

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1948



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

6

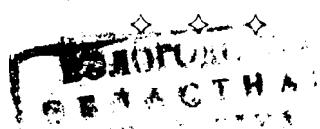
# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

6  
1948  
ИЮНЬ

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Задачи развития и гнедрения новой техники релейной защиты и автоматизации энергосистем	3
В. Л. Фабрикант и Г. Т. Грек—Дифференциальная токовая защита от замыканий на землю обмотки статора генератора	7
Г. И. Атабеков—Схемы включения трехфазных реле направления мощности	15
А. Б. Чернин—Расчет токов и напряжений для целей анализа релейной защиты при коротких замыканиях с одновременным обрывом фазы	20
А. А. Горев и Б. М. Рябов—Импульсные характеристики линейной изоляции	26
А. С. Зингерман—Построениеvoltсекундных характеристик изоляции	30
Н. Н. Линниченко—Термодинамические эффекты, вызываемые электрической дугой в воздушном выключателе	36
А. П. Златковский—Вопросы оборудования сельских электрических установок	42
Авторефераты	
М. И. Крайцберг—Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока с помощью дросселей насыщения	48
Н. А. Поляк—Новая векторная диаграмма турбогенератора	50
Л. И. Столов—Влияние переходных электромагнитных процессов на динамику пуска короткозамкнутого двигателя	54
Л. Б. Гейлер—Продолжительность нарастания магнитного потока в цепях со сталью	57
Г. И. Штурман—К теории асинхронного двигателя с дуговым или плоским статором	58
А. П. Беляков—Емкость и сопротивление растеканию тока в случае сферических и цилиндрических электродов в однородной среде	60
Е. И. Дмитриев—Мостовая схема в качестве счетно-решающего устройства	62
А. Д. Нестеренко—Трехфазные фазометры	64
Дискуссии	
К статье В. М. Синькова „Об экономических основах распределения нагрузки между электростанциями“	68
К 50-летию со дня смерти В. Н. Чиколева	
И. Д. Артамонов—Расчет распределения силы света прожектора по методу В. Н. Чиколева и развитие этого метода	71
Из воспоминаний В. В. Запольной о В. Н. Чиколеве	77
Обзоры и рефераты	
А. Б. Крикунчик—Новые турбогенераторы на тепловых электростанциях США	80
В. Т. Ренне—Диэлектрические свойства титанатов бария и стронция	82
Хроника	
Конференция читателей журнала „Электричество“ в Москве	83
Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР (диссертации)	87
Томский политехнический институт им. Кирова (диссертации)	89
Соревнование энергетиков по досрочному выполнению пятилетки	90
Экономия и нормирование расхода электроэнергии в текстильной промышленности	91
Профессор А. А. Горев. К 40-летию научной, педагогической и инженерной деятельности	92
Заметки и письма	
Ю. Л. Мукосяев—Устаревший стандарт тормозит развитие электрохозяйства страны	93
Библиография	
М. А. Шателен—Первый том „экспериментальных исследований по электричеству“ М. Фарадея.	94
Г. И. Штурман—Книга Г. Н. Петрова „Электрические машины“	95



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Доктор техн. наук, проф. **Г. Н. Петров** (редактор), академик **А. И. Берг**,  
доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Буткевич**, доктор техн. наук, проф. **А. А. Гла-  
зунов**, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик **В. Ф. Миткевич**,  
канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**

Секретарь редакции инж. **Я. А. Климовицкий**

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80.  
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 618.  
Адрес для телеграмм: Москва Электричество

# Задачи развития и внедрения новой техники релейной защиты и автоматизации энергосистем

Задачи внедрения автоматизации в производственные процессы электрических станций, сетей и подстанций неоднократно занимали важное место в решениях высших партийных и советских органов по вопросам развития электрификации народного хозяйства.

XVIII съезд ВКП(б) принял решение: «Широко внедрить новейшую энергетическую технику, высокое давление и перегрев пара, применение новейших теплофикационных турбин и автоматизацию основных производственных процессов электростанций и сельского хозяйства».

Закон о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР вновь поставил перед советскими энергетиками задачу: «Широко развернуть работы по автоматизации производственных процессов электростанций и электросетей; в первую очередь проводить полную автоматизацию работы гидроэлектростанций».

В общем комплексе средств автоматизации, предназначенных для повышения качества электроэнергии и обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей, центральное место занимает техника релейной защиты и электроавтоматики энергосистем. Предупреждая развитие аварий и пресекая возможность распространения связанных с авариями повреждений, релейная защита вместе с устройствами электроавтоматики является важным звеном в техническом оснащении наших энергосистем.

