надеяться, что применение идеализированных характеристик при анализе импульсных схем приведет к созданию инженерных методов расчета импульсных схем, которые будут такими же точными и простыми, как, например, методы расчета генераторных и усилительных устройств.

[20. 11. 1950]



К 150-летию опытов В. В. Петрова с электрической дугой 29 (17) мая 1802 г.

«... сей неутомимый отечественный наш физик делал... первые публичные опыты... мая 17 дня»

(Журнал „Северный вестник“, СПб, ч. III, стр. 21)

«Я надеюсь, что просвещенные и беспристрастные физики по крайней мере некогда согласятся отдать трудам моим ту справедливость, которую важность сих последних опытов заслуживает».

(В. В. Петров „Известие о гальвани-вольтовых опытах“, СПб, 1803 г.)

В 1800 г., на рубеже двух столетий, был построен первый генератор непрерывного электрического тока — вольтов столб, сыгравший громадную роль в пробуждении глубокого интереса к вопросам гальванизма и в развитии исследований в этой новой области. Значение изобретения вольтова столба было исключительно велико, и нельзя считать преувеличением слова Араго, биографа Вольты: «вольтов столб — самый замечательный прибор, когда-либо изобретенный человечеством, не исключая телескопа и паровой машины».

С момента появления вольтова столба изучение гальванизма становится мощным движением в области физики: буквально во всех просвещенных странах люди различных профессий и разных уровней знания стали экспериментировать при помощи тока, доставляемого вольтовым столбом. Наряду с серьезными научными экспериментами, которые с этого времени начали вестись в физических лабораториях, многочисленные опыты ради развлечения велись любителями. Все это очень скоро стало давать свои неожиданно значительные результаты.

Первые экземпляры вольтова столба были построены в Англии на основе описания, посланного Вольтой Президенту королевского общества Бенксу при письме от 20 марта 1800 г. В этом письме [Л. 1] было изложено следующее:

«После продолжительного молчания, в котором не смею оправдываться, я имею удовольствие уведомить Вас, а через Ваше посредство Королевское общество о некоторых поразительных результатах, полученных мною при исследовании электричества, возбуждаемого простым контактом разнородных металлов или даже других каких-либо проводников, либо жидкостей, либо содержащих какую-нибудь влагу, благодаря которой они являются проводящими. Главный результат, заключающий в себе все другие, — это построение прибора, сходного по своим действиям с лейденской банкой или, вернее, со слабо заряженной электрической батареей, но действующего непрерывно, в котором заряд сам собой восстанавливается после разряжения. Этот прибор обладает как-бы неисчерпаемым зарядом, оказывая непрерывно действие на электрическую жидкость. В то же время этот прибор отличается от обыкновенной батареи как этим своим непрерывным действием, так и тем, что он составляется из наилучшим образом подобранных проводников, вместо того чтобы состоять, подобно обыкновенным электрическим банкам и батареям, из одного или многих тонких слоев изолирующих тел, обложенных проводниками. Двадцать, сорок, шестьдесят медных или, лучше, серебряных кружков, сложенных каждый с оловянным или, лучше цинковым кружком, с таким же числом прослоек из воды или какой-либо другой жидкости, лучше проводящей, чем вода... — вот все, из чего состоит мой новый инструмент, действующий, как я сказал, подобно лейденской банке или батарее, вызывающий такие же сотрясения, как они... Прибор этот бесконечно превосходит силу обыкновенных батарей в том отношении, что не требует предварительной зарядки от постороннего источника электричества и может вызывать сотрясения при каждом соответствующим образом произведенном прикосновении, сколько бы раз такие прикосновения не повторялись».

Письмо Вольты было доложено Королевскому обществу 26 июня 1800 г. [Л. 2]. Еще до опубликования письма о его содержании узнал от Бенкса издатель научного журнала В. Никольсон. Совместно с врачом А. Карлейлем он построил вольтов столб из серебряных монет (полукроны) и такой же величины цинковых кружков с прокладками из бумаги, пропитанной соляным раствором. Этот столб состоял из 17 гальванических пар; экспериментаторам удалось вполне убедиться в том, что прибор способен производить то действие, о котором писал Вольта; кроме того, они обнаружили еще и другое действие столба, о котором Вольта не упоминал, а именно: из капли воды, налитой на верхнюю цинковую пластинку столба для создания более надежного контакта с отходящей проволокой, выделялись при работе прибора на внешнюю замкнутую цепь пузырьки газа, «по запаху схожего с водородом». В связи с этим Карлейль и Никольсон проделали опыт [Л. 3], который можно считать первым в мире непрерывным электролизом жидкости; так было положено начало многочисленным последующим исследованиям в области электрохимических действий гальванического тока. Как известно, эти исследования очень скоро привели к выяснению состава многих химических соединений и к выделению в чистом виде ряда новых химических элементов.

В 1802 г. дерптский профессор физики, впоследствии академик Петербургской академии наук, Г. Паррот сформулировал новую теорию гальванического электричества — химическую — в противовес высказанной Вольтой контактной теории этого явления [Л. 4].

В 1805 г. русским ученым Федором Гротгуссом была создана и первая теория электрохимических действий тока [Л. 5].

Другая группа явлений, которые были замечены при соприкосновении между собой концов проводников, соединений с полюсами вольтова столба, это — световые и тепловые явления. Эти действия тока также возбудили большой интерес, и им было посвящено достаточно много разнообразных экспериментов и исследований.

Наиболее значительные и бесспорные классические работы в этой области принадлежат выдающемуся русскому академику Василию Владимировичу Петрову (19.7.1761—3.8.1834), открывшему во всяком случае не позднее 1802 г. явление электрической дуги.

Точная дата первого публичного показа В. В. Петровым этих замечательных действий построенного им огромного вольтова столба зафиксирована в сообщении об этих опытах, напечатанном в журнале «Северный вестник» [Л. 6]: «Медицинская коллегия... в 1802 г. по представлению профессора Петрова определила достаточную сумму для приготовления огромной гальвани-вольтовской батареи с нужными приборами, состоящей из 4 200 цинковых и медных кружков, весьма выгодно расположенных в горизонтальном ящике в 4 ряда, кои длина вообще составляет 40 английских футов... Посредством таковой батареи сей неутомимый отечественный наш физик делал в присутствии Медицинской коллегии и многих знаменитых особ первые публичные опыты сего же года мая 17 дня. В следующем году он издал сочинение свое первое на нашем языке

о сем предмете под названием «Известие о гальвани-вольтовских опытах» (рис. 1).

Действительно, в 1803 г. вышло из печати упомянутое выше сочинение В. В. Петрова [Л. 7], являющееся первым в мировой литературе монографическим произведением о действиях гальванического электричества. В этом сочинении вопрос о действиях гальванического тока трактовался для своего времени с исключительной обстоятельностью.

Приведенные данные устанавливают, что 17 (29) мая 1802 г. В. В. Петров публично демонстрировал гальванические опыты, описанные затем в его «Известии»; среди этих опытов самую важную и самую интересную часть составлял показ электрической дуги. Световые и тепловые действия гальванического тока, которым посвящены «статьи» (т. е. главы) VI, VII и VIII мемуара В. В. Петрова, заключают в себе основные результаты его опытов. Показ нового явления — электрической дуги и ее световых и тепловых действий — привлек 17 (29) мая 1802 г. на демонстрацию опытов В. В. Петрова все руководство Медицинским ведомством (Петров как профессор Медико-хирургической академии состоял в этом ведомстве) и «многих знаменитых особ».

Сочинение В. В. Петрова о гальванизме поступило в продажу в конце 1803 г., о чем имела публикация в газете «С.-Петербургские ведомости» от 17 (29) ноября 1803 г. № 92 [Л. 8]. Таким образом, к концу 1803 г. открытие В. В. Петровым явления электрической дуги стало общезвестным фактом, о котором лицам, интересовавшимся вопросами гальванизма, трудно было не знать. Было бы неправильным предполагать, что об открытии В. В. Петрова, сделанном в Петербурге и описанном в книге, изданной на русском языке в 1803 г., знали только в России; о нем, несомненно, имелись сведения и за рубежом: за границей внимательно следили за петербургскими газетами и за научными изданиями русских авторов. Об особом действии гальванического тока — образовании электрической дуги — было довольно определенно указано и в объявлении С.-Петербургской академии наук о конкурсе 1804 г. на тему «О природе света», разосланном на немецком языке иностранным академиям и научным учреждениям [Л. 9]. В этом объявлении Академией делалось указание на то, что в объем исследований на заданную тему должны быть включены также и явления гальванического огня, «ослепительная яркость которого в случае больших вольтовых столбов и обугленных веществ до известной степени подобна солнечному свету».

Из этой цитаты, являющейся переводом соответствующего места упомянутого объявления о конкурсе, видно, что русским ученым в 1804 г., через год после выхода в свет книги В. В. Петрова, явление гальванического огня, а отнюдь не искры было хорошо известно, а русская Академия наук считала, что исследования вопросов о природе света «могли не без пользы быть распространены на гальванический огонь».

Между тем в литературе в разное время отмечалось, что открытие явления электрической дуги принадлежит английскому ученому Хэмфри Дэви; при этом указывались различные даты его первых наблюдений (от 1800 до 1813 гг.), как правило, не документированные ссылками на источники, по которым можно было бы убедиться в справедливости этого факта. Имя В. В. Петрова либо совсем не упоминалось в зарубежной литературе, либо значение работ В. В. Петрова не раскрывалось, а в отдельных случаях оно даже подвергалось искажению.

В русской литературе дореволюционного времени иногда несправедливо забывали о существовании и результатах работ В. В. Петрова и, слепо вторя иностранным источникам, упоминали имя Дэви, когда вопрос касался приоритета открытия явления электрической дуги. Это заблуждение было настолько сильным, что оно отражалось даже в некоторых статьях видных русских электротехников, которых никак нельзя заподозрить в стремлении скрыть значение трудов В. В. Петрова. Так, например, В. Н. Чиколев в статье по истории электрического освещения [Л. 10] отмечает опыты Дэви в 1813 г. и совершенно не упоминает о приоритете и открытии В. В. Петрова. У читателей этой статьи В. Н. Чиколева могло создаться неправильное представление, будто в 1813 г. вообще впервые наблюдалось явление электрической дуги и будто до Дэви это явление никому не было известно. Между тем с точки зрения приоритета В. В. Петрова, открывшего явление электрической

ИЗВѢСТІЕ

О

ГАЛЬВАНИ - ВОЛЬТОВСКИХЪ

О П Ы Т А Х ъ,

которыя производилъ

Профессоръ Физики Василій Петровъ,

посредствомъ огромной наипаче батареи, состоявшей иногда изъ 4200 мѣдныхъ и цинковыхъ кружковъ, и находящейся при Санкт - Петербургской Медико - Хирургической Академіи.

ВЪ САНКТ - ПЕТЕРБУРГѢ,

Въ Типографіи Государственной Медицинской Коллегіи, 1803 года.

Рис. 1.

дуги в 1802 г. или ранее, не имеют никакого значения более поздние опыты Дэви, когда явление дуги уже было открыто В. В. Петровым, демонстрировалось и описывалось им.

Путаница, которая возникла в вопросе о приоритете открытия электрической дуги, обращала на себя в разное время внимание ученых. В журналах печатались по этому вопросу статьи и корреспонденции. Не проходили мимо этого вопроса и авторы некоторых книг по электрическому освещению. Представляется интересным сообщить современному читателю о некоторых давних попытках восстановить истину в вопросе о приоритете открытия явления электрической дуги.

В 1882—1883 гг. историей открытия явления электрической дуги занимался английский электротехник Сильванус Томпсон. Опубликованные им материалы показывают, что Томпсон не принял во внимание, по непонятным нам причинам, трудов В. В. Петрова [Л. 11]. Вывод Томпсона таков: впервые явление дуги наблюдал Дэви, и это наблюдение относится к времени после 1808 г., когда Дэви удалось получить для лаборатории Королевского института большую батарею Волластона.

В 1896 г. возникла переписка между редакциями русского журнала «Электричество» и английского журнала «The Electrician» [Л. 12] по следующему поводу. Английский электрик П. Мейкок обратился 1 февраля того года в редакцию «The Electrician» с письмом, в котором указывал, что некоторые прилагательные, как, например, «гальванический» или «вольтов» до тошноты («ad nauseam») часто применяются в электротехнике и физике. По его мнению, имена Гальвани и Вольты уже достаточно увековечены тем, что важнейший измерительный прибор назван гальванометром, а единица электрического напряжения называется «вольт». В связи с этим автор письма считал, что не будет обидой для памяти Вольты, если стану

называть электрическую дугу не «вольтовой», а ...«дэвиевой», поскольку «открыл явление дуги Дэви, а не Вольта».

Свое письмо Мейкок заканчивает предложением употребить термин «электрическая дуга», который является правильным наименованием физического явления независимо от истории его открытия.

На это письмо последовал следующий протест редактора журнала «Электричество» А. Смирнова, опубликованный в «The Electrician» 28 февраля 1896 г. Приводим из него выдержку.

«...Мы прочли письмо г-на Мейкока, в котором он констатирует, что электрическая дуга была открыта Х. Дэви. Не желая умалить высокий авторитет знаменитого английского физика, мы не можем, тем не менее, воздержаться от сообщения, что в 1802 г. русский профессор Медико-хирургической академии В. Петров в Петербурге открыл явление так называемой вольтовой дуги, пользуясь батареями из 4 200 гальванических пар, и это открытие он описал в труде: «Известие о гальвани-вольтовых опытах».

Это письмо сопровождалось следующей редакционной припиской журнала «The Electrician»:

«Не вступая ни в какой мере в дискуссию о больших заслугах проф. Петрова и о важности опытов, которые он произвел в 1802 г., и которые были на русском языке опубликованы в 1803 г., следует отметить, что опыты Дэви над дугой начались в 1800 г. (как явствует из его статей в „Nicholson's Journal“ и „Philosophical Magazine“ за 1801 г.). В 1802 г. Дэви уже показывал дугу в аудитории Королевского института, пользуясь 150 парами».

Попытка редакции журнала «The Electrician» выгородить Мейкока и защитить Дэви была голословной. Редакция не сочла нужным (вернее не могла) дать точную ссылку на труды Дэви с указанием общепринятых библиографических данных. Как дальше будет показано, в статьях Дэви о гальванических опытах за 1800—1803 гг. не содержится никаких упоминаний о явлениях дуги. Не соответствует строгой истине и та часть редакционного примечания журнала «The Electrician», в которой утверждается, что Дэви в 1802 г. показывал в аудитории Королевского института явление электрической дуги, так как никаких сведений о таком показе 1802 г. не удалось обнаружить.

В отношении истории открытия электрической дуги ничего нового не содержится и в вышедшем в 1906 г. большом труде В. Б. Чудновского [Л. 13], который ограничился в вопросе об электрической дуге воспроизведением некоторых цитат из различных научных статей, а коснувшись упомянутой корреспонденции А. Смирнова, перепутал все окончательно и открытие в 1802 г. электрической дуги приписал самому ... А. Смирнову.

Задача исследования вопроса о приоритете открытия явления электрической дуги должна заключаться в беспристрастном научном анализе трудов по гальванизму за период 1800—1803 гг., т. е. за время, предшествовавшее выходу в свет мемуара В. В. Петрова, содержавшего описание его опытов над электрической дугой и ее действиями.

Изучение литературы по гальванизму показывает, что за этот период было произведено очень много различных исследований; часть этих работ преследовала отнюдь не научные цели, а чисто коммерческие. Некоторые дельцы пытались в это время «заработать» на исключительно большом интересе широких кругов общества к явлениям гальванизма. К числу таких предприятий коммерческого характера следует отнести, например, «гальванические гастроли», которые организовал некий исполнитель фантазмагорий Робертсон в странах Западной Европы и в России.

Обратимся к рассмотрению и анализу научных публикаций по гальванизму, сделанных как Дэви, так и другими исследователями в период 1800—1804 гг. и содержащих сведения о наблюдении световых явлений при экспериментах. Необходимо заранее условиться о том, что мы называем электрической дугой и чем это явление отличается от других световых эффектов, производимых гальваническим током.

От электрической дуги совершенно отлично свечение проволоки, раскаленной протекающим по ней током. Эти явления различны по своей физической сущности. Явление электрической дуги нельзя смешивать с явлением отдельных дискретных искр, проскакивающих между проводниками, присоединенными к полюсам генератора гальванического тока. Искры были давно известны еще из опытов со статическим электричеством; они представляют собой лишь

очень кратковременное световое явление. С явлением электрической дуги нельзя смешивать и так называемый кистевой разряд. Под установившейся электрической дугой нужно подразумевать длительное непрерывное явление разряда между приведенными в соприкосновение, а затем раздвинутыми концами двух электродов, разделенных воздушным промежутком. Дуга возникает при сближении электродов и действует затем, когда электроды в необходимой степени раздвинуты. При поддержании неизменного расстояния между концами электродов возникшая дуга будет непрерывно действовать, испуская яркий свет и тепло.

На всех языках существуют совершенно определенные, отдельные термины для обозначения: накала, пламени, искры и дуги. Эти термины достаточно правильно применялись во всей той научной литературе, с которой мы знакомились при настоящем нашем исследовании, т. е. в соответствии с визуальным эффектом, который наблюдали экспериментаторы; это в сильной степени помогает разобраться в вопросе о приоритете открытия электрической дуги.

Представляется совершенно бесспорным, что открытие явления электрической дуги было крупным событием за первые годы гальванизма, отклики на которое должны были появиться во многих трудах физиков. Поэтому мы считали правильным искать сведения об этом явлении не только в сочинениях Дэви, но и в трудах других ученых периода 1800—1804 гг. Во всей изученной нами научной литературе этого периода на иностранных языках не удалось обнаружить ничего такого, что свидетельствовало бы о наблюдении за границей явления дуги.

Обратимся к наиболее интересным научным статьям периода 1800—1804 гг., в которых имеются сведения о световых явлениях, замеченных при опытах по гальванизму.

В конце 1800 г. Дэви обнаруживает, что действие гальванического электричества, в том числе и появление искр, происходит также и в том случае, если опыты производятся со столбом, к полюсам которого присоединены при помощи проволок угольные электроды. Об этом он сообщает Никольсону в письме от 28 сентября [Л. 14]. В этом сообщении, по существу, не было ничего нового: электропроводность угля была открыта Пристли еще в 1766 г., и об этом свойстве угля он писал в первом издании своего труда по истории электричества [Л. 15]. Одновременно с Дэви Никольсон произвел некоторые наблюдения над световыми явлениями: он отмечает, что искры от действия вольтова столба не всегда имеют одинаковый внешний вид; этот вид зависит от материала электродов [Л. 16]. Никаких других работ, опубликованных в 1800 г. и содержащих сведения о световых явлениях при опытах по гальванизму, обнаружить не удалось. Повидимому, в первые месяцы существования вольтова столба не могло еще возникнуть большого числа исследований; к тому же электрохимические действия гальванического тока и электролиз разных жидкостей привлекли в это время гораздо большее внимание, чем другие действия тока.

Однако вскоре число исследований по гальванизму стало быстро возрастать, и уже в 1801 г. появились новые факты; исследования уже вышли за пределы Англии и стали вестись во многих странах.