Вопросами техники релейной защиты советские инженеры стали заниматься с самого начала электрификации страны. Начальный период работ в этой области характеризуется созданием первых служб релейной защиты в Ленэнерго и Мосэнерго, выпуском первых отечественных реле и накоплением эксплуатационного, проектного и научно-исследовательского опыта. К этому пери-

оду относится появление в СССР первых книг по релейной защите: В. И. Иванова (Реле и релейная защита, 1932), Н. Ф. Марголина и Н. И. Шиферсона (Защита генераторов и агрегатов генератор — трансформатор, 1932) и др. В этот же период были начаты многочисленные теоретические и экспериментальные научно-исследовательские

работы, проводившиеся в ВЭИ, ВЭО, ТЭП, Оргрэс, Ленэнерго, Мосэнерго, в лаборатории им. Смуррова и других организациях.

Начальный этап накопления опыта завершился выпуском в свет в 1933 г. Теплоэлектро-проектом первых руководящих указаний по защите генераторов, трансформаторов и агрегатов генератор — трансформатор. Весь последующий период, предшествовавший началу Великой Отечественной войны, отмечен дальнейшей рационализацией и стандартизацией проектирования, производства и эксплуатации релейных защит на базе отечественных разработок. Были освоены многочисленные типы и серии реле и разработаны оригинальные советские конструкции различных видов защиты: дифференциальной защиты трансформаторов с помощью блокирующих реле индукционного типа ИТ-27 и реле с тормозными катушками типа ИТ-156 и КР-12F; дистанционной защиты линий электропередачи с помощью импедансных реле типа ИИ-120, реактивных реле типа ИР-105 и т. д.

В результате большой работы, проделанной работниками ХЭМЗ, весьма расширилась номенклатура аппаратуры релейной защиты и электроавтоматики. В свою очередь персоналом служб релейной защиты энергосистем была проведена большая работа по внедрению новых защит в эксплуатацию.

На базе отечественного производства Теплоэлектропроектом были разработаны «Руководящие указания по релейной защите», изданные в 1937 и 1939 гг. В мировой технической лите-

ратуре отсутствуют подобного рода фундаментальные труды по релейной защите, содержащие типовые схемы и методы расчета защит.

В результате большого опыта, накопленного в СССР научно-исследовательскими, производственными, проектными, наладочными и эксплуатационными организациями, техника релейной защиты развилась в специальную отрасль электротехники, представленную в высших учебных заведениях в виде отдельной специализации и соответствующих кафедр и имеющую обширную учебную и научную литературу. К этому периоду относится появление ряда трудов по релейной защите: Е. А. Карповича (Высокочастотная защита линий электропередачи, 1935), Л. Е. Соловьева и А. М. Федосеева (Релейная защита, 1938), В. В. Майвалдова, В. Е. Казанского и В. К. Спиридонова (Электромонтер релейной службы, 1936).

Быстрейшее развитие работ в области релейной защиты и автоматизации электрических станций, сетей и подстанций было определено решениями XVIII съезда ВКП(б). Технический отдел НКЭС занялся массовым внедрением в эксплуатацию быстродействующих защит (токовых отсечек, дифференциальных, высокочастотных и других защит), устройств автоматического повторного включения линий электропередачи и автоматического регулирования возбуждения электрических машин, что обеспечило значительное повышение надежности электроснабжения потребителей, бесперебойности и устойчивости работы энергосистем. В свою очередь электропромышленность приступила к комплектной поставке устройств защиты и электроавтоматики.

В журнале «Электрические станции» началась систематическая публикация разделов «Руководящих указаний по релейной защите», разрабатываемых Теплоэлектропроектом. В свет вышли новые учебные пособия: Е. Д. Зейлидзона (Релейная защита, 1940), Ф. А. Ступеля (Реле защиты и автоматики, 1941) и др. В журнале «Электричество» усилилось освещение проблем техники релейной защиты и автоматизации энергосистем. Инженерно-технические кадры в области релейного дела пополнились значительным числом специалистов, прошедших курсы повышения квалификации.

Период Великой Отечественной войны явился для всех советских специалистов релейной защиты экзаменом, выдержаным ими с честью. Они сумели приспособить релейную защиту к потребностям работы энергосистем в сложных и трудных условиях военного времени. Следует особо отметить успешную работу персонала служб релейной защиты, проведенную в военных условиях при воздушных налетах противника (Мосэнерго, Ленэнерго, Горэнерго, Ярэнерго и др.), в условиях блокады (Ленинград), при быстром росте мощностей и высоковольтных сетей (Урал, Кемерово, Узбекистан). Благодаря мерам, принятым релейщиками, случаи неправильного действия релейной защиты из-за ударов и вибраций при взрывах авиабомб в райо-

нах, подвергшихся воздушным налетам, были единичными.

Годы Великой Отечественной войны ознаменовались широким внедрением устройств электроавтоматики в энергосистемах и дальнейшим внедрением простых, быстродействующих защит. Идея пофазного отключения и повторного автоматического включения, заревшая еще до войны, была претворена в жизнь в начале войны в системе Кемеровэнерго. Положительный опыт, достигнутый в этой области, распространен в последующем на ряд других энергосистем. В этот период был написан и издан учебник по релейной защите М. Ф. Кострова, И. И. Соловьева и А. М. Федосеева (Основы техники релейной защиты, 1944), выпущена директивная часть «Руководящих указаний по релейной защите» и разработаны типовые схемы и примеры расчетов защит.

Послевоенный период отмечен дальнейшим развитием техники релейной защиты и автоматизации энергосистем. Большая работа проведена по восстановлению релейной защиты и электроавтоматики в районах, находившихся в зоне военных действий или бывших оккупированными противником (Сталинград, Донбасс, Ростов, ДнепроГЭС и т. д.). Следует также отметить не менее важную работу Министерства электростанций по мобилизации служб релейной защиты энергосистем на быстрое внедрение и освоение новой техники.

Многочисленные изобретения и рационализаторские предложения, в большом количестве поступающие от инженеров и научных работников в области релейной защиты и автоматики, творческая работа лабораторий и служб защиты на местах, в энергосистемах, успехи, достигнутые в исследовательских организациях (ЦНИЭЛ, ТЭП, ЦЛЭМ Мосэнерго и др.), свидетельствуют о том, что наша страна располагает кадрами высококвалифицированных специалистов релейного дела. Эти кадры непрерывно пополняются выпусками молодых инженеров и техников, оканчивающих втузы и техникумы по специальности «Релейная защита и автоматизация энергосистем». Одновременно ведется подготовка кадров высококвалифицированных научных работников в области релейной защиты и автоматизации энергосистем по линии аспирантуры МЭИ, ЦНИЭЛ и других институтов. Из опубликованных в послевоенное время работ по новой технике релейной защиты можно отметить книгу Г. И. Атабекова и А. М. Федосеева (Современная релейная защита, 1948).

За последние годы проведен ряд расширенных научно-технических совещаний, посвященных релейной защите и автоматизации энергосистем. Совещания проходили под знаком активного участия новаторов новой техники, добившихся массового внедрения устройств защиты и автоматики (АПВ, АВР, АРН и т. д.), в масштабах, превосходящих то, что делается в данной области за границей. Эти совещания обобщили богатый эксплуатационный опыт, который

должен быть полностью учтен министерствами электростанций и электропромышленности и работниками служб релейной защиты на местах.

Статистика работы релейной защиты в энергосистемах Министерства электростанций свидетельствует о неуклонном повышении качества работы защиты по годам: в 1944 г. зарегистрировано 97,8% случаев правильного действия защиты, в 1945 г. — 98,4%, 1946 г. — 98,9%. В период с 1944 г. по 1946 г. имело место свыше 3 500 случаев работы устройства АПВ, причем к концу 1946 г. уже эксплуатировалось более 1 200 устройств. Доличество удачных включений ежегодно составляло около 60% от общего числа включений<sup>1</sup>.

Наряду с положительными показателями работы релейной защиты и электроавтоматики следует отметить все еще имеющие место случаи, неправильной работы защиты и электроавтоматики, значительная часть которых оказывается вызванной недостатками эксплуатации. Ошибки эксплуатационного персонала обуславливают около 40% всех неправильных действий, а с учетом прочих причин, зависящих от служб релейной защиты, эта цифра возрастает до 80%.

Дальнейшее развитие релейной защиты и автоматизации электрической части станций, сетей и подстанций должно идти в направлении усовершенствования методов эксплуатации существующих устройств защиты и электроавтоматики и внедрения новой техники. В этой большой работе существенное место должно занимать детальное изучение и анализ работы релейной защиты и электроавтоматики в энергосистемах. Обобщение эксплуатационного опыта в сочетании с теоретической и лабораторной работой должно служить основой оценки эффективности тех или иных практических мероприятий.