В 1801 г. публикует результаты своих гальванических опытов Мойес [Л. 17]. Построенный им вольтов столб состоял из 70 пар; автор работы описывает свои наблюдения над появлением искр между проводниками в момент замыкания внешней цепи столба. Другой исследователь, Бекман [Л. 18], подчеркивает, что при опытах с железными электродами, через которые проходит ток от вольтова столба, появляются искры при соприкосновении концов электродов, причем самые концы электродов так сильно раскаляются, что во все стороны разлетаются брызги расплавленного металла. Как бы продолжением упомянутых выше работ Никольсона о внешнем виде искр являются исследования Зимона [Л. 19], в которых приводятся некоторые сведения о спектре искр, получаемых от гальванического тока. Пфафф производил в том же году опыты в Киле и заметил, что искры между концами проводников появляются не только на воздухе, но и в разреженном пространстве под колоколом пневматической машины; если концы проводочных электродов приводить в контакт в атмосфере кислорода, то они сгорают с пламенем [Л. 20].

Дэви в 1801 г. не публиковал новых работ, связанных со световыми явлениями, но в одном письме, адресованном

доктору Беддо [Л. 21], он упоминает о своих опытах, относящихся к 1800 г., при которых он наблюдал искры между двумя кусками угля, присоединенными к полюсам источника тока.

И. В. Риттер, один из основателей электрохимии, занимался в 1801 г. гальваническими опытами и наблюдал световые явления. Были ли эти опыты описаны Риттером в каком-либо научном журнале, установить не удалось. В сочинениях Риттера [Л. 22] есть указание на то, что он писал о своих опытах в 1801 г. Гильберту, редактору «Физических анналов». Риттер пользовался 224 гальваническими парами цинк — серебро. Он обнаружил, что сильная искра, появляющаяся между концами электродов, прожигает тонкий золотой листок; если к железной проволоке цинкового полюса присоединить серебряный листок, а к серебряному — уголь, то при замыкании цепи на серебряном листке прожигается точный контур угля, сам же уголь совершенно не изменяется. Когда производилась перемена полярности электродов, то неповрежденным оставался серебряный листок, а с угля соскакивали искры и уголь слегка сгорал. Взяв чашку со ртутью, Риттер присоединял ртуть к цинковому полюсу, а к поверхности ртути приближал проводник, присоединенный к серебряному полюсу; искры появлялись между этим проводником и ртутью, причем на ртути оставался черный налет. Такое же явление Риттер наблюдал, когда этот проводник был из угля. Искры замечались как при замыкании цепи через ртуть, так и при размыкании; при перемене полярности искры также замечались, но вместо черного налета на поверхности ртути получались отдельные темные точки и участки.

Мы видим, что труды по гальванизму 1801 г., как и предшествующего 1800 г., не содержат ни малейших намеков на то, чтобы явление установившейся электрической дуги наблюдалось каким-либо ученым. Во всей научной литературе за эти годы совершенно отсутствуют сведения о дуге, как новом проявлении гальванического действия, в то время как некоторые новые малозначащие экспериментальные факты были описаны. Это является убедительным подтверждением того, что по 1801 г. включительно явление электрической дуги еще не было никому известно.

1802 г., год открытия В. В. Петровым явления электрической дуги, был весьма богат исследованиями в области гальванизма вообще и, в частности, в области его световых действий. В связи с тем, что во многих журнальных статьях и книгах указывалось, будто Дэви именно в этом году наблюдал явление дуги, и была даже сделана ссылка на одну его статью, помещенную в 1802 г. в журнале Королевского института, обратимся к работам 1802 г.

В этом году строились гораздо более мощные генераторы гальванического тока, чем ранее, что привело к открытию новых фактов. Дрезденский физик Рейнхольд сообщил о своих опытах со столбом из 175 пар больших цинковых и медных кружков диаметром в 3 дюйма [Л. 23]; он наблюдал более сильные искры, способные проскакивать на расстоянии до 2,5 мм. От этих искр сгорали гранулированный порох и металлические листки на концах проводников. Проволока, присоединенная к обоим полюсам, накаливалась. Кюрте отмечает [Л. 24], что древесный уголь, присоединенный к одному полюсу, испускал при соприкосновении с проволокой, отходящей от другого полюса, искры такой яркости, что предметы вокруг на мгновение освещались как бы белым светом.

Физик Грин в Лигнице произвел опыты при помощи столба из 495 пар [Л. 25]; он наблюдал искры, которые были особенно сильными, если он предварительно подогревал концы электродов. Он также заметил, что его столб действовал сильнее, если пластины в нем были подогреты. При помощи искр, которые он получал от вольтова столба, ему удавалось зажигать фосфор, серный цвет и губчатый порох.

Несколько обособленно находятся опыты офицеров Хельвига, Фихавского и Лейтены в Вене [Л. 26]. Они измельчили древесный уголь в порошок, смешали его с вареным крахмалом в тесто, из которого формовали шайбы. После прокалывания размеры шайб были таковы: диаметр около 75 мм и толщина — около 14 мм. Из этих шайб и металлических пластин такого же размера (цинковых и оловянных) с прокладками из картона, пропитанного хлористым калием, был составлен столб (30 пар). Получился довольно мощный столб, производивший особенно сильные

искры. При пропускании тока от этого столба через рядник с угольными наконечниками между концами углей появляются искры с дымом; на заостренном стержне из обугленной ольховой древесины появляется золная корка. Никаких упоминаний о явлении дуги здесь тоже нет, хотя подчеркивается особо сильное действие столба.

Крупнейшая работа Дэви за 1802 г. была озаглавлена: «Замечательные опыты с корытообразным аппаратом из тринадцатидюймовых пластин, относящиеся к проявлению силы гальванического электричества, тепловых действий и других изменений в жидкостях» [Л. 27]. То, что эта работа обратила на себя большое внимание, видно из следующего факта: она появилась почти одновременно в двух английских, одном немецком и одном французском журналах.

При опытах, описанных в этой статье, Дэви пользовался корытообразным аппаратом, т. е. ящичной батареей Волластона, устроенном в королевском институте и состоящим из 20 квадратных цинковых и медных пластин со стороны в 13 дюймов, т. е. около 33 см. Это была, повидимому, мощная батарея. Дэви обнаружил, что этот источник тока вызывает такие же явления, какие ранее наблюдались и при меньших батареях. Если ящик батареи наполнить чистой водой, то ток получается довольно слабый, а искры и электрические сотрясения весьма незначительны; в этих условиях можно было накалить при пропускании тока только маленький кусочек проволоки длиной в одну линию (т. е. в 2½ мм) и диаметром 1/7 дюйма. Когда вместо воды батарея заливалась раствором нашатыря, действие ее усиливалось; если же вместо раствора нашатыря в корыто наливался разбавленная азотная кислота, эффект становился гораздо сильнее. Тогда удавалось довести до белого каления проволоку той же толщины, но длиной 3 дюйма, а проволоку длиной 2 дюйма расплавлялась. Замкнув батарею через проволоку диаметром 1/80 дюйма и длиной в 2 фута, Дэви обнаружил, что она так сильно нагревается, что способна довести воду в сосуде до кипения. Проволока еще меньшего диаметра (1/170 дюйма) длиной в 4 дюйма в цепи этой батареи накаливается докрасна, а если ее погрузить в спирт или масло, то эти жидкости быстро нагреваются; деревянное масло от действия такой раскаленной проволоки закипает.

Таким образом, эта часть опытов Дэви не привела к наблюдению электрической дуги. Дальнейшие опыты, которые Дэви производил при помощи этой батареи, имели целью выяснить, как протекает действие этой батареи при электродах, погруженных в жидкость. Дэви ввел в цепь два куска хорошо обожженного угля или один уголь и одну проволоку, поместив их в прибор, который можно было наполнять различными жидкостями. Наполнив прибор жидкостью (вода, летучие масла, жирные масла, эфир, алкоголь, кислота), Дэви замечал, что искры между концами электродов возникают и в жидкостях, а кроме того выделяются газовые пузырьки. Здесь речь идет только об отдельных искрах, а непрерывного светового явления при этом не было обнаружено. Дэви пишет, что ему удавалось при помощи этой батареи доводить иногда нагрев кончиков углей до сильного накала, поддерживать это состояние на воздухе и усиливать эффект, помещая угли в кислород. Для более подробного исследования этого явления в газах Дэви построил другой прибор. Ему удавалось поддерживать раскаленными добела в течение 2 часов соприкасавшиеся кончики углей в атмосфере хлороводорода, и за это время угольки почти не расхолаживались, а газ мало уменьшился в объеме, но в трубке появился белый налет. При повторении этого опыта в трубке обнаруживались иногда очень сильные искры. Эта серия опытов Дэви также не привела к открытию явления дуги между электродами. Поэтому нет никакого основания считать будто в 1802 г. Дэви наблюдал явление электрической дуги.

К 1802 г. относится еще одно сообщение, о котором пишет Сильванус Томпсон [Л. 28]. В газете «Journal de Paris» от 22 вантаза X года (12 марта 1802 г.) была помещена информация относительно предстоящих демонстраций гальванических опытов. Приводим эту информацию в переводе: «Гражданин Робертсон, автор фантазматических, производит в настоящее время интересные опыты, которые, несомненно, должны умножить наши знания в области гальванизма. Только что он собрал столб из 2500 пластинок из цинка и такого же числа пластинок из красной меди. Мы будем непрерывно сообщать о его опытах, подобно тому как мы сейчас информируем об одном новом

опыте, произведенном им вчера с двумя раскаленными углями. Один из них был помещен у основания столба из 120 цинко-серебряных пар, а второй был соединен с вершиной столба, и они давали в момент их соприкосновения яркую искру чрезвычайной белизны, которую видели все присутствующие. Гражданин Робертсон повторит этот опыт 25 числа сего месяца».

Об опытах Робертсона, вызывавших опять-таки не дугу, а искру, никаких больше сведений Сильванус Томпсон не нашел; не появлялось также новых сведений и о «большом вольтовом столбе Робертсона». Был ли такой столб построен и приведен в действие, производились ли с ним какие-либо опыты, — все это не нашло никаких отражений в печати. В печати, правда, отмечались гастроли предпринимателя Робертсона, но они относились в равной мере и к гидравлическим опытам, и к воздухоплаванию, и даже к показу «невидимой женщины». Со своими фокусами Робертсон побывал и в Москве, и в Петербурге. Робертсон никогда не интересовался научной стороной используемых им с целью наживы всяких диковинок и фантазматических. Это остроумно и довольно едко заметил аэронавт начала прошлого века Гарнерен, находившийся одно время в России. Он говорил, что «Робертсон не больше содействовал воздухоплаванию, чем дикарь, глядящий на экран волшебного фонаря, помогает оптике». Примерно такое же значение для науки об электричестве имели сеансы Робертсона в области гальванизма. В связи с этим ничего кроме удивления и, пожалуй, обиды за людей науки и техники не вызывает доверчивое упоминание Фельдгаузом Робертсона в труде по истории техники [Л. 29].

Поиски материалов об открытии зарубежными учеными явления электрической дуги в период 1803—1807 гг. также не дали результатов. Это не означает, что за этот период вообще не было сделано каких-либо новых интересных наблюдений над гальванизмом. Интересующимся мы можем рекомендовать ознакомиться с рядом статей [Л. 30], но ни в одной из них ничего не содержится об электрической дуге.

Все это показывает, что приоритет открытия явления электрической дуги бесспорно принадлежит русскому ученому академику Василию Владимировичу Петрову, который впервые публично демонстрировал это явление 29 (17) мая 1802 г.

Собственные успехи Х. Дэви в области исследования гальванизма, приведшие его к получению в 1807 г. в чистом виде электролитическим путем двух новых элементов — калия и натрия, равно как и поступавшие из многих стран сведения о многочисленных успешных опытах не могли не способствовать тому, чтобы Дэви расширил область своих исследований и вышел за пределы изучения электрохимических действий тока, которыми он преимущественно занимался. Возможность дальнейших успехов зависела от увеличения мощности применяемых гальванических источников тока. Батареи, которыми располагал Дэви, оказались уже недостаточными.

11 июля 1808 г. Дэви делает следующее предложение руководству Королевского института [Л. 31]:

«Благодаря электрическим батареям Вольты появилось новое направление для исследований, обещающее привести к величайшим усовершенствованиям в химии и натуральной философии, а также в связанных с ними полезных искусствах, причем увеличение размера аппарата необходимо для достижения их полного развития. Поэтому предлагается создать по подписке фонд для построения мощной батареи, достойной национального учреждения и способной содействовать разрешению крупных научных проблем. В других странах также были предоставлены обширные общественные средства на развитие этих исследований. Эти исследования получили свое начало в Англии, и было бы позором для такой большой, сильной и богатой нации, если бы из-за материальных причин эти исследования получили бы свое завершение за границей. Обращение по этому поводу к просвещенным лицам, вероятно, не будет напрасным. Предлагается установить инструмент и аппараты в лаборатории Королевского института, где они и должны применяться для развития новой отрасли знания».

Далее указывалось, что вопрос этот не допускает отсрочки, так как малейшее промедление может создать возможность для других стран опередить Англию в этом отношении.

Обращение Дэви от 11 июля 1808 г. имело успех, необходимая сумма была вскоре собрана и батарея типа Вольстоуна из 2000 пар была установлена в королевском институте. При помощи этой батареи Дэви удалось выделить из металлических солей электролитическим путем магний, кальций, барий и стронций.

При помощи этой батареи Дэви в 1808 г. или 1809 г. получил электрическую дугу и продемонстрировал ее в Королевском институте. В труде Херты Айртона «Электрическая дуга» [Л. 32] есть указание на то, что в Королевском институте сохраняется записная книга Дэви; в ней содержатся записи, свидетельствующие о том, что в 1808—1809 гг. явление электрической дуги было Дэви получено, и здесь он уже говорит о непрерывном световом эффекте между концами угольных электродов. Однако первая публикация об опытах Дэви с большой батареей, произведенных в Королевском институте, относится уже только к 1810 г. [Л. 33]. Что же касается более подробного описания электрической дуги и ее действий, то оно впервые было дано Дэви в 1812 г. в его классическом сочинении: Elements of Chemical Philosophy, т. 1, стр. 152. Там, между прочим, сказано следующее: «если куски древесного угля длиной около 1 дюйма и диаметром около $\frac{1}{6}$ дюйма будут сближены концами (с промежутком от $\frac{1}{30}$ до $\frac{1}{40}$ доли дюйма), то получается яркая искра; ...при раздвигании же концов друг от друга получается постоянный разряд через нагретый воздух на промежутке по крайней мере 4 дюйма, производящий ярчайшую возвышающуюся световую дугу...». Итак, Дэви это описал в 1812 г.

А в 1803 г. В. В. Петров писал [Л. 7, стр. 163—164]: «если на стеклянную плитку или склянечку со стеклянными ножками будут положены два или три древесных угля, способные для произведения светящихся явлений посредством гальвани-вольтовой жидкости, если потом металлическими изолированными направляющими (directores), сообщенными с обоими полюсами огромной батареи, приближать оные один к другому на расстоянии от одной до трех линий; то является между ними весьма яркий белый до цвета свет или пламя, от которого оные углы скорее или медлительнее загораются и от которого темный покой довольно ясно освещен быть может...» (рис. 2).

В 1934 г. исполнилось столетие со дня смерти В. В. Петрова, отмеченное в СССР правительственным постановлением о мероприятиях для увековечения памяти выдающегося русского физика и электротехника и многочисленными собраниями нашей научно-технической общественности. Был переиздан мемуар В. В. Петрова о его опытах по гальванизму и впервые опубликованы архивные материалы о его жизни и трудах. На эту знаменательную дату появился отклик и в английской печати [Л. 34]. Это была первая статья в зарубежной прессе, в которой делалась попытка представить правильно роль В. В. Петрова. Г. Тови, автор этой статьи о «забытом электротехнике», высказывает несколько мыслей, которые сейчас уместно вспомнить и критически разобрать. Г. Тови высказывает предположение, что на работы В. В. Петрова по гальванизму оказало влияние то обстоятельство, что Наполеон назначил большую премию за новые открытия в области электричества. Таким образом, В. В. Петрову приписываются корыстные побуждения в его гальванических исследованиях. Между тем хорошо известно полнейшее бескорыстие Петрова как ученого и педагога. Правильно ли предположение Г. Тови?

Премия, о которой пишет Г. Тови, действительно была объявлена. Документальные данные показывают, что распоряжение Наполеона было опубликовано 15 июня 1802 г., т. е. по крайней мере через две недели после того, как В. В. Петров, закончив опыты, произвел публичный показ дуги перед членами Медицинской коллегии. Таким образом, его опыты никак не могли быть следствием объявления Наполеоном большой премии. Совершенно достоверно известно, что В. В. Петров никаких своих работ на соискание премии в Париж не посылал. Таким образом, разбираемое нами замечание Г. Тови не имеет никакого обоснования.

Г. Тови достаточно убедительно доказывает, что В. В. Петров придал вольтову столбу горизонтальное расположение совершенно независимо от горизонтального расположения пар, например, в батарее Крюкшенка, появившейся в конце 1800 г. Если бы В. В. Петров знал об этой

— 163 —

СТАТЬЯ VII.

О РАЗПАВЛЕНИИ И СОЖИГАНИИ МЕТАЛЛОВ И МНОГИХ ДРУГИХ ГОРЮЧИХ ТЪЛЪ, ТАКЖЕ О ПРЕВРАЩЕНИИ ВЪ МЕТАЛЛЫ НѢКОТОРЫХЪ МЕТАЛЛИЧЕСКИХЪ ОКСИДОВЪ ПОСРЕДСТВОМЪ ГАЛЬВАНИ-ВОЛЬТОВСКОЙ ЖИДКОСТИ.

Если на стеклянную пластку или на скамеечку со стеклянными ножками будутъ положены два или три древесныхъ угля, способные для произведенія соотносныхъ явлений посредствомъ Гальвани-Вольтовой жидкости, и если потомъ металлическими изолированными направляющими (directores), сообщенными съ обими полюсами огромной батареи, приближать оные одинъ къ другому на разстояніе отъ одной до трехъ линій; то явятся между ними весьма яркій блгаго цвѣта свѣтъ или пламя, отъ котораго оные угли скорѣе или медленнѣе загораются, и отъ

Рис. 2.

батареи, то он применил бы не кружки из цинка и меди, а более дешевые квадратные пластины.

В этой статье справедливо отмечается, что В. В. Петров первым ввел изоляцию проволочных проводников на их поверхности (сургуч, воск). Г. Тови высказывает мнение, что В. В. Петров, производя опыты нагревания проволоки током в безвоздушном пространстве, создал, по существу, прототип электрической лампы накаливания с металлической проволокой. Что же касается вопроса об открытии явления электрической дуги, то Г. Тови указывает, что Дэви производил эксперименты этого рода посредством батареи Крюкшенка из 150 четырехдюймовых пластин, но «не претендовал на оригинальность своих опытов, допуская, что это явление уже было открыто иностранным философом». Никаких подробностей этих опытов Дэви в статье не приводится, но изложенные выше факты показывают, что таким, по выражению Г. Тови, «иностранном философом» был в действительности русский ученый Василий Владимирович Петров.

Электрическая дуга постепенно стала получать практическое применение. Открывая трудами нашего замечательного соотечественника В. В. Петрова электрическая дуга впервые была практически использована в России. В 1812 г. член-корр. Академии наук П. Л. Шиллинг впервые осуществил взрывание подводных мин при помощи дугового запала, питавшегося гальваническим током от удаленного вольтова столба. Первая в мире крупная и в высшей степени удачная осветительная установка из десяти дуговых ламп была осуществлена в августе 1856 г. в Москве на площади перед Лефортовским дворцом трудами К. И. Константинова и А. И. Шпаковского (до этого за границей и в России были опробованы лишь отдельные дуговые электрические лампы). В 1876 г. П. Н. Яблочков, построив дуговой источник света — электрическую свечу,

открыл возможности широких практических применений электрической дуги. С этого времени гигантскими шагами двинулась вперед по пути неизмеримо быстрого прогресса вся электротехника.

В 80-х годах прошлого века трудами русских изобретателей Н. Н. Бенардоса и Н. Г. Славянова была решена проблема электрической дуговой сварки. В конце прошлого века практикой совершенно оформилась новая отрасль техники, основанная на использовании теплового действия дуги, а именно — электроплавка в дуговых печах.

Электрическая дуга, получившая так много полезных применений, представляет собой в ряде случаев неизбежное вредное явление, например в электрических аппаратах. Уместно здесь упомянуть, что трудами русского инженера М. О. Доливо-Добровольского было создано важное средство борьбы с дугой: искрогасительная решетка.

Современному электротехнику совершенно ясно, какой громадный вклад в науку и технику сделал В. В. Петров, открывший полтора столетия назад явление электрической дуги.

Литература

1. Philosophical Transactions, стр. 428, VIII, 1800; Gilb. Annalen, стр. 340, VI, 1800.
2. Н о р р е. Geschichte der Elektrizität, стр. 133, 1884, Вена.
3. Nicholson's Journal, стр. 179, IV, 1800; Gilb. Annalen, стр. 340, VI, 1800.
4. Parrot. Skizze einer Theorie der galvanischen Elektrizität und der durch sie bewirkten Wasserzersetzen. Gilb. Annalen, стр. 49, № 9, 1802.
- Parrot. Grundriss der theoretischen Physik, Riga—Dorpat—Leipzig, 1811 (раздел об электричестве).
5. Г р о т г у с с. Мемуар о разложении воды. Ostwalds Klassiker, № 152; Annales de Physique et de Chimie, стр. 54, LVIII, 1806.
6. Северный вестник. СПб, стр. 21, 1804. (Указано Я. А. Шнейбергом).
7. Известие о гальвани-вольтовых опытах, которые производил профессор физики Василий Петров посредством огромной наипаче батареи, состоявшей иногда из 4200 медных и цинковых кружков и находящейся при Санкт-Петербургской Медико-Хирургической Академии. СПб, 1803.
8. А. А. Елисеев. Василий Владимирович Петров, М., стр. 69, 1949.
9. С. И. Вавилов. Физический институт Академии наук за 220 лет. Успехи физич. наук, вып. I, XXVIII, стр. 21, 1946.
10. В. Н. Чиколев. История электрического освещения. Электричество, стр. 73 и 89, № 5 и 6, 1880.
11. A propos de l'histoire de l'arc électrique. La lumière électrique, стр. 248, IX, 1883.
12. The Electrician (London), стр. 491 и 596, XXXVI, 1896.
13. W. B. Czudnowsky, Das elektrische Bogenlicht. Leipzig, 1906.
14. Nicholson's Journal, стр. 150, № 10, 1800.
15. Priestley. The History and Present State of Electricity. London, стр. 598, 1767; Gilb. Annalen, стр. 468, № 12, 1802; Nicholson's Journal, стр. 198, 1802.
16. Gilb. Annalen, стр. 358, VI, 1800; Nicholson's Journal, стр. 179, 1800.
17. Philosophical Magazine, стр. 219, IX, 1801.
18. Gilb. Annalen, стр. 259, VII, 1801.
19. ibid., стр. 393.
20. ibid., стр. 370.
21. Nicholson's Journal, стр. 326, 1801.
22. Ritter. Physikalisch-Chemische Abhandlungen, стр. 263, II, 1806.
23. Gilb. Annalen, стр. 357, № 8, 1802.
24. ibid., стр. 361, XII, 1802; Quetelet, Fortschritte der Physik, стр. 714, 1850.

25. Gilb. Annalen, стр. 222, № 6, 1802.
 26. *ibid.*, стр. 396, XI, 1802.
 27. Journal of the Royal Institution, стр. 166, 1802. Nicholson's Journal, стр. 135, № 10, 1802; Gilb. Annalen, стр. 353, № 11, 1802; Annales de Chimie, Paris, стр. 206; AnXI, т. XLIV.
 28. La lumière électrique, стр. 248, IX, 1883.
 29. F. M. Feldhaus, Rühmesblätter der Technik. 2-е изд., т. 2, стр. 156, 1924.
 30. См. работы Бунцена (Gilb. Annalen, стр. 340, XIII, 1803). Пиписа (Monthly Mag., стр. 259, XV, 1803). Бруньятелли (Annali di Chimica, с. 143, XX, 1803; Gilb. Annalen, стр. 89, XVI, 1804) и др.

31. Thomas Martin. Faraday's Discovery. London, стр. 19, 1949.
 32. Herta Ayrton, The electric arc. London, стр. 24, 1902.
 33. Monthly Magazine, стр. 67, XXX, 1810.
 34. G. Tovey. A forgotten Electrician. Science Progress, стр. 287, XXXI, № 122, 1934.

*Заслуженный деятель науки и техники,
 доктор техн. наук, проф. Л. Д. БЕЛЬКИНД
 Московский энергетический институт
 и.м. Молотова*



Электропередача Каширская грэс — Москва

(К 30-летию постройки линии)

С первых дней после победы Великой Октябрьской социалистической революции Советское правительство обращало большое внимание на электроснабжение г. Москвы. 16 декабря 1917 г. декретом Совнаркома за подписью В. И. Ленина было национализировано «Электрическое общество 1886 г.», которому принадлежали Московская электрическая станция и городская кабельная сеть, 15 февраля 1918 г. была национализирована электростанция «Электропередача», энергия которой передавалась по линии 70 000 в в сеть города Москвы. 22 и 26 апреля того же года Совнарком обсудил вопрос об электроснабжении Москвы и Центрального промышленного района и принял принципиальное решение: положить в основу электроснабжения строительство станций на местном топливе — на подмосковном угле и торфе.

Гор. Кашира, находящийся вблизи Москвы и занимающий центральное положение по отношению к промышленному району (к Коломне, Подольску, Серпухову, Озерам), представлял выгодный пункт для сооружения электростанции; наличие большой реки и вилки из двух дорог — Уральской ж.-д. линии и линии Тула — Венев подкрепляли выбор каширского варианта размещения электростанции. Было решено строить станцию на правом берегу Оки в 6 км ниже города Каширы и 1 марта 1919 г. была выбрана строительная площадка для станции и поселка.

Проект предусматривал строительство станции мощностью в 30 000 квт с последующим расширением до 100 000 квт. Для линии передачи в Москву было выбрано

напряжение 110 кв. Эта линия была первой, построенной на это напряжение, ставшее впоследствии стандартным для сетей Советского Союза.

Основным оборудованием станции были два турбогенератора по 6 000 квт, 3 000 в, $\cos \varphi = 0,8$ и 6 котлов с цепными топками. Из них два — Бабкок и Вилькокс и 4 Гарбе по 450 м². Таким образом, общая мощность станции в 1 очереди равнялась 12 000 квт. Электрическая схема станции вместе с линией передачи показана на рисунке. На генераторном и приемных концах станции устанавливались трансформаторные группы из трех однофазных трансформаторов $3 \times 4 000$ кВа, 2 800/66 770 в. Потери в меди у одного трансформатора равнялись 48 квт, потери в стали — 38 квт, напряжение короткого замыкания — 7,8%.

Строителям Каширской грэс предстояло решить две важных технических проблемы: найти способ сжигания подмосковного угля и положить основы эксплуатации сетей 110 кв на деревянных опорах. Но самой трудной задачей представлялось осуществление строительства самой электростанции. Шел 1919 год. Молодая Советская республика была окружена со всех сторон белогвардейскими войсками и интервентами; была объявлена блокада России. В этих условиях постройка Каширской электростанции была признана Чрезвычайной комиссией по снабжению Красной Армии важнейшим средством обеспечения Москвы на отопительный сезон. Постановлением от 14 апреля 1919 г. Совет Труда и Обороны признал строительство Каширской электростанции работающим всецело на оборону страны.

Деникин еще не был разбит в решающих боях под Орлом и Воронежем, а по линии будущей электропередачи уже шла развозка столбов для опор, на строительной

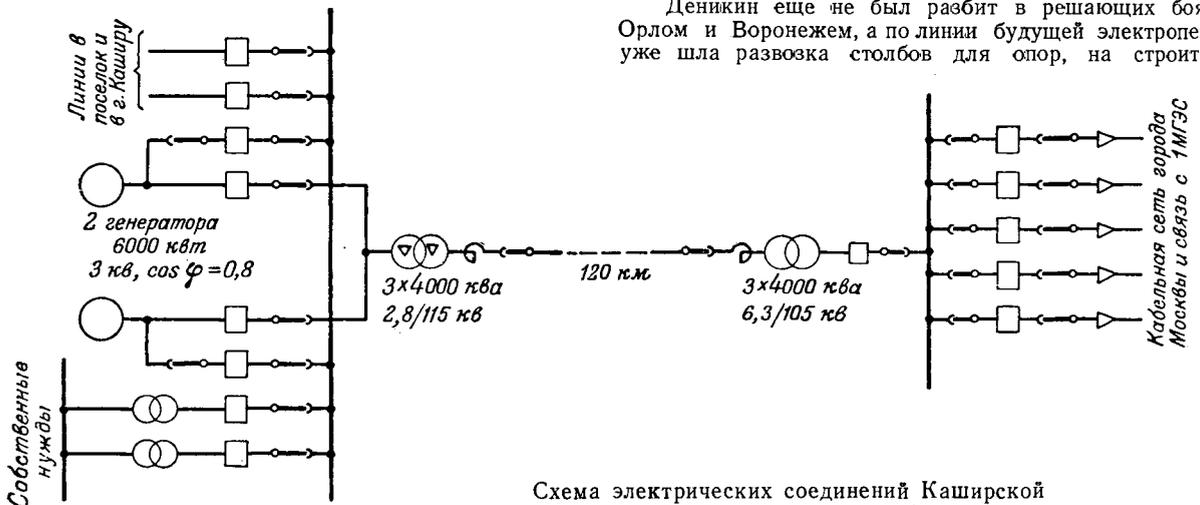


Схема электрических соединений Каширской грэс в первые годы ее работы.

площадке сооружались фундаменты станции и трубопровод для подвода охлаждающей воды. В тяжелых условиях строительство шло нарастающими темпами. В. И. Ленин уделял ему большое внимание в самой трудной обстановке. По требованию Владимира Ильича Управление электрических сооружений уже в июне 1919 г. докладывало ему о ходе строительства.

В. И. Ленин оказывал строительству непосредственную помощь на всех этапах сооружения станции и особенно на последнем этапе, при окончании станции. Осенью 1921 г., в пусковой период, эта помощь стала повседневной: так, после телефонограммы ВСНХ 22 августа 1921 г. о подготовке к принятию тока Каширской грэс через Кожуховскую подстанцию В. И. Ленин дает телефонограммы: 1 сентября — Наркомпути о продвижении грузов Каширстроя, 2 сентября — Мосстрану о том же, 9 сентября — Моссовету о помещении, 12 сентября — ВСНХ о материалах для Каширстроя, 12 сентября — о снабжении хлебом и фуражом, 23 сентября — Рабкрину о волокните с продовольствием, 27 сентября — об отпуске 5 000 пудов овса, 27 сентября — о снабжении коксом, 28 сентября — Подольскому заводу о выполнении заказов, 29 сентября — командирует на Каширу техников, 29 сентября — направляет агронома, 30 сентября — обязывает Наркомпрод отпустить продукты, 30 сентября — Главлупу об обеспечении коксом и т. д.

Трудности велики, о положении строительства В. И. Ленин докладывает IX Всероссийскому Съезду Советов в отчете ВЦИК и СНК 23 декабря 1921 г. В этот же день было вынесено постановление о дополнительном отпуске 8 миллиардов рублей Каширской грэс.

В Москву электроэнергия Каширской электростанции начала поступать 22 июня 1922 г.

В 1922 г. началась подготовка к строительству второй очереди Каширской грэс, а в 1932 г. вступила в строй и третья очередь. За 10 лет мощность станции больше чем в два раза превзошла предельную цифру в 100 000 квт, которая строителям первой очереди казалась чем-то близким к мечте.

В работе электрической части станции и первой линии передачи 110 кв на деревянных опорах было много поучительного. Этот опыт в некотором отношении не потерял интереса и до настоящего времени.

Первая очередь станции работала по схеме, приведенной на рис. 1, в продолжении 5 лет. За это время трансформаторы работали без выключателей на стороне 110 кв. Ни разу отсутствие этих выключателей не сказалось отрицательно на работе станции и не вызвало аварий или развития аварий. Изменить схему пришлось только после того, как на станции появились другие линии 110 кв и пришлось соорудить сборные шины 110 кв. Опыт такой работы поучителен до сих пор для тех, кто даже в менее ответственных установках настаивает на выключателях в первичной обмотке трансформаторов 110 кв в тех случаях, когда имеется один трансформатор и одна линия. Сокращение числа выключателей 110 кв является одним из важных путей к снижению стоимости строительства и повышению надежности эксплуатации.

Многое из опыта строительства и эксплуатации Каширской грэс уже вошло в практику или послужило началом ее развития. Так, первые соединения между генераторами и трансформатором 110 кв было осуществлено голыми шинами. В то время это решение считалось вынужденным, несвоевременным. Кабельные связи представлялись более надежными (см. Электричество 2, 1922 г. статья Р. А. Фермана). Опыт подтвердил надежность и удобство эксплуатации соединений голыми шинами и этот метод широко применяется на современных станциях.

При сушке трансформаторов 110 кв была сделана попытка сушить масловарками при повышенной температуре до 120°. После сушки первой же фазы оказалось испорченным не только масло, но потемнела и изоляция обмотки. Эта фаза была оставлена в резерве и никогда больше не вводилась в работу. Сравнение ее изоляции с изоляцией трех других трансформаторов после 20 лет работы показало, что изоляция последних пострадала за этот период менее, чем у резервной фазы за 10 дней сушки при повышенной температуре. Недавно трансформаторы, проработавшие свыше 25 лет, были сданы в лом с далеко непопулярностью изношенной изоляцией, вследствие их устарелости по конструкции (бодяное охлаждение с змеевиком в кожухе) и по параметрам (уровню изоляции, потерям мощ-

ности). Работа и состояние трансформаторов полностью подтверждает теорию старения изоляции, на основе которой разработана методика повышения нагрузочной способности трансформаторов. Опыт сушки и работы трансформаторов Каширской грэс повлиял на выработку современных методов эксплуатации и был учтен при составлении существующих инструкций.

На Каширской грэс было положено начало ряду мероприятий по улучшению эксплуатации двигателей собственных нужд. В частности, здесь впервые в практике наших электростанций защита минимального напряжения мощных двигателей с фазным ротором была дана с уставкой по времени в 10 сек, что обеспечило оставление в работе насосов водоснабжения станции при коротких замыканиях. Позднее самозапуск двигателей после отключения коротких замыканий получил общее признание и распространение, как одно из мероприятий решительного повышения надежности собственных нужд.

Линия 110 кв, постройка которой была начата в 1919 г., до сих пор находится в эксплуатации. Длина ее составляет 120 км. Деревянные опоры линии построены из леса, имевшегося в то время под руками и заготовленного еще до революции. Длина столбов была 11 м, диаметр в отрубе 22 см. Опоры закапывались в землю без пасынков, на глубину 2 м. Расстояние между опорами составляло 100 м, на один километр предусматривалась одна анкерная опора.

На линии был подвешен медный провод сечением 70 мм². Расстояние между фазами составляло 3 м, высота подвеса — 7,58 м, габарит нижней точки провода в пролете — 6 м. Число транспозиций на всю длину линии равно двум.

При проектировании число изоляторов в гирлянде предполагалось равным 7, но при исполнении было уменьшено до 6. Коэффициент запаса изоляции на этой линии, при ее работе в первые годы эксплуатации с незаземленной нейтралью, составлял на сухой разряд 3,31, на мокрый — 2,48.

Линия рассчитывалась на нормальную нагрузку 20—25 000 квт при $\cos \varphi = 0,8$ при потерях энергии около 8% (включая трансформаторы). Максимальная нагрузка определялась в 37 000 квт. Если по этим данным определить экономическую плотность тока, соответствующую средней нагрузке, принимаемой в то время за наилучшую, то получится около 1,6 а/мм². В то время число часов использования максимума в 5 000 час считалось наиболее соответствующим условиям работы районной станции. По нашим нормам экономическая плотность тока при 5 000 час использования максимума лежит между 1,75 и 1,25 а/мм², что близко подходит к цифрам, принятым для линии Кашира—Москва.

Каширская линия широко использовалась для изучения мероприятий по повышению грозоупорности линий. Так, на ней получен опыт защиты тросом проводов к подстанциям; отдельные участки линии защищались одним или двумя тросами, подвешенными на разной высоте и различных сопротивлений заземлений и результаты эксплуатации сравнивались с данными остальных, защищенных участков. Была сделана попытка работать с компенсирующей катушкой. Однако в 1927 г. пришлось перейти на работу с наглухо заземленной нейтралью, так как Каширская линия была соединена с Шатурской, на которой заземление нейтрали являлось обязательным условием из-за конструкции изоляции ее трансформаторов.

С 1925 г. на линии начал проводиться систематический контроль изоляторов при помощи штанги. Методика и результаты контроля довольно тщательно изучались (см., например, Электрические станции, № 1, 1930 г., А. Н. Сементовский). Через 5 лет оказались негодными 0,33% всех изоляторов, через 7 лет работы процент снятых изоляторов составил менее 1%.

Так как для сооружения линии был применен лежалый, непропитанный лес, то через 2—3 года работы потребовался ремонт линии путем установки столбов на пасынки. В связи с этим на кожуховской подстанции были проведены специальные испытания новой конструкции опоры (см. Электричество, № 5, 1926, Н. И. Сушкин). Эти испытания послужили основанием для составления норм механического расчета линий на деревянных опорах.

На опыте работы этой линии наши электротехники встретились с новыми явлениями. Так, попытка поднять линию с нуля поставила персонал электростанции перед не-

понятным ему явлением — самовозбуждением генератора 6 000 *квт*, несмотря на разомкнутую цепь возбуждения. Зарядная емкость линии порядка 3 750 *квд* возбудила генератор и подняла напряжение на приемном конце значительно выше нормального. В первый год эксплуатации при обрыве провода линии и его замыкании произошло опрокидывание фаз, вследствие чего все двигатели станции стали вращаться в обратном направлении. При возгорании опоры 110 *кв* пожарная команда ближайшего дачного поселка погасила пожар водой. Так как горела траверса, то струя воды обливала провод и гирлянду, находившуюся под напряжением. К удивлению электротехнического персонала, никто из пожарных при этом не пострадал. Изучение причин такого странного для того времени случая послужило исходным пунктом для разработки метода чистки изоляции под напряжением струей воды.