Следует признать в этой связи недостаточным обмен опыта между энергосистемами; издание информационных писем, инструкций, сборников по релейной защите и автоматизации энергосистем и технической документации поставлено неудовлетворительно. Со дня окончания войны до настоящего времени еще не организованы постоянно действующие курсы по подготовке и усовершенствованию специалистов релейной защиты и электроавтоматики (с краткосрочным отрывом от производства).

Задача усовершенствования методов эксплуатации существующих устройств защиты и автоматики требует разработки и внедрения более совершенных методов эксплуатационных проверок, повышения качества монтажа и выполнения его с учетом удобств эксплуатации. Наконец, требуется обеспечить энергосистемы необходимым количеством запасных частей для устройств защиты и автоматики. Наряду с выпуском массовым тиражом типовых программ, инструкций и форм проверки устройств защиты и автомати-

ки необходима разработка руководящих указаний по выполнению вторичной коммутации (технические условия на элементы вторичной коммутации и правила монтажа). Необходимо широко внедрять устройства контроля состояния цепей вторичной коммутации, контроль изоляции, целостности предохранителей и т. д.

На заводах МЭС необходимо организовать производство устройств и приборов для испытания релейной защиты и электроавтоматики (нагрузочные устройства, комплектные устройства для проверки защит, приборы для замеров токов небаланса и т. д.).

Повышение культуры эксплуатации требует широкого применения автоматических приборов для регистрации аварийных процессов в энергосистемах.

Задача широкого внедрения новой техники требует оснащения систем новыми типами устройств и аппаратов и проведения мероприятий, опробованных в отдельных энергосистемах или в лабораториях.

В настоящее время отдельными организациями накоплен значительный опыт по усовершенствованию старых и созданию новых конструкций и типов защиты и электроавтоматики. К числу таких новых технических мероприятий и конструктивных решений относятся: новая защита генераторов от замыканий на землю; дифференциальная защита генераторов с промежуточным насыщающимся трансформатором; дифференциальные отсечки силовых трансформаторов с промежуточными насыщающимися трансформаторами; фильтровая направленная высокочастотная защита с пуском передатчика токами высокой частоты; быстродействующая высокочастотная защита с мгновенным двухсторонним замером знака мощности отрицательной последовательности; односистемные дистанционные защиты (импедансные и реактивные); устройства для пофазного АПВ и др.

Вместе с тем, учитывая большой технический эффект, достигнутый в результате массового применения устройств форсировки возбуждения, разгрузки по частоте, автоматического включения резервов и модернизации защиты собственных нужд, необходимо обеспечить стопроцентное внедрение этих мероприятий во всех системах.

Дальнейшее развитие релейной защиты и автоматизации энергосистем ставит перед советскими специалистами задачу научной и инженерной разработки новых принципов и новых конструкций, в этой области техники.

Еще до начала Великой Отечественной войны советская релейная техника на ряде участков опережала заграничную технику. Так, например, устройства, предотвращающие неправильные действия защит при качаниях, основанные на разности скоростей изменения электрических величин при коротких замыканиях и качаниях, были изобретены и широко внедрены в СССР задолго до того, как они стали применяться заграничными фирмами. То же следует

<sup>1</sup> См. статью Е. Д. Зейлидзона, Эл. станции, № 12, 1947.

сказать и об устройстве для выбора поврежденной фазы в системе с фазным отключением, которое основано на применении трех реле направления мощности, включенных на ток нулевой последовательности. Это устройство изобретено в СССР в 1939 г. и выпущено американскими фирмами значительно позже.

В области разработки фильтров и фильтровых защит советская релейная техника обогнала заграничную и в настоящее время у нас имеется немало новых, оригинальных решений и технических предложений, успешно прошедших стадию начальных испытаний. К числу таких разработок относятся: фильтровая защита генератора от сверхтоков; новая сверхбыстро действующая направленная высокочастотная защита; дифференциально-фазная высокочастотная защита и др.

Министерство электростанций должно добиться скорейшего испытания новых устройств в условиях эксплоатации и совместно с Министерством электропромышленности обеспечить дальнейшее их освоение.