Через два года после начала работы линии 110 *кв* к ней присоединили на глухой отпайке Подольскую подстанцию. Длина отпайки равнялась 4 *км*. В месте отпайки был установлен разъединитель, но обслуживающий его персонал жил в 4 *км* и на отключение разъединителя вы-

езжал верхом. Такая схема эксплуатировалась много лет и практически не сказалась на надежности электроснабжения ни Москвы, ни Подольска. Этот опыт подкрепляет взгляд на глухие ответвления, как на правильный метод питания глубоких вводов при распределении энергии на основном напряжении электрической системы.

Каширская электростанция долго служила образцом организации подготовки специальных кадров, образцом высокой культуры эксплуатации. Эта электростанция многие годы занимала первое место среди всех электростанций Советского Союза.

Трудовая доблесть и героизм остались в традициях Каширской электростанции с первых лет ее сооружения. Станция бесперебойно работала под налетами вражеских бомбардировщиков в первый период Великой Отечественной войны. В дальнейшем после реэвакуации станции ее персонал в короткий срок (4—6 месяцев) вновь смонтировал станцию и пустил ее в эксплуатацию без неполадок.

Проф. П. Г. ГРУДИНСКИЙ



Дискуссии

К статье Н. Н. Крачковского „Некоторые вопросы схем коммутации высоковольтных сетей“

(Электричество, № 7, 1951)

Инж. Я. С. ШНЕЙДМАН
Уралгипрошахт

Широко распространенная в настоящее время так называемая «европейская» схема коммутации подстанций при двух системах шин, несомненно, обладает существенными техническими недостатками как отмеченными в статье Н. Н. Крачковского, так и другими, к числу которых относятся, например, невозможность вывести из схемы выключатель без перерыва в работе присоединенного элемента. Кроме того, эта схема крайне неэкономична. Чем скорее будет пробита брешь в тяготении наших проектировщиков к привычной, но устаревшей «европейской» схеме коммутации, тем скорее мы начнем строить более совершенные и экономичные подстанции ответственного назначения. Поэтому постановка вопроса о необходимости разработки и внедрения новых схем правильна и своевременна.

Нельзя, однако, целиком согласиться с предлагаемыми И. Н. Крачковским решениями.

Противопоставляя схему коммутации сети рис. 6 схеме рис. 3, И. Н. Крачковский приходит к выводу, что при значительно меньшем числе выключателей первая надежнее второй¹. Между тем это неправильно.

Наличие в схеме (рис. 3) выключателей на вводах линий предопределяет то обстоятельство, что при плановом или вынужденном (автоматическом) выходе любого участка сети между двумя смежными подстанциями каждая из этих подстанций продолжает питаться по «полуторной» схеме, т. е. с одной стороны по двум связям, с другой — по одной. В схеме же рис. 6 ввиду отсутствия секционирующих выключателей повреждение в любом месте одной из питающих линий приводит к переходу всей сети на питание по одной цепи, поскольку поврежденная линия выключается со стороны генерирующих пунктов. Следует отметить, что при работе сети на предельном режиме или близком к нему выключение одной линии приведет к ограничению передаваемой мощности, чего нет в схеме рис. 3. Установка секционирующих выключателей в одном каком-либо месте сети, как это предлагает Н. Н. Крачковский, является частичным решением и не может считаться приемлемым во всех случаях.

Таким образом, мы приходим к необходимости установки секционирующих выключателей за каждой подстан-

цией независимо от ее места в сети и сложности схем коммутации.

Схема коммутации подстанции (рис. 6) с добавлением двух секционирующих выключателей является типичной схемой замкнутого кольца или многоугольника. Такие схемы со всеми их достоинствами и недостатками хорошо известны нашим электротехникам. Их достоинства по сравнению со схемой с двумя системами шин при одном выключателе на присоединении заключаются в следующем:

- во всех случаях, при любом числе присоединенных элементов экономится один выключатель (ячейка);
- обеспечивается возможность ремонта выключателей без перерыва питания присоединенных элементов;
- повреждение на любой из секций главных шин приводит к отключению только этой секции и присоединенных к ней элементов;
- почти полностью исключаются ошибочные действия персонала при операциях с разъединителями и крайне упрощается их блокировка или даже отпадает необходимость в блокировке;
- поскольку каждый присоединенный элемент огражден от соседнего двумя выключателями, такие схемы приближаются по степени надежности к схемам с двумя выключателями на присоединении.

Наряду с этим следует отметить, что при схеме многоугольника значительно усложняются релейная защита и конструктивное выполнение.

И. Н. Крачковским рассматриваются только схемы с двумя силовыми трансформаторами на подстанции. Однако нередки случаи, когда на одной подстанции устанавливается большее число трансформаторов различного назначения (трансформаторы для силовой нагрузки, трансформаторы для питания мощных ртутных выпрямителей и т. п.). При четырех, пяти и более трансформаторах предлагаемые схемы или, вообще говоря, схемы многоугольника не имеют существенных преимуществ перед «европейской» схемой в отношении числа требуемых выключателей.

Предлагаемая Н. Н. Крачковским для подстанции *V* упрощенная схема «мостика» с тремя выключателями вряд ли может считаться нормальной. Недостатки и ограниченное применение этой схемы общеизвестны; к тому же это «мостик» не совсем обычного типа, поскольку каждый трансформатор включен отпайкой к одной из линий при выключенной перемычке. В связи с этой схемой необходимо отметить неправильные положения, высказанные И. Н. Крачковским.

¹ Нумерация рисунков соответствует принятой в статье Н. Н. Крачковского.

Инж. Ф. П. ЛЕВИН

Сибэлектромонтаж МСПТИ

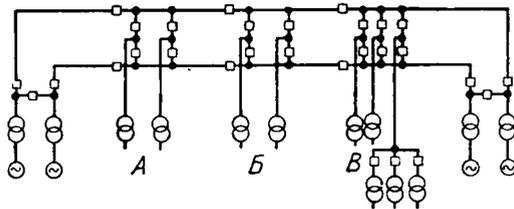


Рис. 1.

Повреждение на одной из линий не приведет к выключению соответствующего выключателя и поэтому не будет импульса на включение перемычки. Такой импульс можно получить от специального устройства, например от реле минимального напряжения. Но прежде чем включить перемычку, следует отключить линейный выключатель хотя бы от того же импульса минимального напряжения. С другой стороны, применение на линейных выключателях защиты минимального напряжения с уставкой $0,7 U_{ном}$ может в некоторых случаях (глубокая посадка напряжения в сети из-за близких коротких замыканий) привести к ложному отключению трансформатора подстанции.

Учитывая, что схема коммутации, приведенная на рис. 6 статьи Н. Н. Крачковского, имеет серьезные преимущества по сравнению с обычной «европейской», схемой с двумя системами шин, нам представляется целесообразным предложить следующее:

1. Для сети с двухцепными или двойными линиями электропередачи основной схемой присоединения отдельных подстанций к сети и схемой коммутации самих подстанций должна быть схема, представленная на рис. 1. Здесь, как и в схеме рис. 6 статьи Н. Н. Крачковского, каждый трансформатор присоединен к перемычке между двумя выключателями, связывающими обе цепи линии электропередачи. Кроме того, введено секционирование посредством выключателей на каждом участке линий между соседними подстанциями. Надежность электроснабжения при такой схеме не ниже, чем при «европейской», но зато она экономичнее и имеет ряд достоинств, отмеченных выше.

2. Если надежность электроснабжения может быть несколько понижена, следует применять схему с тремя выключателями на подстанции (при двух силовых трансфор-

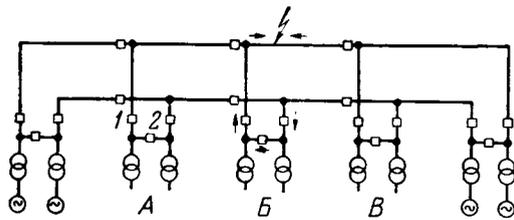


Рис. 2.

маторах) и секционирующими выключателями, число которых определяется в каждом отдельном случае (рис. 2). Выключатель перемычки нормально может быть замкнут, на нем оборудуется релейная защита от внутренних повреждений и замыканий на стороне высокого напряжения трансформаторов. На линейных выключателях 1 и 2 оборудуется защита, обеспечивающая необходимую избирательность при повреждениях на линиях, например токовая направленная защита. Из рис. 2 нетрудно видеть, что такая сравнительно простая защита будет действовать избирательно, отключая только поврежденную линию.

3. На рис. 1 приведен также случай установки на одной из подстанций ряда трансформаторов другого назначения (например, тяговых). Эти трансформаторы выделяются в отдельную группу, которая присоединяется к обеим линиям через пару выключателей; кроме того, каждый трансформатор снабжается своим выключателем. В отдельных случаях групповые выключатели могут не устанавливаться.

В заключение следует еще раз подчеркнуть актуальность дальнейших исследований с целью получения наилучших схем коммутации сетей и отдельных подстанций.

Предложенные Н. Н. Крачковским схемы не являются новыми, но некоторые детали их могут оказаться полезными при проектировании промышленных сетей и подстанций 35...110 кв.

Дать общие решения для разнообразных случаев проектирования сетей 35... 110 кв можно лишь при условии рационального планирования территориального размещения промышленных предприятий и опорных пунктов сетей 35...110 кв, питающих понижающие промышленные подстанции.

От высоковольтных сетей 35...110 кв основных промышленных потребителей часто питаются различные потребители подсобного характера, не имеющие прямого отношения к основным производствам. Время ввода в эксплуатацию этих подсобных потребителей не только трудно установить, но и невозможно предвидеть их появления. Поэтому на практике сети строятся таким образом, чтобы можно было обеспечить развитие сетей района или узла и включение непредвиденных потребителей.

Н. Н. Крачковский не подверг анализу предложенные им схемы с точки зрения возможности роста и развития сетей. Мы склонны считать, что эти схемы являются весьма жесткими и не обеспечивают развития сетей и возможности включения новых потребителей.

Следует заметить, что понижающие подстанции 35... 110 кв сооружаются в промышленных центрах и узлах, где обычно имеются нагрузки всех категорий. Предприятия же, нередко крупные, с нагрузками третьей категории получают в большинстве случаев питание от местных сетей. Поэтому предложенные Н. Н. Крачковским схемы являются весьма условными.

В современной практике проектирования стремятся скомбинировать схемы из простой, недорогой, но надежной и недефицитной аппаратуры. Этим обеспечивается снижение стоимости строительства и исключаются случаи задержки ввода в эксплуатацию электроустановок. Схемы должны быть просты и удовлетворять требованиям бесперебойности электроснабжения и удобства эксплуатации и ремонта. Техническая оснащенность одинаковых по важности элементов и узлов должна быть равноценна и равнонадежна. В общем комплексе не должно быть слабых мест, равно как и преувеличенной надежности и излишнего резервирования. С этой точки зрения целесообразность осуществления сборных шин подстанций в виде части линий электропередачи является спорной.

Аварии в механической части открытых подстанций случаются чаще, чем на линиях (ослабление зажимов ошиневок и болтовых соединений у аппаратов, обрыв и схождение спусков к аппаратам и т. п.). При схемах, предлагаемых Н. Н. Крачковским (рис. 5 и 6 его статьи), при двукратной связи обеих цепей в пределах подстанции имеется вероятность перехода аварии с одной цепи на другую, в результате чего выйдут из работы 1...2 подстанции.

В современной практике проектирования в целях осуществления ремонта под напряжением подстанции удаляют от линий на необходимое расстояние, избегая, по возможности, двойной системы шин, которая в подавляющем большинстве случаев для промышленных подстанций 35...110 кв не нужна.

При схемах рис. 5 и 6, когда один или два важных элемента сети или подстанции находятся в профилактическом испытании или планово-предупредительном ремонте, можно ожидать, что во время аварийного режима электроснабжения от некоторых подстанций нарушится или прекратится полностью. Кроме того, при этих схемах будет очень трудно осуществить глубокие вводы 35...110 кв на площадки промышленных предприятий. Вынесение же подстанций за пределы промышленных площадок, как известно, связано с излишними потерями электроэнергии и добавочными затратами средств и цветных металлов.

Предложенные Н. Н. Крачковским схемы не иллюстрированы эскизами конструкций подстанций. Наиболее сложными конструкциями будут при схемах рис. 5 и 6. Попытки сконструировать подстанции открытого типа по этим схемам встречали большие затруднения вследствие необходимости предусмотреть ремонт подходов и подстанций под напряжением.

При наличии обслуживающего персонала на стороне 3, 6 и 10 кВ понижающих подстанций применение телеуправления в высоковольтных сетях несистемного назначения является сомнительным. Операции с аппаратами должны осуществляться на самой подстанции вручную или со щита. На крупных промышленных предприятиях с большим электротехническим хозяйством управление всеми электроустановками целесообразно осуществлять с местного диспетчерского пункта, с применением во многих случаях автоматики и телеуправления.

Наличие на промышленных предприятиях диспетчерских пунктов с телеуправлением, связанных с центральными диспетчерскими пунктами сетей 35...110 кВ, позволяет осуществить стройную систему управления всего сетевого узла в целом.

Однако новые технические решения должны быть оправданы экономически. Поэтому системы телеуправления и диспетчеризации не следует обременять большим количеством аппаратуры и электрических цепей. С этой точки зрения схемы, предложенные Н. Н. Крачковским (рис. 5 и 6), не являются удовлетворительными.

В этих схемах в связи с применением телеуправления

разъединители на подстанциях не устанавливаются. Практически такое решение приводит к тому, что для ремонта выключателей, установленных на подстанциях, приходится выключать 2...4 выключателя в разных частях сети, для чего требуется соответствующая аппаратура и электрические цепи. Если учесть, что ремонт выключателей производится не часто, указанное решение будет явно нецелесообразно с экономической точки зрения.

Таким образом, в ряде случаев от установки разъединителей отказываться невыгодно. В тех случаях, когда включение или выключение блока разъединитель-выключатель, установленного на подстанции, имеет значение для всей сети или для какого-либо ответственного участка ее, операция целесообразнее производить с диспетчерского пункта подстанции с разрешения центрального диспетчерского пункта.

Наиболее приемлемой является схема, представленная в варианте рис. 6 статьи Н. Н. Крачковского, но с разъединителями. Ее широко применяют на подстанциях с промышленными нагрузками I и II категорий при условии, если каждый трансформатор может покрыть 60...70% всей нагрузки подстанции.



Заметки и письма

К СТАТЬЕ О. М. БОГАТЫРЕВА „ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВЫСОКОЙ СТЕПЕНИ“

(Электричество, № 8, 1951)

Автор статьи предложил элементарную формулу для вычисления коэффициентов при экспонентах, входящих в решение линейного однородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами, удовлетворяющего данным начальным условиям. Судя по разобранному ниже примеру, О. М. Богатырев не заметил, что применение его окончательной формулы (13) значительно упрощается, если использовать общеизвестные формулы для простейших симметричных функций корней алгебраического уравнения. Эти формулы в обозначениях автора дают:

$$\begin{aligned} \sum_1^5 p &= -d_5 - p_6; \\ \sum_1^5 pp &= d_4 - p_6 \sum_1^5 p; \\ \sum_1^5 ppp &= -d_3 - p_6 \sum_1^5 pp; \\ \sum_1^5 pppp &= d_2 - p_6 \sum_1^5 ppp; \\ \sum_1^5 ppppp &= -d_1 - p_6 \sum_1^5 pppp = \frac{d_0}{p_6} \end{aligned}$$

(последнее равенство справедливо, если $p_6 \neq 0$).

Эти равенства дают возможность непосредственно находить одну за другой искомые суммы, а последняя формула может быть использована для проверки вычислений.

Так, в примере автора получим:

$$\sum p = -219,2 + 1,98 = -217,2;$$

$$\sum pp = 4\,491 - 1,98 \cdot 217,2 = 4\,061;$$

$$\sum ppp = -41,56 \cdot 10^3 + 1,98 \cdot 4\,061 = -33,52 \cdot 10^3;$$

$$\sum pppp = 159,4 \cdot 10^3 - 1,98 \cdot 33,52 \cdot 10^3 = 93,0 \cdot 10^3;$$

$$\sum ppppp = -399,8 \cdot 10^3 + 1,98 \cdot 93,0 \cdot 10^3 = -216 \cdot 10^3.$$

Проверка:

$$p_6 \sum ppppp = 1,98 \cdot 216 \cdot 10^3 = 428 \cdot 10^3 \approx 428,5 \cdot 10^3 = d_0,$$

т. е. совпадение полное. Отметим, кстати, что в указанной заметке вычисления не удовлетворяют требованиям правил приближенных вычислений и загромождены большим количеством излишних и неверных цифр, дающих иллюзию точности.

Это замечание относится, конечно, к уравнениям любого порядка.

Доктор физ.-матем. наук, доц. А. Д. МЫШКИС
Латвийский государственный университет

ОТВЕТ АВТОРА

А. Д. Мышкис совершенно справедливо отмечает, что техника вычислений по моим формулам значительно упрощается при использовании известных из высшей алгебры соотношений, приведенных им выше.

Таким образом, можно утверждать, что простейшим методом определения постоянных интегрирования является вычисление их по выведенным в моей статье формулам с применением техники вычисления входящих в них сумм корней, указанной А. Д. Мышкисом.

Указания же об излишних и неверных цифрах в приведенных в статье числовых операциях, якобы создающих „иллюзию точности“, нельзя считать справедливыми, учитывая сделанную мною в конце статьи ссылку на то, что подсчеты производились с помощью логарифмической линейки. Этого было достаточно, чтобы не создавать подобной иллюзии. Дело в том, что эти лишние знаки были взяты непосредственно со счетов, на которых производились операции суммирования. Вполне естественно, что при последующем перемножении на счетной линейке эти знаки никакой роли не играли.

О. М. БОГАТЫРЕВ



ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Все инженерные устройства 27-этажного здания в связи с большой высотой его (115 м, а с башней и венчающим ее шпилем 171 м) разбиты по вертикали на самостоятельные зоны. Магистральные разводки коммуникационных устройств, трансформаторные подстанции, баки водоснабжения и другое оборудование размещены в технических этажах. Проект электрооборудования здания разработан коллективом проектно-конструкторского управления треста «Центроэлектромонтаж» Минтяжстроя. Этот же трест производил монтажные работы по устройству электрических сетей и установке электротехнического оборудования.

Общая мощность агрегатов, обслуживающих санитарно-технические системы — отопление, вентиляция, водоснабжение, пылеудаление, — превышает 1400 квт, а протяженность труб различных диаметров составляет около 80 км. Для снабжения электрической энергией смонтировано 11 трансформаторных подстанций, где установлены специальные сухие трансформаторы с естественным охлаждением, изготовление которых является большой победой советского машиностроения. Расположение трансформаторов по техническим этажам и приближение их таким образом к узлам внутренней сети резко снизило потери энергии, уменьшило сечение и длину проводов и улучшило режим регулирования напряжения. Доставка высоковольтных комплектов распределительных устройств и трансформаторных подстанций в собранном виде со всей необходимой аппаратурой и внутренними соединениями значительно облегчили монтаж этого электротехнического оборудования. Подходящие к трансформаторным подстанциям кабели высокого напряжения от центральных распределительных пунктов проложены в глухих вертикальных блоках, идущих снизу доверху.

Общая протяженность электрических сетей в административном здании превышает 100 км, причем 85 км из них осветительные.

Электрические провода проложены в стальных трубах, находящихся в перекрытиях. В местах присоединения внутреннего электрооборудования (светильники, выключатели и штепсельные розетки) концы труб выпускались из перекрытий и заделывались в толще перегородок и, таким образом, исключалась пробивка отверстий. Заделка концов труб производится в стальные коробки, которые используются также для крепления светильников. Всего смонтировано 18 000 закладных стальных коробок и 14 500 штепсельных розеток и выключателей новой конструкции.

Групповые щитки новой конструкции с применением вместо предохранителей малогабаритных автоматических выключателей, снабженных тепловым реле, смонтированы на каждом этаже для защиты и управления осветительными установками. В случае перегрузки или короткого замыкания проводов автомат отключает установку. Последующее включение автомата не связано с заменой каких-либо элементов. Такие же автоматы применяются в осветительных установках вестибюлей, лестниц и других помещений общего пользования, что значительно повышает надежность эксплуатации и облегчает работу обслуживающего персонала.

В цокольном этаже здания установлен центральный пульт автоматического контроля и диспетчерского управления всеми санитарно-техническими и энергетическими устройствами здания. Оператор-диспетчер может контролировать и управлять работой любой установки независимо от места ее расположения.

(Городское хозяйство Москвы, № 12, 1951, А. Г. Погосов и Л. М. Гинабург).

ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ПИТАНИЕ УСТАНОВОК ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА

Установки индукционного нагрева имеют большое применение в промышленности СССР. В основном каждая такая установка снабжается электрической энергией от

своего собственного высокочастотного генератора. Однако опыт показывает, что эта система имеет крупные недостатки: 1) низкий коэффициент использования генератора и связанная с этим малая его производительность; 2) завышенные удельные капиталовложения; 3) значительный перерасход электрической энергии. Например, на Московском автозаводе им. Сталина коэффициент использования генератора по времени за смену при двухпозиционном станке равен 0,25...0,35.

Централизованное питание установок высокочастотного нагрева устраняет эти недостатки. Впервые оно было применено для поверхностной закалки в производственных условиях еще в 1941 г. на Московском автозаводе им. Сталина. В настоящее время вопрос этот настолько ясен, что Научно-технический совет Министерства автомобильной и тракторной промышленности СССР рекомендовал применение централизованного питания установок нагрева токами высокой частоты на всех заводах министерства, так как использование этой системы имеет большие экономические преимущества.

Система централизованного питания установок высокочастотного нагрева может быть выполнена по двум схемам: 1) с блокировкой станков по времени и 2) с блокировкой станков по мощности.

Для успешного пользования схемой по первому варианту (рис. 1) необходимо, чтобы: 1) мощность генераторной подстанции обеспечивала одновременно питание одного нагревательного станка и 2) сумма времени рабочих смен генераторной подстанции с учетом коэффициента использования генератора (0,8...0,9) была больше или равна суммарному времени нагрева деталей, обрабатываемых за сутки на всех станках. В обычную схему автоматического управления каждого нагревательного станка добавляется

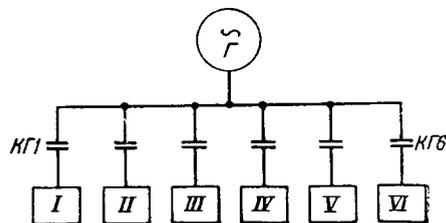


Рис. 1.

реле ожидания. Опыт показывает, что в данной схеме централизованного питания целесообразно иметь от 6 до 12 станков и ее эффективно можно использовать, когда продолжительность нагрева не превышает 10...15 сек. Основная область применения данной схемы — поверхностная закалка деталей на частотах 2 000...10 000 гц.

Схема централизованного питания с блокировкой станков по мощности (рис. 2) характеризуется также дву-

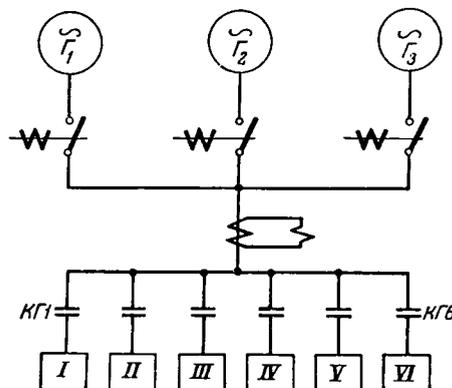


Рис. 2.

мя условиями: 1) мощность генераторной подстанции должна обеспечивать одновременное питание нескольких нагревательных станков и 2) сумма энергии, отбираемой всеми станками за рабочие смены суток, не должна превышать максимальной энергии, которую способен отдать генераторный блок с учетом степени использования генератора по мощности. В этой схеме включено максимальное реле с высоким коэффициентом возврата, которое, срабатывая, запрещает дальнейшее подключение нагревательных станков, как только нагрузка генераторной подстанции достигла своей номинальной величины. Реле ожидания каждого станка автоматически подключают их к генератору по мере того, как позволяет его мощность.

В том случае, когда по условиям эксплуатации общая мощность установки будет выше 500 кВт целесообразно включать на параллельную работу несколько однотипных высокочастотных генераторов. Особое внимание в схеме централизованного питания с блокировкой станков по мощности обращается на поддержание постоянства напряжения, для чего применяются схемы с электромашинными усилителями. Основные области использования данной схемы: 1) сквозной нагрев под штамповку с использованием нагревателей как методического, так и периодического действия; 2) нагрев под поверхностную закалку, если в цехе имеется значительное количество закалочных постов (8...10), работающих одновременно; 3) нагрев под пайку при обслуживании одним генератором нескольких станков.

Передача электрической энергии при частоте 1000...10 000 гц на расстояние 100...150 м может осуществляться кабельными или шинными линиями. Однако опыт показывает преимущество кабельных линий в смысле удобства эксплуатации и дешевизны при условии обеспечения высокого к. п. д. передачи путем соответствующего выбора параметров генератора и кабеля.

При централизованном питании установок высокочастотного нагрева с линиями передач длиной в 100...150 м рекомендуется применять генераторы с напряжением 600...800 в.

(Автомобильная и тракторная промышленность, № 8, 1951, К. З. Шепеляковский).

ОТЖИГ РЕЗЬБОВЫХ КОНЦОВ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

На Московском заводе малолитражных автомобилей разработана технология отжига резьбы токами высокой частоты, которая позволила: снизить трудоемкость операции в 2 раза, исключить дополнительную операцию — зачистку резьбовых концов крацевальными щетками после отжига в свинце, получать стабильные результаты благодаря автоматизации процесса и не применять свинец как технологический материал.

Для нагрева токами высокой частоты применяется генератор 139 кВт, 440 в, 125 а, 8000 гц. Несмотря на малую удельную мощность, обеспечивался сквозной прогрев резьбового конца.

Информация снабжена таблицами с данными электрического и технологического режимов отжига, а также результатами механических испытаний деталей.

(Автомобильная и тракторная промышленность, № 1, 1952, П. П. Чекмарева и В. Б. Фридман).

ЗА РУБЕЖОМ

МГНОВЕННОЕ ЗАЖИГАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Повышение светоотдачи, лучшее светораспределение и возможность изменения цветности излучения являются преимуществами люминесцентных ламп по сравнению с лампами накаливания. Поэтому люминесцентные лампы нашли широкое применение, несмотря на относительно более высокую стоимость.

Обычно схемы включения ламп состоят из индуктивного сопротивления, включенного последовательно с лампой, и зажигающего лампы. Включением емкости в цепь лампы достигается повышение $\cos \varphi$

Такие схемы при эксплуатации в больших осветительных установках оказываются малоудобными, в частности, из-за неодновременности зажигания всех ламп. Это вызвало необходимость перехода к схемам мгновенного или быстрого зажигания.

Схемы мгновенного зажигания. Первые схемы такого рода были предназначены для ламп мощностью 40 вт. Это были схемы или резонансного типа, или с трансформаторами, вторичное напряжение которых достаточно для зажигания лампы без предварительного накала катодов. Параллельно с этим появилась необходимость в разработке нового типа катодов, способных выдерживать повышенное напряжение зажигания, примерно в 4,5 раза больше рабочего напряжения на лампе.

На рис. 1 показана схема мгновенного зажигания двух параллельно включенных ламп. Эта схема обеспечивает повышенный $\cos \varphi$ трансформатора с сетевой стороны из-за наличия емкости в цепи одной из ламп. Несмотря на преимущества зажигания, такая схема приводит к значительному увеличению веса, размеров и стоимости включающего устройства, а также потерь по сравнению со схемами, содержащими зажигающие.

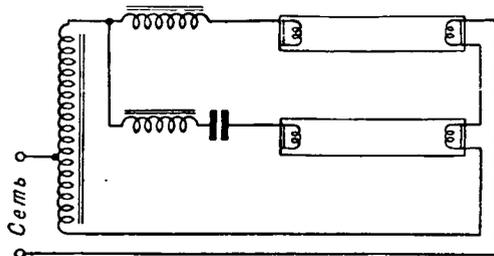


Рис. 1. Схема параллельного включения ламп с мгновенным зажиганием.

Для снижения потерь, веса и расхода материалов было сконструировано новое включающее устройство последовательного зажигания (рис. 2). Эта схема последовательного включения ламп обладает теми же преимуществами, что и схема параллельного включения. Нормально для зажигания двух последовательно включенных ламп требуется почти вдвое большее напряжение, чем при параллельном включении.

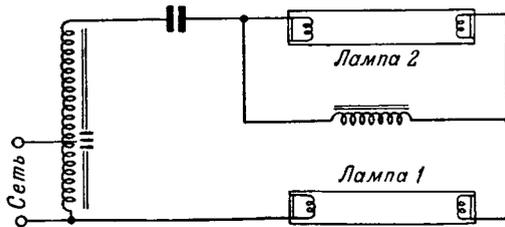


Рис. 2. Схема последовательного включения ламп с последовательным зажиганием.

Трансформатор (рис. 2) обеспечивает то же напряжение холостого хода, что и трансформатор в схеме параллельного включения. Вначале полное напряжение ложится на лампу 1, и она зажигается. Ток первой лампы, протекая через небольшое линейное индуктивное сопротивление и конденсатор, создает резонансное напряжение, достаточное для зажигания лампы 2. В этой схеме индуктивная катушка имеет меньшие потери, чем в схеме рис. 1, так как через нее протекает лишь доля общего тока.

Таким образом, осуществляется снижение в размерах, весе и потерях включающего устройства по сравнению со схемой параллельного включения.

На рис. 3 показана другая схема последовательного включения с последовательным зажиганием.

Обмотка А включающего устройства является первичной, В — вторичной. Высоковольтная обмотка С рассчитана на малый ток и создает напряжение зажигания для лампы 1. После того как лампа 1 зажглась, на лампу 2 ло-

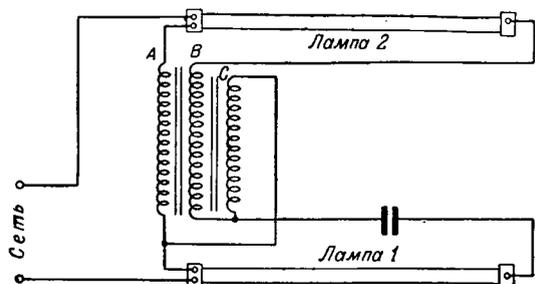


Рис. 3. Новая схема последовательного включения ламп с последовательным зажиганием.

жится напряжение, равное векторной сумме падений напряжения на всех трех обмотках. На рис. 4 изображены векторные диаграммы. Диаграмма А соответствует моменту включения. Диаграмма В изображает момент зажигания лампы 2. Диаграмма С относится к моменту работы обеих ламп.

В таблице приводятся потери, полный вес, вес меди и стали и стоимость различных типов включающих устройств для ламп 40 вт, употребляемых в описанных схемах. За 100% приняты параметры схемы, изображенной на рис. 1.

Тип включающего устройства	Потери, %	Вес, %	Стоимость, %	Вес меди, %	Вес стали, %
Параллельное включение с мгновенным зажиганием	100	100	100	100	100
Последовательное включение с последовательным мгновенным зажиганием	72	75	75	42	74
Параллельное включение с зажигающими .	55	63	50	25	56

Как видно из таблицы, параметры схемы последовательного включения (рис. 3) ближе к параметрам схемы параллельного включения с зажигающими.

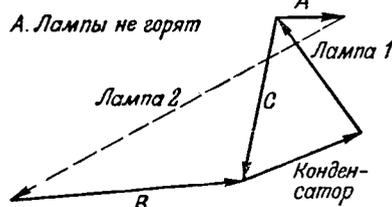
На рис. 5 показана схема быстрого зажигания с цепью автоматического накала катодов без зажигателя. Напряжение в данной схеме, требуемое для зажигания лампы, несколько выше, чем при наличии зажигателя, но значительно ниже, чем при зажигании лампы без накала.

В схеме с цепью автоматического накала применимы лампы только с двухштырьковыми цоколями. Быстрое зажигание в такой схеме обеспечивается для ламп мощностью 15, 20 и 30 вт.

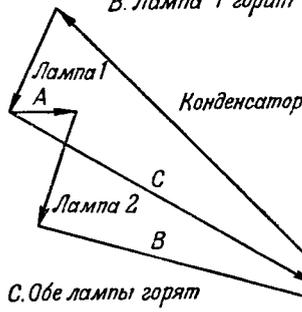
На рис. 6 показана возможная схема включения для мгновенного зажигания ламп с автоматической пульсационной катушкой. Последняя служит для ионизации газа внутри лампы через наружное емкостное соединение. Катушка создает пульсацию высокого напряжения небольшой мощности с частотой сети. Когда газ в лампе полностью ионизирован и электроды начинают эмиттировать, разряд в лампе возникает при приложении любого напряжения, достаточного для поддержания номинального тока в лампе. Таким образом, размеры включающего устройства становятся минимальными.

Так как зажигание возникает при напряжении, близком к рабочему напряжению на лампе, в качестве стабилизирующего устройства может быть применена лампа накаливания. В этом случае получается выигрыш в весе и стоимости за счет снижения экономичности схемы.

Дальнейшее уменьшение габаритов включающего устройства может быть достигнуто переходом к работе ламп при высокой частоте. При этом повышается также и светоотдача самих ламп. Например, в качестве стабилизирующего устройства для лампы 40 вт, работающей при частоте 400 гц, может служить небольшой конденсатор с малыми потерями. При этом светоотдача лампы увеличивается на 6%, а к. п. д. всей схемы повышается на 20%. Мгновенное зажигание и высокий cos φ могут быть достигнуты применением комбинации индуктивного и емкостного со-



В. Лампа 1 горит



С. Обе лампы горят

Рис. 4. Векторная диаграмма напряжений для схемы, показанной на рис. 3.

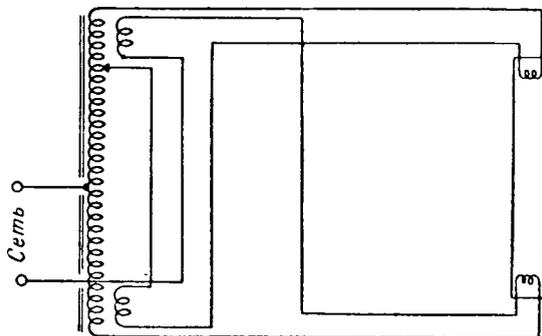


Рис. 5. Схема быстрого зажигания для двухштырьковых ламп.

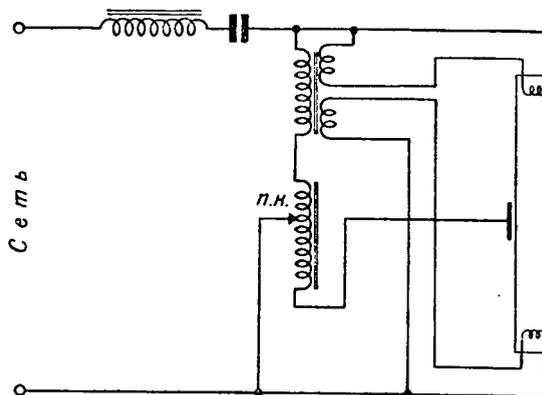


Рис. 6. Схема зажигания от пульсационной катушки.

п. к. — пульсационная катушка.

противлений. В этом случае вес включающего устройства уменьшается на 50% по сравнению с весом устройства, работающего при частоте 60 гц.

Такие схемы нашли применение в авиации и транспорте, где имеются генераторы высокой частоты.

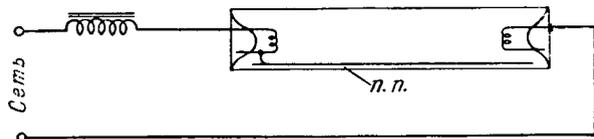


Рис. 7. Конструкция люминесцентной лампы с проводящей полоской, соединенной с одним из электродов.
п. п. — внутренняя проводящая полоска.

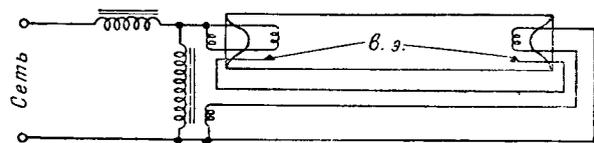


Рис. 8. Конструкция люминесцентной лампы с вспомогательными электродами
в. э. — вспомогательные электроды.

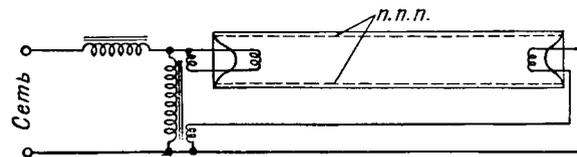


Рис. 9. Конструкция люминесцентной лампы с прозрачным проводящим покрытием.
п. п. п. — прозрачное проводящее покрытие.

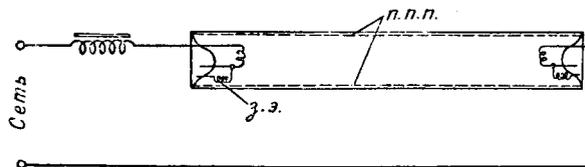


Рис. 10. Конструкция люминесцентной лампы с зажигающими электродами и прозрачным проводящим покрытием
п. п. п. — прозрачное проводящее покрытие; з. э. — зажигающий электрод.

Лампы мгновенного зажигания. Второй путь для разрешения проблемы мгновенного зажигания заключается в изменении конструкции самой лампы.

При этом возможно несколько решений для достижения пониженного напряжения зажигания лампы: 1) уменьшение давления инертных газов; 2) увеличение диаметра лампы; 3) введение внутрь лампы проводящей полоски, соединенной с одним из электродов; 4) введение вспомогательных электродов; 5) покрытие внутренней поверхности лампы прозрачным проводящим слоем; 6) введение активированных зажигающих электродов при наличии прозрачного проводящего покрытия внутри лампы.

Уменьшение давления инертных газов приводит к уменьшению напряжения зажигания, но одновременно к увеличению ионной бомбардировки электродов во время работы. Это ведет к уменьшению светового потока лампы и сокращению срока ее службы.

Увеличение диаметра лампы при поддержании стандартного давления и тока недостаточно уменьшает напряжение зажигания для оправдания дополнительного расхода материалов на лампу и арматуру.