В связи с общим прогрессом техники релейной защиты и автоматизации энергосистем и опы-

том эксплоатации, накопленным за последние годы, на очереди стоит вопрос о пересмотре директивной части руководящих указаний по релейной защите, переработке устаревших руководящих указаний по АПВ и создании новых руководящих указаний, комплексно сочетающих вопросы релейной защиты и автоматизации электрической части станций, сетей и подстанций.

Успешное выполнение задач послевоенной сталинской пятилетки, в части, касающейся релейной техники и электроавтоматики, может быть обеспечено лишь совместными усилиями работников энергосистем, заводов электроаппаратостроения и научно-исследовательских организаций. Необходимо кроме того ускорить создание специализированных заводов релейной аппаратуры, измерительных приборов и монтажно-установочных материалов.

Энергосистемы Советского Союза должны быть оснащены наиболее совершенной надежной и быстродействующей аппаратурой релейной защиты и электроавтоматики.



# Дифференциальная токовая защита от замыканий на землю обмотки статора генератора

Кандидат техн. наук В. Л. ФАБРИКАНТ и инж. Г. Т. ГРЕК

Теплоэлектропроект

**Введение.** До настоящего времени для защиты обмотки статора мощных генераторов от замыканий на землю применялась в основном защита максимальной мощности нулевой последовательности с компенсацией тока небаланса. Дифференциальная токовая защита нулевой последовательности, несмотря на относительную простоту выполнения, надежность и быстродействие, не находила применения для мощных генераторов. Это объясняется тем, что при малых величинах тока замыкания на землю мощность, отдаваемая трансформаторами тока, недостаточна для приведения в действие токовых реле существующих типов, даже наиболее чувствительных; чувствительность токовой защиты получалась ниже, чем защиты максимальной мощности.

Увеличение мощности, отдаваемой трансформаторами тока, может быть достигнуто при помощи предложенного В. Е. Казанским [Л. 1] включения конденсатора последовательно с обмоткой реле. Расчеты и испытания токовой защиты от замыканий на землю производились независимо на заводе и в Теплоэлектропроекте. На заводе работа производилась для схемы без включения конденсатора.

Расчеты и испытания, проведенные в лаборатории Теплоэлектропроекта, показали, что подбор сопротивления реле и конденсатора позволяет значительно увеличить мощность, отдаваемую трансформаторами тока. Однако, для выполнения токовой защиты, равноценной по чувствительности защите максимальной мощности, потребовалось несколько снизить потребление реле, что было осуществлено путем переделки реле серии ЭТ.

Опыт эксплуатации защиты от однофазных замыканий на землю обмотки статора генераторов при помощи реле мощности нулевой последовательности с включением токовой обмотки по дифференциальной схеме с компенсацией тока небаланса выявил ряд присущих этой схеме недостатков. Дифференциальная токовая защита нулевой последовательности, обладающая рядом преимуществ, не находила применения для мощных генераторов из-за невозможности выполнения ее достаточно чувствительной при применении токовых реле существующих типов. Приведены результаты разработки данной защиты, проведенной авторами в Теплоэлектропроекте по заданию Технического отдела Министерства электростанций. Дано сравнение чувствительности защиты максимальной мощности и токовой защиты; показано, что токовая защита может быть выполнена более чувствительной, чем защита с реле мощности. Сделано сравнение способов повышения мощности, отдаваемой трансформаторами тока, и даны рекомендации в отношении применения схем с включением конденсаторов последовательно с обмоткой реле. Даны методика и пример расчета защиты.

**Сравнение чувствительности защиты максимальной мощности с компенсацией тока небаланса и дифференциальной токовой защиты нулевой последовательности.** Существующий способ расчета защиты максимальной мощности нулевой последовательности с компенсацией тока небаланса основан на представлении тока трогания защиты  $i_{3mM}$  (рис. 1) в виде суммы тока трогания реле мощности  $i_{pmt}$  и тормозного тока  $i_t$ , компенсирующего ток небаланса. Мощность трогания реле  $P_{pmt}$  и тормозной ток  $i_t$  подбираются так, чтобы при расчетном коэффициенте полноты замыкания на землю  $b = b_{расч}$  имел место минимум  $i_{3mM}$ , чему соответствует минимум тока замыкания на землю  $I_{3расч}$ . Минимальный ток трогания защиты выбирается из условия селективности:

$$i_{3mM} \geq k_n i_{n6}$$

где  $k_n$  — коэффициент надежности;  $i_{n6}$  — расчетный ток небаланса при токе трогания блокировки. Точка пересечения характеристики  $i_{3mM} = f(b)$  с прямой  $i_p = f(b)$ , где  $i_p$  — ток в обмотке реле, определяет коэффициент полноты замыкания на землю  $b$  или часть незащищенных витков.