Наличие проводящей полоски внутри лампы, соединенной с одним из электродов, приводит к зажиганию лампы от пониженного напряжения, так как оно прикладывается только к небольшому разрядному промежутку внутри лампы, а не ко всей лампе (рис. 7). Если одновременно с этим понизить давление инертных газов, то возможно еще большее снижение напряжения зажигания.

При замыкании цепи между свободным концом полоски и электродом возникает тлеющий разряд. Последний продолжается только в течение полупериода, когда электрод имеет отрицательный потенциал по отношению к полоске. В последующий момент разряд перебрасывается на другой электрод, с которым соединена полоска. При этом сопротивление лампы уменьшается, ток растет и разряд переходит в дугу.

Время между возникновением тлеющего и дугового разряда зависит от напряжения сети и от сопротивления полоски, которое должно быть порядка нескольких тысяч ом.

Стабилизирующее устройство в данной схеме можно заменить лампой накаливания с некоторой потерей в к. п. д. схемы.

Для зажигания лампы от напряжения, близкого к рабочему напряжению на лампе, могут служить специальные вспомогательные электроды (рис. 8). Около каждого электрода лампы расположен вспомогательный неактивированный электрод, изолированный от основного электрода. Снаружи оба вспомогательных электрода соединены последовательно. При замыкании цепи возникает ток тлеющего разряда порядка 1 ма. При этом вокруг электродов происходит ионизация газов, которая способствует возникновению основного дугового разряда.

Если трубка лампы изнутри полностью покрыта слоем прозрачного проводящего материала (рис. 9), то при наличии небольшого накала катодов достигается снижение напряжения зажигания. Сопротивление покрытия может быть в пределах от $2 \cdot 10^3$ до 10^6 ом. При наложении на лампу сетевого напряжения между каждым из электродов и проводящим покрытием возникает вспомогательный разряд. После ионизации всего пространства тлеющий разряд переходит в дуговой. В качестве проводящего покрытия используется вещество, выделяющее минимальное количество загрязнений.

Лампа, показанная на рис. 10, покрыта изнутри проводящим слоем с сопротивлением порядка $2 \dots 3 \cdot 10^3$ ом и имеет вспомогательные активированные электроды.

При наложении на лампу сетевого напряжения между вспомогательными электродами и проводящим покрытием возникает тлеющий разряд. Благодаря малому сопротивлению покрытия ток возрастает до величины, достаточной для нагрева вспомогательных электродов до температуры эмиссии и, следовательно, возникновения дугового разряда между ними. Увеличение тока вызывает нагрев основных электродов до температуры эмиссии. После этого разряд переходит на основные электроды благодаря повышенному потенциалу на них и меньшему сопротивлению. Для большего снижения напряжения зажигания один из вспомогательных электродов может быть соединен с проводящим покрытием.

Лампы этого типа могут быть использованы в обычных схемах, для чего достаточно в последних устранить зажига-

(El. Eng., № 6, стр. 533, 1951. J. H. Campbell)

Инж. Н. Г. ПЕТРОВА и инж. Л. Н. ПОЖАЛКИНА



Пленум правления ВНИТОЭ в Куйбышеве

Очередной XIII пленум правления Всесоюзного научно-инженерно-технического общества энергетиков проходил в г. Куйбышеве и в значительной степени был посвящен строительству Куйбышевской гЭС.

В работе пленума приняли участие около 100 ученых и инженеров, представляющих 30 республиканских и областных отделений Общества, и более 200 делегатов от первичных организаций ВНИТОЭ г. Куйбышева и Куйбышевгидростроя.

Пленум обсудил отчетный доклад правления ВНИТОЭ, доклад главного инженера Куйбышевгидростроя Н. Ф. Шапошникова о задачах строительства на 1952 г. и о требованиях к энергетической обществу и сообщения об итогах социалистического соревнования вышедших на первые места организаций ВНИТОЭ.

В докладе правления было отмечено, что в 1951 г. около 6 тыс. членов Общества выполнили свои социалистические обязательства по внедрению в производство передовой техники. В итоге выполнения сообразительств было осуществлено 3 580 работ, позволивших сэкономить огромные материальные ресурсы. Значительная часть внедренных работ была связана с выполнением заказов для великих строек коммунизма. Из проведенных Обществом шести конкурсов наиболее значительными были конкурс на лучшую работу по гидроэнергетике им. Б. Е. Веденева и конкурс по экономии электрической и тепловой энергии. Лауреатами конкурса им. Б. Е. Веденева является группа членов ВНИТОЭ, разработавших мероприятия, значительно сокращающие сроки постройки Каховского гидроузла. Премированные предложения дают экономию многих десятков миллионов киловаттчасов электрической энергии и сотен мегакалорий тепловой энергии. К сожалению, несмотря на выход в свет уже 5-го сборника, содержащего описание премированных предложений, внедрение последних ведется весьма медленно.

В 1951 г. организации ВНИТОЭ провели более 600 научно-технических конференций и совещаний, которые рассмотрели проекты нового энергооборудования и энергоустановок, обобщили и распространили передовой технический опыт в области энергетики. Среди этих конференций и совещаний следует отметить совещания: по высоковольтной аппаратуре, металлургическому электроприводу, проектированию и строительству высоконапорных гидроэлектростанций, по рациональной эксплуатации электрохозяйства промпредприятий, по повышению коэффициента мощности и др.

В истекшем году проводились и научно-технические дискуссии, которые содействовали развитию большевистской научной критики и самокритики в энергетике.

В 1951 г. ВНИТОЭ принимало участие в рассмотрении проектов энергооборудования для волжских гидроузлов, провело совещание по водному хозяйству волжских гЭС, организовало проверку и координацию научно-исследовательских работ, выполняемых для волжских сверхмощных гидроагрегатов, разработало ряд рекомендаций для строительства Главного Туркменского канала по применению термоизоляционных конструкций из местного сырья и направило в Тахна-Таш чертежи солнечных нагревательных установок, выполненных гелиогруппой МОНИТОЭ. Первичные организации ВНИТОЭ в Куйбышеве и в Ростове в/Дону оказывали содействие в налаживании энергоснабжения строительных работ новых гЭС.

В 1951 г. было восстановлено отделение ВНИТОЭ в Куйбышеве и были открыты новые отделения общества в Калининграде и Пензе. Первичные организации созданы в Севкавказэнерго и на ИртышгЭСстрое. В течение 1952 г. будут созданы первичные организации Общества во всех без исключения энергосистемах и на всех крупных предприятиях энергопромышленности.

Главный инженер Куйбышевгидростроя Н. Ф. Шапошников в своем докладе отметил, что досрочное выполнение строительством производственного плана 1951 г. в значительной степени было результатом творческой инициативы рабочих и техников, добившихся перекрытия проектных норм на землеройных и транспортных машинах. В 1952 г. темпы работ продолжают нарастать, в значительной степени этому способствовало широкое применение гидромеханизации в зимнее время. Н. Ф. Шапошников подробно изложил требования строительства к энергетической обществу, обратив внимание, на задачи разработки гибкой и надежной системы энергоснабжения отдельных строительных объектов, создания простого, но мощного безтеневого освещения котлована, создания прибора, позволяющего производителю работ «видеть» концентрацию грунта в пульпе, и пр.

В прениях проф. Б. П. Альбицкий (Азербайджанское отделение), инж. С. С. Феоктистов (Горьковское отделение), инж. В. П. Гришаков (Ростовское отделение) и другие внесли, используя примеры МингечаургЭСстроя, ГорьковгЭСстроя, Волгодонстроя, ряд рекомендаций по вопросам, поднятым Н. Ф. Шапошниковым.

Инж. Г. П. Брюхов (организация ВНИТОЭ на ленинградском заводе «Большевик») сообщил о патристическом почине группы членов ВНИТОЭ завода «Большевик», которые по социалистическому обязательству наладили использование отбросного тепла завода (мятый пар молотов) для теплофикации прилегающего к заводу района города. Это начинание получило высокую оценку местных партийных и советских организаций.

На пленуме были объявлены итоги соцсоревнования отделений ВНИТОЭ за 1951 г. Первое место и переходящее Красное знамя получило Киевское отделение (председатель проф. А. В. Орловский); вторые премии присуждены Ленинградскому отделению (председатель проф. С. В. Усов) и Горьковскому (председатель проф. В. Л. Лычковский); третьи премии получили: Московское отделение (председатель канд. техн. наук А. С. Горшков), Грузинское (председатель инж. Д. Н. Чхеидзе) и Харьковское (председатель доц. М. С. Кирюнин).

С докладами, посвященными научно-техническим вопросам строительства Куйбышевской гЭС, выступили профессор А. М. Залесский, Г. Н. Петров, Д. П. Гохштейн, А. М. Федосеев, Т. Л. Золотарев; кандидаты техн. наук В. Н. Лофицкий, А. С. Горшков, О. В. Вяземский, Е. Я. Казовский; инженеры Г. С. Щеголев, Н. П. Качинский и др. В докладах, в частности, разбирались вопросы, связанные с конструированием турбин, генераторов и трансформаторов для волжских гЭС, с передачей электроэнергией из Куйбышева в Москву, с релейной защитой, с автоматикой и др.

Участники пленума провели в Куйбышеве и на строительной площадке Куйбышевгидростроя консультации для местных инженерно-технических и научно-исследовательских работников.

Инж. Г. О. ЛЕВИТ

Вопросы светотехники на великих стройках коммунизма

Характерными особенностями крупного энергетического строительства, ведущегося в Советском Союзе, являются полная механизация всех видов работ и чрезвычайный короткий срок строительства. При окончании сооружения водосливной плотины и здания Цимлянской гЭС одновременно велись земляные и электросварочные работы, опалубка, укладка бетона, отделочные и монтажные работы. Рабочие места размещались одно над другим на 4—5 различных уровнях. Подобную же картину работ можно было наблюдать и в котлованах шлюзов Волго-Донского канала. В таких условиях строительство мощной гидроэлектростанции напоминает по насыщенности механизмами и интенсивности работ скорее крупный цех завода, чем «строительную площадку» в старом понимании этих слов.

Естественно, что и к осветительной установке котлованов гидроэлектростанции, водосливной плотины и шлюзов предъявляются еще более высокие требования, чем для обычных промышленных предприятий. Повышенные требования к освещению обуславливаются постоянным перемещением рабочих мест, низким коэффициентом яркости рабочих поверхностей, повышенной опасностью травматизма и необходимостью для рабочих смотреть в самых различных направлениях, вследствие чего источники света, находящиеся на темном фоне неба, неизбежно попадают в поле зрения. В то же время в отличие от обычного заводского помещения котлован не имеет сверху ни ферм, ни потолка, где можно было бы укреплять осветительные приборы.

Учитывая важность правильного разрешения вопросов освещения ночных работ на великих стройках коммунизма, Комиссия по светотехнике при Отделении технических наук Академии наук СССР в октябре 1950 г. обратилась с предложениями к руководителям строек об оказании консультативной помощи в этом деле. Строительства приняли это предложение. На строительстве Цимлянского гидроузла был осуществлен ряд опытных установок с применением нового оборудования. Эти установки дали хороший результат; после переоборудования освещения выработка ночных смен резко возросла, достигая в некоторых случаях 120% выработки дневных смен.

В 1951 г. Комиссия по светотехнике заключила договоры о творческом социалистическом сотрудничестве в деле разработки новых методов освещения строительных работ с управлениями строительства Куйбышевского и Сталинградского гидроузлов. Над вопросами нормирования и методов освещения отдельных видов строительных работ работают совместно с Комиссией по светотехнике также Московский и Ленинградский институты охраны труда ВЦСПС и кафедра светотехники Энергетического института им. Молотова.

В декабре 1951 г. Комиссией по светотехнике было создано совещание по вопросам освещения великих строек коммунизма; в нем приняли участие представители строительства Волго-Донского канала, Куйбышевского и Сталинградского гидроузлов, научно-исследовательских и проектных организаций и светотехнической промышленности.

В докладе «Опыт освещения строительных работ при сооружениях Цимлянского гидроузла» О. Л. Канавец, С. В. Поллак и М. В. Соколов сформулировали требования, которые следует предъявлять к установкам для освещения ночных работ при сооружении крупных гидроэлектростанций, описали опытные установки в котловане гидроэлектростанции и водосливной плотины и в котловане одного из шлюзов Цимлянского гидроузла. Докладчики дали также ряд предложений по дальнейшему развитию научно-исследовательских работ и по другим мероприятиям, которые необходимы для того, чтобы обеспечить хорошее освещение на великих стройках коммунизма.

Кандидат техн. наук Е. И. Бозовская и А. А. Бутылев в докладе «Освещение работ при сборке металлоконструкций и каменной кладке» изложили результаты работы, выполненной ими в Ленинградском институте охраны труда ВЦСПС. Работа включала обследование осветительных установок на строительстве московских высотных зданий, лабораторные исследования по

рогового контраста в зависимости от освещенности при различной длительности наблюдения, разработку проекта норм освещенности и составление руководящих указаний по проектированию осветительных установок при сборке металлоконструкций и каменной кладке.

Проект норм освещения при заготовке, транспортировке и укладке бетона, разработанный в Московском институте охраны труда ВЦСПС, доложила канд. техн. наук Т. А. Глаголева. Проект составлен на основе обследования бетонных заводов в Москве и на строительстве Цимлянского гидроузла. Институт составил проект освещения люминесцентными лампами блока для укладки бетона. Установка была осуществлена на строительстве одного из шлюзов Цимлянского гидроузла.

В обсуждении докладов, получивших положительную оценку, приняли участие инженеры И. В. Азарапин и А. Н. Тарумов (Куйбышевский гидроузел), канд. техн. наук З. М. Горев, проф. В. В. Мешков, проф. П. М. Тиходеев, проф. В. В. Шаронов.

По первым трем докладом совещание приняло решение: а) рекомендовать проектным организациям использование материалов по освещению строительных работ, доложенных на совещании; б) просить Комиссию по светотехнике составить временные нормы освещения строительных работ на основании представленных проектов; в) признать необходимым дальнейшее продолжение научных исследований по изысканию наилучших методов освещения строительных работ; г) принять меры к обеспечению великих строек коммунизма необходимым световым оборудованием; д) признать необходимым включать раздел освещения в проекты организации строительных работ; е) оказать содействие привлечению инженеров-светотехников в проектные организации и на стройки.

Затем на совещании были обсуждены вопросы освещения постоянных сооружений на великих стройках коммунизма и световой сигнализации на новых водохранилищах.

Инж. Е. П. Предтеченский (Гидропроект) в докладе «Требования к освещению крупнейших волжских гидроэлектростанций и шлюзов» указал на то, что размеры отдельных сооружений, входящих в комплекс Куйбышевского и Сталинградского гидроузлов, существенно отличаются от размеров обычных гидротехнических сооружений. Большинство помещений гидроэлектростанции не имеет естественного освещения. Это вызывает повышенные требования к освещению таких помещений, в которых необходимо установить светильники, излучающие не только видимый, но и полезный для человеческого организма ультрафиолетовый поток. Особое внимание необходимо обратить на рациональное освещение открытых трансформаторных подстанций, шлюзов, а также железнодорожных и шоссежных дорог в районе гидроузла.

Доклад «Системы освещения гидроэлектрических станций» сделал канд. техн. наук А. С. Шайкевич (Ленинградский институт охраны труда ВЦСПС). Анализируя значительный фактический материал о практике освещения гидроэлектростанций, докладчик критически рассмотрел различные системы освещения. Для машинных зал гидроэлектростанций, по мнению докладчика, наиболее целесообразной является система отраженного света либо световые окна, расположенные в стенах или потолке и добавочные настенные светильники. В помещении пульта управления наилучшим вариантом являются световые окна в потолке или светящийся потолок. Для освещения открытых трансформаторных подстанций целесообразно применять светильники в виде шаров из молочного стекла.

В прениях по названным докладом канд. техн. наук Н. В. Горбачев (Всесоюзный светотехнический институт) высказался за необходимость предусмотреть архитектурное освещение волжских гидроэлектростанций и шлюзов. Проект такого освещения необходимо разработать одновременно с составлением архитектурного проекта сооружений. Проект должен включать также и иллюминационное освещение. З. М. Горев предложил для внутренних помещений в качестве аварийного средства использовать светосоставы длительного послесвечения.

В прениях приняли также участие инж. С. М. Мельников (Гидропроект), Н. Н. Ермолинский (Всесоюзный светотехнический институт), инж. И. В. Азаралин и члены Комиссии по светотехнике проф. П. М. Тиходеев и проф. А. А. Труханов.

Советание представило в Комитет содействия Академии наук СССР рекомендацию организовать специальную экспертную группу для рассмотрения проектов освещения крупных гЭС.

Было признано также необходимым проведение работ по следующим научным темам:

а) разработка систем рационального освещения открытых трансформаторных подстанций, шлюзов, портовых сооружений, набережных и автодорог в пределах гидроузлов;

б) разработка принципов освещения машинного зала гидроэлектростанций и других помещений, лишенных естественного освещения, с применением светильников, обладающих эритемным действием;

в) пересмотр правил и норм искусственного освещения гидроэлектростанций;

г) разработка принципов архитектурного наружного освещения основных сооружений гидроузла.

Повышенные требования предъявляются к световой сигнализации для обеспечения судовождения по новым водохранилищам. На магистральных направлениях водохранилищ сигналы должны обладать значительной дальностью действия, в больших количествах должны применяться цветные и проблесковые огни, щелевые створы и пр. Этим вопросам был посвящен доклад С. Н. Григорьева «Задачи световой сигнализации на новых водохранилищах» (Министерство речного флота СССР). В настоящее время, как указал докладчик, проводится широкая электрификация береговых и пловучих сигнальных огней. Источником электроэнергии для сигнальных огней служат чаще всего сухие элементы, иногда — щелочные аккумуляторы или местные электрические сети. За последнее время находят все большее распространение пловучие микрогидроэлектростанции конструкции А. Ф. Симонова. В навигацию 1951 г. на Волге, Оке и Неве работало несколько сот опытных образцов таких станций.

Изучению теоретических вопросов световой сигнализации и разработке специального светосигнального оборудования для речного и озерного судоходства раньше не уделялось должного внимания. В большинстве случаев для речной сигнализации применялось оборудование, предназначенное для других целей. На новых водохранилищах будут применены сигнальные огни исключительно с электрическим питанием, имеющими наилучшие световые характеристики и позволяющие одновременно обеспечить создание проблесков, автоматическое зажигание и телеуправление.

Для того чтобы новые водохранилища могли быть обеспечены безупречной во всех отношениях световой сигнализацией, советание признало необходимым проведение в ближайшее время следующих научно-исследовательских работ:

а) разработка новых принципиальных схем световой сигнализации и светосигнальных приборов для обеспечения судоходства на новых водохранилищах и каналах;

б) выбор оптимальных цветов и расчетных величин цветовых порогов для световой сигнализации (работа должна быть выполнена комплексно с другими видами транспорта);

в) исследование видимости сигнальных огней в условиях тумана и разработка мероприятий по улучшению видимости;

г) разработка средств автоматического управления и телеуправления световыми сигналами (проблесковые автоматы, дневные выключатели, приборы для телеуправления).

Можно не сомневаться, что светотехники советских научных организаций в содружестве со строителями Куйбышевского и Сталинградского гидроузлов успешно выполнят задачи наиболее рационального освещения на стройплощадках и обеспечат проведение в жизнь решений совещания.

Проф. М. В. СОКОЛОВ

Ученый секретарь Комиссии по светотехнике при ОН Академии наук СССР



Профессор Б. Ф. Федоров

К 60-летию со дня рождения и 30-летию научно-педагогической и инженерной деятельности

Бсрис Федорович Федоров родился 26 апреля 1892 г. в Москве. По окончании Коммерческого училища он поступил на Механическое отделение Московского высшего технического училища и, специализируясь в области электротехники, окончил его в 1917 г. со званием инженер-механика.

В том же году Б. Ф. Федоров поступил на фабрику электрических ламп. Под его руководством было налажено производство угольных и вольфрамовых ламп накаливания. В 1919 г. Б. Ф. Федоров перешел в Москву, на работу по электрооборудованию шахт и по постройке электростанций на рудниках Подмосковского каменноугольного бассейна.

В 1923 г. в стране началось расширение производства электрических ламп. Б. Ф. Федоров был назначен в 1924 г. заведующим производством и главным инженером на Кудринскую фабрику, на которой вскоре было организовано новое производство газонаполненных и специальных ламп.

Одновременно с инженерной работой Б. Ф. Федоров в 1920 г. начал преподавание на Электротехническом факультете МВТУ по начертательной геометрии и черчению. В следующем году ему было поручено руководство



работами студентов в фотометрической лаборатории. В 1926 г. он был избран по конкурсу на чтение общего курса «Электрическое освещение». В 1931 г. Б. Ф. Федоров организовал на Электротехническом факультете МЭИ им. Молотова специализацию по светотехнике и был назначен заведующим кафедрой осветительных установок. В 1935 г. он был утвержден профессором и ему была присвоена ученая степень кандидата технических наук. В 1943 г. Б. Ф. Федоров защитил докторскую диссертацию.

Б. Ф. Федоровым написано несколько учебников и учебных пособий. Изданный в 1930 г. курс его лекций, читанных в МЭИ по фотометрии, был первым отечественным оригинальным пособием по фотометрии. В 1934 г.

Б. Ф. Федоров совместно с проф. Л. И. Сиротинским написал книгу «Основы техники электрического освещения». В 1943 г. вышло второе издание его «Общего курса светотехники».

Написанные им учебные пособия отличаются хорошим методическим построением, оригинальностью материала и высоким научным уровнем.

Будучи еще преподавателем МВТУ, Б. Ф. Федоров принимал участие в светотехнических работах, проводимых

под руководством В. С. Кулебакина в ГЭИ и затем в ВЭИ им. Ленина. Б. Ф. Федоров предложил новый метод освещения подземных выработок негасовых шахт; этот метод дает значительное улучшение освещения шахт при одновременном уменьшении мощности ламп и расходов на оборудование. Большую работу провел Б. Ф. Федоров в области специального освещения, разработав нормы, источники питания и светильники.

Большое внимание Б. Ф. Федоров уделял все годы вопросам улучшения городского освещения. В 1933 г. им была организована Светотехническая лаборатория при Академии коммунального хозяйства им. Памфилова. В этой лаборатории под руководством Бориса Федоровича были разработаны теоретические обоснования рационального освещения улиц и площадей городов и сконструирована серия зеркальных светильников.

Научная работа Б. Ф. Федорова охватывает большой

круг вопросов, тесно связана с практикой и направлена на решение важных проблем светотехники.

Много внимания уделяет Б. Ф. Федоров общественной деятельности в области светотехники. Он долгое время был председателем светотехнической секции МОНИТОЗ, состоит в настоящее время членом Светотехнической комиссии Отделения технических наук Академии наук СССР и членом бригады содействия Комиссии Академии наук СССР по Сталинградгидрострою.

Большая эрудиция Б. Ф. Федорова в области техники электрического освещения ставит его в первые ряды советских светотехников. Вся деятельность Бориса Федоровича направлена на развитие отечественной светотехники и воспитание молодых научно-технических кадров.

**В. С. КУЛЕБАКИН, Р. А. НИЛЕНДЕР, С. О. МАЙЗЕЛЬ,
А. А. ГЕРШУН, В. В. МЕШКОВ, М. В. СОКОЛОВ,
Н. А. КАРЯКИН, В. САМСОНОВА**



Выдающийся русский ученый электрик академик Владимир Федорович Миткевич

(К годовщине со дня смерти)

Владимир Федорович Миткевич принадлежит к славной плеяде выдающихся отечественных ученых, своими трудами внесших ценнейший вклад в развитие науки и техники и немало способствовавших распространению научных знаний в нашей стране.

В. Ф. Миткевич относился к числу тех деятелей науки, которые тесно связали свою научную творческую работу с производством и с активной работой в высших учебных заведениях. Сразу же по окончании физико-математического факультета Петербургского университета В. Ф. Миткевич был привлечен к преподаванию электротехники в Петербургском электротехническом институте, а затем и в Петербургском горном институте.

Здесь он участвовал в создании первых в России специальных электротехнических лабораторий в высших учебных заведениях. Здесь же в лаборатории Горного института Владимир Федорович начал свои блестящие исследования физической природы электрической дуги, завершенные им уже в Петербургском политехническом институте, в работе которого он принял самое деятельное участие со дня основания института. Серия работ В. Ф. Миткевича по изучению электрической дуги была объединена им в специальной монографии. В этих классических работах, удостоенных в 1907 г. премии им. А. С. Попова, В. Ф. Миткевич выяснил физическую природу давления дуги на анод и определил на основании этого исследования отношение заряда электрона к его массе, установил основную роль испускания электронов катодом в процессе образования и поддержания дуги, исследовал обратную э. д. с. дуги, выяснил роль температуры катода и возможность получения дуги при очень малых э. д. с. при дополнительном подогревании катода, исследовал несимметрию переменного тока при несимметрии электродов и указал возможность использования этой несимметрии для выпрямления тока. За эту работу В. Ф. Миткевич получил звание адъюнкта по кафедре электротехники.

Спустя несколько лет, В. Ф. Миткевич выполнил совместно с проф. А. И. Горбовым обширную работу по фиксации азота воздуха при помощи электрической дуги.

Классические работы В. Ф. Миткевича по исследованию электрической дуги легли в основу последующих многочисленных работ различных авторов, связанных



с исключительно большим значением электрической дуги во многих областях современной электротехники — разрыв токов выключателями при высоком напряжении, электротермия, электросварка, освещение и т. д.

В этот же начальный период своей научной деятельности В. Ф. Миткевич выполнил работу по исследованию алюминевого выпрямителя, уделив в ней внимание как физическим явлениям в самом выпрямителе, так и режиму в электрической цепи с выпрямителем. Им были разработаны конструкции выпрямителя и новые схемы его включения, получившие

в дальнейшем широкое применение.

Несомненный интерес представляет работа В. Ф. Миткевича «К вопросу о зубчатых арматурах», в которой он изящно разрешил поднятый в печати М. О. Доливо-Добровольским вопрос о применении различных формулировок закона электромагнитной индукции к определению э. д. с. в обмотках электрических машин с гладким и зубчатым якорем.

Исключительно значение имеет работа В. Ф. Миткевича по изучению явления короны на проводах высокого напряжения, выполненная им в Политехническом институте в период создания при его участии в институте первой в России лаборатории высокого напряжения. Результаты этой работы В. Ф. Миткевич опубликовал в журнале «Электричество» в 1910 г. в статье под наименованием «Явления тихого разряда в высоковольтных воздушных линиях передачи». В ней автор впервые предложил применять в линиях высокого напряжения то, что ныне получило название расщепленного провода, с целью повышения критического напряжения, при котором появляется корона.

Эта замечательная идея, высказанная впервые нашим выдающимся ученым — Владимиром Федоровичем Миткевичем в период, когда только начали создаваться первые электропередачи высокого напряжения 110...120 кВ, в настоящее время является одной из тех идей, использование которых дает практическое решение проблемы передачи электрической энергии сверхбольших мощностей на сверхдальние расстояния. Предложение В. Ф. Миткевича не только имеет значение в отношении снижения потерь на корону, но и является в случае передачи переменным током одним из важнейших мероприятий, обеспечивающих

устойчивость работы энергетических систем, связанных сверхдальними линиями передачи большой мощности.

В указанной работе В. Ф. Миткевич проанализировал со свойственной ему глубиной результаты исследований Мершана (США), показав необоснованность его выводов, и дал впервые научно-обоснованный метод определения критического коронного напряжения.

Владимир Федорович Миткевич откликнулся на все научные проблемы, выдвигаемые жизнью, и всегда страстно поддерживал все передовое, добиваясь, чтобы в нашей стране широко развертывались исследования в области важнейших передовых проблем. Еще в 1931 г. он указывал на огромное значение проблемы передачи электроэнергии на большие расстояния постоянным током.

Круг научных интересов Владимира Федоровича был исключительно велик. В журнале «Электричество», в журнале Русского физико-химического общества и в других научно-технических журналах помещено большое количество его статей по различным вопросам. Так, им впервые была дана полная теория флюксметра, причем в этой работе В. Ф. Миткевич не ограничивается формальным рассмотрением теории флюксметра, а особо обращает внимание на то, что флюксметр «представляет интерес не только как весьма полезный измерительный прибор, но еще и как в высшей степени изящная иллюстрация закона сохранения магнитного потока». Такое стремление выделить основное физическое содержание исследуемого явления всегда отличало все работы В. Ф. Миткевича и делало их исключительно богатыми плодотворными идеями.

В. Ф. Миткевичем совместно с Ф. Ю. Левинсон-Лессингом выполнены работы по изучению причин намагничивания горных пород; в них высказывается мысль, что причиной намагничивания горных пород является как земное магнитное поле, так и магнитное поле тока молнии. Последнее весьма важно для объяснения наблюдаемых магнитных аномалий.

Особый большой раздел трудов В. Ф. Миткевича посвящен природе электромагнитных явлений. Владимир Федорович Миткевич являлся одним из глубочайших знатоков трудов Фарадея и Максвелла. Развивая взгляды на природу магнитного поля, Владимир Федорович дал много оригинальных трактовок различных электромагнитных явлений. Но основная его мысль в течение многих последних лет была направлена на решение главного вопроса, а именно вопроса о природе электрического тока. Являясь непримиримым противником теории действия на расстоянии как теории идеалистической, он стремился усмотреть, как можно полнее выяснить и уточнить взаимосвязь электромагнитного поля и элементарных зарядов. Еще в 1922 г. Владимир Федорович писал: «Было бы в высокой степени ошибочно думать, что процесс кинетического характера, называемый нами электрическим током, ограничивается упомянутым выше движением электронов и ионов внутри проводника. Как известно, в пространстве, окружающем проводник с током, наблюдается магнитное поле, которое мы должны рассматривать, как существеннейшую часть процесса тока, и которое обладает запасом энергии, имеющей все признаки кинетической энергии». (О природе электрического тока. Журнал «Телеграфия и телефония без проводов», № 15, 1922).

Движущиеся в проводнике элементарные электрические заряды в представлении В. Ф. Миткевича являются также сложными электромагнитными комплексами.

Отставив свои взгляды, В. Ф. Миткевич активно выступал в дискуссиях и с многочисленными статьями в печати. Свои идеи он подытожил в капитальном труде «Магнитный поток и его преобразования».

Будучи последовательным материалистом, В. Ф. Миткевич вел большую борьбу против физиков-идеалистов, против таких представлений в физическом мышлении, которые он называл «объективированными математическими абстракциями». Он неустанно защищал положения об объективности физических процессов, происходящих в электромагнитном поле, и тем самым боролся за основы научного материалистического понимания явлений природы. В борьбе с идеалистическими проявлениями в современной физике В. Ф. Миткевич опирался на глубоко изученные им труды классиков марксизма — на труды Ленина и Сталина. Это позволяло ему с большой широтой рассматривать те или иные явления и формулировать основ-

ные положения. Так выработался у В. Ф. Миткевича и общий взгляд на физика-исследователя, изучающего физические явления. Он указывал, что физик располагает единственной возможностью «последовательно и без всяких отступлений проводить то положение, что предмет его изысканий объективно существует вне нашего сознания и независимо от нашего сознания и что в действительности происходит не то или иное в зависимости от нашей точки зрения, а нечто совершенно определенное и, во всяком случае, совершенно неподчиненное точкам зрения» («Основные физические воззрения», Академия наук СССР, 1934).

В нашу эпоху перехода от социализма к коммунизму, когда глубокое знание учения Маркса—Ленина—Сталина и творческое его применение в практической деятельности являются основой быстрого движения вперед по пути прогресса, необходимо особо отметить эту сторону деятельности В. Ф. Миткевича, стремившегося, руководствуясь методом диалектического материализма, сформулировать правильные принципиальные исходные положения, необходимые для решения поставленных в исследованиях проблем.

Академик В. Ф. Миткевич, тесно связанный во всей своей деятельности с задачами практики, являл собой одновременно пример ученого-общественника. В журнале «Электричество» В. Ф. Миткевич долгое время выполнял большую работу ответственного секретаря редакции, а затем до конца своей жизни был членом редакционной коллегии журнала. В эту работу он вносил свое строгое отношение к подбору статей, к их научному содержанию, а также к языку и к терминологии. В первые годы после Великой Октябрьской социалистической революции В. Ф. Миткевич принял активное участие в ответственной и трудной работе по редактированию начавшего выходить в издании Научно-технического отдела ВСНХ СССР журнала «Технико-экономический вестник». В. Ф. Миткевич работал в ГОЭЛРО, в Центральном электротехническом совете, в комиссиях Академии наук по проводниковым и магнитным материалам, по единицам мер, по акустике и по службе времени, по светотехнике и др.

В 1935 г. на него было возложено руководство в Отделении технических наук Академии наук СССР секцией по разработке научных проблем электросвязи и секцией теоретической электротехники, а также магнитной лабораторией Энергетического института им. Кржижановского Академии наук СССР.

В. Ф. Миткевич принимал деятельное участие в работах Института истории науки и техники Академии наук. Под его редакцией были изданы монографии «Динамомашина в ее историческом развитии» и «Электродвигатель в его историческом развитии».

В. Ф. Миткевич был всегда активным членом научных совещаний и конференций. Он представлял СССР на международных электротехнических конференциях и, в частности, принимал участие в разработке практических электромагнитных единиц. Этому важному вопросу он посвятил несколько личных работ.

Выше уже было отмечено, что научная работа В. Ф. Миткевича с самого начала была связана с его деятельностью в высшей школе. Обладая широкой научной эрудицией и исключительно способностью к глубокому физическому анализу явлений, отлично зная запросы практической электротехники, В. Ф. Миткевич создал в Ленинградском политехническом институте хорошо известную в СССР научную школу теоретиков-электриков. В. Ф. Миткевич явился одним из основоположников в нашей стране дисциплины «Теоретические основы электротехники», являющейся ныне основным звеном в системе подготовки инженеров-электриков. Им были написаны оригинальные курсы — «Магнетизм и электричество», «Теория переменных токов» и «Физические основы электротехники». В последнем курсе, вышедшем тремя изданиями, В. Ф. Миткевич отразил также свои взгляды на природу электромагнитных явлений.

В. Ф. Миткевич был одним из наиболее любимых и уважаемых студентами профессоров Ленинградского политехнического института. Аудитория на его лекциях была всегда переполнена и многие приходили прослушать его лекции по несколько раз.

Владимир Федорович умел зажечь своих учеников своим неиссякаемым научным энтузиазмом и воспитал

для нашей страны многие тысячи энергичных и хорошо знающих свое дело инженеров и научных работников.

Являясь крупным ученым, В. Ф. Миткевич был и талантливым популяризатором передовых научно-технических идей. Его популярная монография «Электрическая энергия» вышла двумя изданиями.

За научные труды после революции В. Ф. Миткевич был удостоен премии им. В. И. Ленина (в 1929 г.) и премии им. И. В. Сталина (в 1943 г.). Он был награжден орденом Ленина, орденом Трудового Красного Знамени и

орденом Красной звезды. Ему было присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники, а в 1929 г. В. Ф. Миткевич был избран действительным членом Академии наук СССР.

Образ Владимира Федоровича Миткевича — выдающегося советского ученого, патриота социалистической родины, талантливого воспитателя молодого поколения — навсегда сохранится в памяти советских электриков.

**М. А. ШАТЕЛЕН, Л. Р. НЕЙМАН, И. А. ЗАЙЦЕВ,
А. Г. ЛУРЬЕ**



М. К. Поливанов

К 25-летию со дня смерти

10 мая 1927 г. умер выдающийся инженер-электрик и деятель русской электротехнической общественности — профессор Михаил Константинович Поливанов.

После окончания МВТУ и Электротехнического института Монтефиоре в Бельгии (1898 г.) М. К. Поливанов одновременно с преподаванием электротехники в МВТУ приступил к практической работе. На фабрике Никольской мануфактуры в Орехово-Зуеве им был разработан и осуществлен проект устройства центральной электростанции и электроснабжения производства.

Исключительно плодотворная инженерная работа М. К. Поливанова начинается с 1902 г., когда он приступил к реорганизации предприятий московского трамвая. М. К. Поливанов составляет общий план развития трамвайной сети, проектирует и сооружает центральную станцию (21 тыс. кВт) и семь подстанций, а в 1909 г. возглавляет отделы эксплуатации и строительства.

Крупная роль М. К. Поливанова как инженера-энергетика станет ясной, если мы вспомним, что в то время паровые турбины насчитывались в Европе немногими единицами. Отношение к установкам с турбогенераторами среди городских инженеров было еще настороженное. В этих условиях М. К. Поливанов решительно добился в Московской управе согласия на устройство энергооборудования московского трамвая на базе паровых турбин. Распределительное устройство трамвайной станции, осуществленное по проекту М. К. Поливанова, было в то время одним из образцовых — данные о станции, оборудованной мощными паротурбогенераторами (с напряжением 6 600 в), рекламировались фирмой Броун-Бовери в каталогах, а иностранные инженеры не один раз приезжали в Москву для ознакомления со станцией и распределительным устройством.

Творческий ум Михаила Константиновича как инженера-изобретателя сказался во многих технических предложениях. В частности, М. К. Поливанов просто и радикально устранил пробой изоляции статоров высоковольтных электродвигателей, предложив оригинальное по тому времени ступенчатое включение через сопротивление, установленное вне выключателя.



Вероятно, немногие знают, что одним из первых неосуществленных проектов устройства в Москве внеуличных железных дорог (метрополитена) был разработан (1912—1914 гг.) под руководством М. К. Поливанова. Основные данные проекта и план были в свое время опубликованы¹.

После Великой Октябрьской социалистической революции для развития творческих сил Михаила Константиновича Поливанова наступили наиболее благоприятные условия. С 1918 по 1922 г. он возглавляет важное для страны производство высоких сортов стали в электрических печах завода «Электросталь». Одновременно с 1919 г. под непосредственным руководством М. К. Поливанова начинается проектирование по плану ГОЭЛРО ряда государственных районных электрических станций: Каширской с передачей электроэнергии на расстояние 120 км при напряжении 110 кВ, Кизеловской на Урале, Нижегородской, Штеровской в Донбассе, Харьковской и др.

В период первых проектных работ по Днепрострою М. К. Поливановым была разработана для этого строительства оригинальная схема электрических соединений.

Весьма значительны заслуги М. К. Поливанова в деле объединения русских электротехников. В течение многих лет Михаил Константинович был председателем Общества русских электротехников и товарищем председателя Центрального электротехнического совета. Активное участие принимал М. К. Поливанов в журнале «Электричество» и в других технических журналах, печатая статьи по вопросам электрического оборудования электрических станций.

Прекрасные личные качества М. К. Поливанова и его выдающиеся способности создавали вокруг него атмосферу признания и симпатии. Имя его было популярно в широких электротехнических кругах.

Заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. Л. И. СИРОТИНСКИЙ
Московский энергетический институт им. Молотова

¹ Электричество, № 2, 1914.



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА В РИСУНКАХ И ЧЕРТЕЖАХ. Часть первая—основы электротехники (автор Э. И. Расовский).
Часть вторая—электрические машины, аппараты и установки (авторы Ш. М. Алукер, И. А. Васильева,
Э. И. Расовский, П. Ф. Скворцов). Художник А. М. Меньшиков. Цена за обе части 90 руб.
Госэнергоиздат, 1950 и 1951.

За кафедрой основ электротехники Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства им. Молотова числятся серьезные заслуги в деле повышения наглядности преподавания. Еще до войны эта кафедра создала один из лучших в СССР демонстрационных кабинетов. Теперь коллектив кафедры выпустил альбом чертежей, обе части которого содержат $130 + 126 = 256$ листов формата 19×28 см с иллюстрациями к курсу электротехники.

Материал разбит на тринадцать глав: 1. Постоянный ток. 2. Электрическое поле. 3. Магнитное поле. 4. Переменный ток. 5. Трехфазный ток. 6. Электрические измерения. 7. Машины постоянного тока. 8. Трансформаторы. 9. Асинхронные машины. 10. Синхронные машины. 11. Электронные и ионные приборы. 12. Производство и распределение электрической энергии. 13. Электрическое освещение.

Эта номенклатура почти полностью совпадает с разделами программы для неэлектротехнических специальностей вузов, утвержденной МВО СССР в 1949 г. Однако по своему объему материал альбома шире предусмотренного программой.

Рецензируемое пособие по замыслу авторов «предназначено для широкого круга лиц, изучающих и преподающих электротехнику». Но студент, например, найдет в альбоме очень много рисунков, очень много готовых формул и почти никакого текста. Если авторы полагают, что пояснительным текстом к альбому должны служить записи лекций, то такая точка зрения должна быть решительно осуждена. Одна из важнейших задач высшей школы — научить студента читать литературу по своей специальности; обучение чтению естественно начинать с учебника. Обратившись к учебнику, студент найдет в нем все без исключения нужные ему формулы и немалую часть имеющегося в альбоме иллюстративного материала. Отсюда первый упрек авторам: ими недостаточно продуман вопрос об увязке альбома с имеющимися учебниками.

Назначение альбома не в том, чтобы заменить учебник, а в том, чтобы его дополнить. Часть материала неизбежно будет повторяться, но «сферы влияния» альбома и учебника все же могут быть разграничены. Цель альбома подкрепить изучаемый материал зрительными впечатлениями. Этой цели никак не служат таблицы вроде «Разветвленные цепи», где в один лист автор втиснул 7 схем, 24 формулы, 3 заглавия и 15 подрисунковых подписей.

Авторы полностью правы в том, что «сложные процессы в электрических цепях, в электрических машинах и аппаратах затруднительно изобразить наглядно на доске». Конечно, лекционная аудитория должна иметь экран, и показ очень многих рисунков, имеющих в альбоме, поможет и лектору, и студентам. Но заменить доску экран все-таки не может и не только потому, что без доски невозможен вывод формул. Доска бывает нужна и для чертежей, ибо педагогическая задача часто состоит не в том,

чтобы дать готовый чертеж, а в том, чтобы разъяснить последовательность его построения. В частности, это относится к векторным диаграммам, которых так много в альбоме.

Качество альбома в значительной мере определяется качеством рисунков, за что одинаково отвечают и автор, и художник. Очень хороши листы «Правило штопора» и «Обмотка якоря». Перегружены листы «э. д. с. статора и ротора асинхронного двигателя» и «Двигатели с вытеснением тока в роторе». Плохо отпечатан лист «Обмотка трансформаторов».

Альбом отпечатан в две краски. В иных случаях красный цвет усиливает наглядность рисунка, как, например, в листах «Зубчатый якорь», «Холостой ход трансформатора», «Индукционные приборы», но кое-где он способен вызвать лишь недоумение (см. например, кривую чувствительности электромагнитного прибора).

Текст дан весьма сжато, по большей части в форме кратких тезисов. Здесь должно быть взвешено каждое слово, и ответственность за ошибку очень велика. С этой точки зрения нельзя простить редактору альбома, согласившегося сохранить термин «эффективное значение». Неудачен термин «диэлектрическое сопротивление» для обозначения величины, обратной емкости. Непонятно, почему векторы электрического смещения и напряженности магнитного поля названы расчетными величинами — ведь расчеты производятся и с векторами плотности тока или магнитной индукции. Видимо, мысль автора состояла в том, что векторы D и H являются вторичными, поскольку они могут быть определены через другие электрические и магнитные величины, но это выражено весьма неудачно. Далее в одном месте (ч. I, гл. 4, табл. 32) изобретателем трансформатора назван Яблочков, в другом (ч. II, гл. 3, табл. 1) — Яблочков и Усагин. Нельзя согласиться с отождествлением понятий «полный ток» и «число ампервитков»: ток называется «полным» потому, что к токам проводимости прибавляются токи смещения.

В отношении единицы для электрической проводимости авторы правильно поступили, отказавшись от сименса (который не получил и международного признания). Но никак нельзя примириться с принятым авторами альбома и бессмысленным «мо»: нелепо читать слова в обратном порядке.

Общая оценка рецензируемого альбома такова: авторы проделали полезную работу, и ее результатом явилось наглядное пособие как для преподавания, так и для самообразования. В заключение выразим надежду, что авторы при переиздании своего труда используют возможности его улучшения.

Доктор техн. наук, проф. В. Ю. ЛОМОНОСОВ
Москва



Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

Издания 1952 г.

- Анисимов П. А. и Явич И. З. **ПОДВОДНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ**. Учебное пособие для ср. уч. завед. связи. Под ред. В. Н. Кулешова. Военмориздат. 311 стр., ц. 10 руб. 85 коп.
- АРМАТУРА ДЛЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. Сборник стандартов. Стандартгиз. 63 стр., ц. 5 р. 60 к.
- Балод Я. **МАЛЫЕ ГИДРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ**. Латгосиздат. Рига. 156 стр., ц. 4 руб. На латышском языке.
- Бахарев А. **СОЛНЕЧНАЯ ДОРОГА. ОЧЕРК О СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВОЛГО-ДОНСКОГО КАНАЛА**. 47 стр., ц. 85 коп. „Молодая гвардия“.
- Ведличко М. У ГОРЫ МОГУТОВОЙ. ОЧЕРК О СТРОИТЕЛЬСТВЕ КУЙБИШЕВСКОЙ ГЭС. 64 стр., ц. 1 руб. „Молодая гвардия“.
- Воскресенский В. Ф. **ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ И РЕМОНТ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВВОДОВ**. 76 стр., ц. 2 руб. 95 коп. Орггрэс. Госэнергоиздат.
- ВЫПРЯМИТЕЛЬ НА 2500 в С ЭЛЕКТРОННОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ТИПА ВСЭ-2500. Описание и инструкция по пользованию. 9 стр., бс-плата. МПСС.
- Гейлер Л. Б. и Дозоров Н. И. **АНГЛО-РУССКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ**. 736 стр., ц. 21 руб. 90 коп. Гостехиздат.
- ГОСТ 304-51. **ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ**. Технические условия. Срок введения I. IV. 1952. 10 стр., ц. 45 коп. Стандартгиз.
- Грекулов Л. Ф. **ВЕЛИКИЕ СТАЛИНСКИЕ СТРОЙКИ**. Под ред. А. Н. Ахутина. 120 стр., ц. 2 руб. Госполитиздат.
- Долин П. А., Хавин Н. З., Шуртов И. Г. **СБОРНИК ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРАВИЛ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ**. 520 стр., ц. 46 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.
- Ермолин Н. П. **ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА**. 191 стр., ц. 10 руб. 15 коп. Госэнергоиздат.
- Журавский В., Богма А. **РУСЛО ЖИЗНИ. ОЧЕРК О СТРОИТЕЛЬСТВЕ КАХОВСКОЙ ГЭС**. 48 стр., ц. 80 коп. „Молодая гвардия“.
- Зарва В. А. **МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ**. Под общ. ред. А. И. Берга. 112 стр., ц. 3 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.
- Золотарев Т. Л. **ВЕЛИКИЕ СТРОЙКИ КОММУНИЗМА**. Материалы к лекции. Госкультпросветиздат. 40 стр., ц. 1 руб.
- КАЛЕНДАРЬ-СПРАВОЧНИК „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“ НА 1952 г. Приложение к журналу „Электричество“. 240 стр., ц. Госэнергоиздат.
- Клименко Г. **ЛЕНИНСКО-СТАЛИНСКАЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СТРАН И ВЕЛИКИЕ СТРОЙКИ КОММУНИЗМА**. 100 стр., ц. 1 руб. 65 коп. Госполитиздат УССР, Киев. На украинском языке.
- Ковда В. А. **ВЕЛИКИЕ СТРОЙКИ КОММУНИЗМА И ИХ НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ**. 31 стр., 60 коп. Маргосиздат, Йошкар-Ола. На марийско-луг. языке.
- Константинов М. В. **ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С РЕЗИНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ**. Изд. 2-е, совершенно переработанное. 384 стр., 13 руб. 10 коп. Госэнергоиздат.
- Крылов Н. Н. **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ**. Учебное пособие для радиотехнических факультетов высших мореходных училищ. 522 стр., ц. 23 руб. 75 коп. Изд. „Морской транспорт“.
- Левашов В. А. **ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА КИРОВСКОЙ ОБЛАСТИ**. 56 стр., ц. 1 руб. 40 коп. Кировоблгиз.
- Лукомская А. М. **АЛЕКСАНДР СТЕПАНОВИЧ ПОПОВ**. Библиографический указатель. Под ред. К. И. Шафрановского. Вступительная статья М. А. Шателена. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. 298 стр., ц. 11 руб. 50 коп. Изд. АН СССР.
- МАТЕРИАЛЫ 3-ГО СОВЕЩАНИЯ ПО ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ПРИМЕНЕНИЮ СВЕТОСОСТАВОВ. Изв. АН СССР, серия физич., т. 15, № 5 и 6. Изд. АН СССР.
- Назмов В. В. **ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ В КОЛХОЗАХ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**. Иркутоблгиз. 56 стр., ц. 1 руб. 20 коп.
- ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ, т. 1, под ред. Б. Ф. Высотского и Е. Н. Майзельса. Перевод с английского. Изд. 2-е. 487 стр., ц. 17 руб. Оборонгиз.
- Перли С. Б. **БЫСТРОХОДНЫЕ ВЕТРЯНЫЕ ДВИГАТЕЛИ**. 216 стр., ц. 11 руб. 40 коп. Госэнергоиздат.
- ПРАВИЛА ПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ. Вводятся в действие с 1 января 1952 г. 40 стр., ц. 2 руб. 15 коп. Госэнергоиздат.
- ПРОГРАММА КУРСА „АВТОМАТИКА И ТЕЛЕМЕХАНИКА“, 8 стр., ц. 20 коп. Изд. „Советская наука“ МВО СССР.
- ПРОЕКТ ТИПОВЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР ДЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кв, ч. I. Пояснительная записка и чертежи 19 + 52 стр., ц. 25 руб. Главсельэлектро.
- ПРЕЙСКУРАНТ ОПТОВЫХ ЦЕН. Вводится в действие с 1 января 1952 г. ЦБТИ МЭП:
 № 2 на индивид. электр. машины, турбогенераторы, гидрогенераторы и запасные части к ним. 222 стр.
 № 4 на высоковольтную аппаратуру и запасные части к ней. 130 стр.
 № 6 на ртутные выпрямители (металлические и стеклянные) и запасные части к ним. 16 стр.
 № 7 на силовые и спец. трансформаторы, трансформаторы напряжения, реакторы, комплектные трансформаторные подстанции и запасные части к ним. 90 стр.
 № 8 на электросварочное оборудование и преобразователи высокой частоты для плавки и закалки металлов. 48 стр.
 № 10 на электроосветительную арматуру. 20 стр.
 № 15 на электроизоляционные изделия. 22 стр.
 № 16 на электропечи, высокочастотные установки и запасные части к ним. 71 стр.
 № 17 на магнитные сплавы и металлокерамические электроконтакты. 11 стр.
 № 18 на ремонт электродвигателей мощностью до 100 квт и электроизмерительных приборов. Вводится в действие с 1 января 1952 г. 8 стр.
- ПРЕЙСКУРАНТ ОПТОВЫХ ЦЕН НА ПРОДУКЦИЮ ЗАВОДОВ МЭС. 72 стр. Госэнергоиздат.
- ПРЕЙСКУРАНТ № 7 ОПТОВЫХ ЦЕН НА РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНУЮ АППАРАТУРУ И РАДИОПОЛУФАБРИКАТЫ. 11 стр. Оборонгиз.
- СБОРНИК ТАРИФОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ И ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ, отпускаемую районными энергоуправлениями, энергокомбинатами и электростанциями МЭС СССР. 96 стр., ц. 5 руб. Госэнергоиздат.
- Сифоров В. И. **РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА**. Изд. 4-е, переработанное. 648 стр., ц. 23 руб. Воениздат.
- СПРАВОЧНАЯ КНИЖКА РАДИОЛЮБИТЕЛЯ. Под ред. В. И. Шамшура. 320 стр., ц. 17 руб. Госэнергоиздат.
- СПРАВОЧНАЯ КНИЖКА ЭНЕРГЕТИКА НА 1952 г. 240 стр., ц. 12 руб. Госэнергоиздат.
- Стекольников И. С. **ЭЛЕКТРОННАЯ ОСЦИЛЛОГРАФИЯ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**. 259 стр., ц. 9 руб. 65 коп. Гостехиздат. „Физ.-матем. б-ка инженера“.
- ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ 7500 . . . 3 150 квт. Каталог. 15 стр., без цены. ЦБТИ МЭП.
- ТРУДЫ ВСЕСОЮЗНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СЕССИИ ПО ВОПРОСАМ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В С.-Х. ПРОИЗВОДСТВЕ, 1949 г. Киев. 172 стр., без цены. Госэнергоиздат.
- Трояновский В. В. **ЭЛЕКТРОЧАСОВЫЕ СИСТЕМЫ И МЕХАНИЗМЫ**. 240 стр., ц. 11 руб. 90 коп. Машигиз.
- Ферми Э. **ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА**. Пер. с англ. Изд. иностр. лит. 344 стр., ц. 19 руб. 20 коп.
- Хайкин С. Э. **СЛОВАРЬ РАДИОЛЮБИТЕЛЯ**. Под общ. ред. А. И. Берга. 320 стр., ц. 15 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.
- Хениш Г. **ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ**. Перевод с английского. П. В. Наследова. Изд. иностр. лит. 146 стр., ц. 9 руб. 75 коп.
- Химерик Ю. А. **СТРОИТЕЛЬСТВО ПЛОТИН КОЛХОЗНЫХ ПРУДОВ**. 135 стр., ц. 3 руб. 50 коп. Гостехиздат Украины, Киев. На украинском языке.
- Чеканов В. Д. **ОБЩАЯ И ГОРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**. Пособие для повышения квалификации среднетехнического персонала горнорудных предприятий. 336 стр., ц. 12 руб. 35 коп. Металлургия.
- Чернин А. Б. **КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**. 168 стр., ц. 8 руб. 45 коп. Госэнергоиздат.
- Шпольский Э. В. **АТОМНАЯ ФИЗИКА** т. 2. Электронная оболочка атома. Учебное пособие для вузов. Изд. 3-е, переработанное. 780 стр., ц. 20 руб. 40 коп. Гостехиздат.
- Эйгенсон Л. С. **МОДЕЛИРОВАНИЕ**. 372 стр., ц. 12 руб. 70 коп. Изд. „Советская наука“.
- ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. Сборник стандартов. 356 стр., ц. 18 руб. Стандартгиз.
- ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ. Труды ЛПИ им. Калинина. Сборник статей под ред. И. И. Кириллова. 224 стр., ц. 11 руб. Машигиз.
- Юрезанский В. У ГОРОДА ВЕЧНОЙ СЛАВЫ. ОЧЕРК О СТРОИТЕЛЬСТВЕ СТАЛИНГРАДСКОГО ГИДРОУЗЛА. 48 стр., ц. 85 коп. „Молодая гвардия“.
- Ярославцев В. **НА КАХОВСКОМ ПЛАЦДАРМЕ**. 144 стр., ц. 4 руб. 43 коп. Ужгород. Кн.-журн. изд.



К читательской конференции журнала „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

К предстоящей в 1952 г. конференции читателей журнала „Электричество“ редакция готовит специальное сообщение по отзывам и замечаниям, полученным от читателей.

Редакция обращается к Вам с просьбой заполнить настоящую анкету и отправить ее по указанному на обороте адресу.

1. Какие тематические разделы журнала Вас интересуют больше всего _____

2. Назовите 2—3 статьи, помещенные в журнале в 1951—1952 гг., понравившиеся Вам _____

3. Назовите статьи (1951—1952 гг.), которые Вы считаете неудачными _____

4. Какую помощь оказывает Вам журнал _____

5. Каким вопросам следует уделять в журнале большее место _____

6. Имеются ли у Вас замечания и пожелания по оформлению журнала (обложка, формат, шрифт, рисунки и т. п.) _____

Автор анкеты: Фамилия, имя и отчество _____

адрес _____, телефон _____,

Специальность _____, ученая степень _____

Место работы _____

должность _____.

Сколько лет читаете журнал „Электричество“ _____

„—“ _____ 1952 г.

(Подпись) _____

Л
и
и
н
я
о
т
р
е
з
а

МОСКВА

Главпочтамт, почт. ящик № 648

Редакции журнала

„ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ



ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

НА II ПОЛУГОДИЕ 1952 г.

НА ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

**Орган Академии наук СССР, Министерства электростанций СССР
и Министерства электропромышленности СССР**

Основан в 1880 г. Русским техническим обществом

Журнал рассчитан на широкие круги инженеров и научных работников, ведущих работу в различных областях электротехники.

В журнале широко освещаются основные теоретические и практические вопросы, связанные с развитием электротехники и электрификации народного хозяйства СССР.

Журнал ЭЛЕКТРИЧЕСТВО уделяет особое внимание вопросам внедрения новой передовой электротехники во всех отраслях народного хозяйства СССР.

В журнале освещаются новые научно-технические проблемы, связанные с вели-

чественными сооружениями Сталинской эпохи — Куйбышевской, Сталинградской, Каховской гЭС, Главным Туркменским каналом и другими энергетическими стройками.

В журнале систематически освещаются вопросы истории русской электротехники, печатаются рефераты и обзоры по отечественным и иностранным журналам и проводятся научно-технические дискуссии.

В журнале принимают участие виднейшие ученые и специалисты — электротехники Советского Союза.

12

**номеров
в год
(144 печ. листа)**

**Подписка на журнал
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
принимается во всех
отделениях Союзпечати
и во всех
почтовых отделениях**

**Подписная
цена на
6 мес.
48 руб.**