Предполагая, что при выполнении дифференциальной токовой защиты нулевой последовательности ток небаланса не изменяется и блокировка защиты при сверхтоках выполнена аналогично, ее ток трогания защиты по условию селективности при том же коэффициенте надежности

$$i_{3mt} = k_n i_{n6}$$

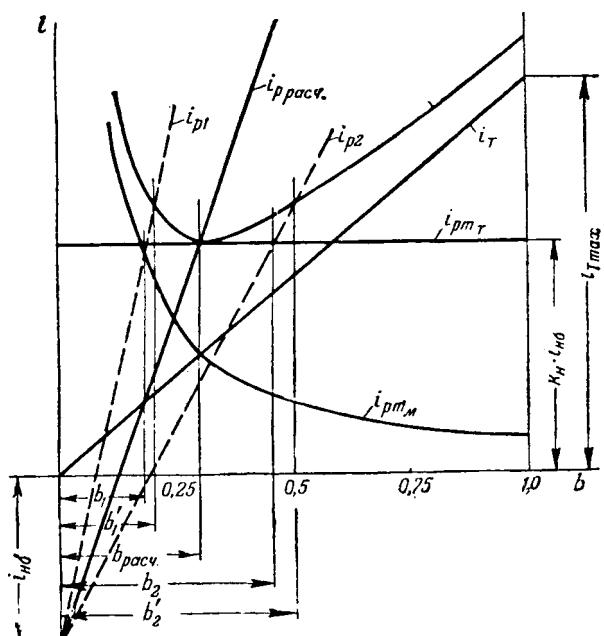


Рис. 1. Сравнительный график основных соотношений для защиты максимальной мощности и дифференциальной токовой защиты.

$i_{1нб}$  — расчетный ток небаланса;  $i_{p_{mT}}$  — ток трогания реле мощности;  $i_{1mT} = i_{p_{mT}} + i_T$  — ток трогания защиты максимальной мощности;  $i_T$  — тормозной ток защиты максимальной мощности;  $i_{p_{mM}}$  — ток трогания защиты максимального тока;  $i_{p_{расч}}$  — ток в реле при  $I_3 = I_3 \text{расч}$ ;  $i_{p1}$  — ток в реле при  $I_3 > I_3 \text{расч}$ ;  $i_{p2}$  — ток в реле при  $I_3 < I_3 \text{расч}$ ;  $b_1, b_1', b_{расч}, b_2, b_2'$  — коэффициенты полноты замыкания на землю при трогании защиты

Если обе защиты будут иметь параметры, соответствующие расчетным условиям, то при расчетном токе замыкания на землю, одинаковом для обоих случаев, будет иметь место одинаковая чувствительность защит. При отклонении тока замыкания на землю от расчетного (прямые  $i_{p1}$  и  $i_{p2}$ ) защита максимальной мощности оказывается несколько грубее, так как  $b_1 < b_1'$  и  $b_2 < b_2'$ . То же будет и при отклонении тока небаланса от расчетного. Таким образом, принципиально токовая защита оказывается более чувствительной. Подсчет мощности, выделяемой в обмотке токового реле при трогании защиты, дает весьма малые величины, значительно меньшие, чем потребление существующих типов реле, в связи с чем токовая защита с применением таких реле не может быть выполнена чувствительной.

**Токи небаланса в схеме защиты и чувствительность защиты.** Чувствительность защиты от замыканий на землю ограничивается величиной тока небаланса. Ток небаланса трех трансформаторов тока, соединенных в схему фильтра токов нулевой последовательности, определяется их типом, первичным током и сопротивлением нагрузки.

Заводом-изготовителем указывается ток небаланса во вторичной цепи —  $i_{1нб}$ . Для удобства расчетов необходимо ввести понятие<sup>1</sup> о первич-

ном токе небаланса —  $I_{1нб}$ , под которым подразумевается ток, который необходимо пропустить по первичной обмотке одного из трансформаторов тока схемы фильтра токов нулевой последовательности, чтобы в цепи вторичной нагрузки протекал ток, равный вторичному току небаланса. Первичный ток небаланса не зависит от величины и характера вторичной нагрузки. Действительно, если предположить, что при нагруженных трансформаторах тока, а следовательно, при протекании по цепи нагрузки вторичного тока небаланса, в первичную обмотку одного из трансформаторов тока схемы фильтра токов нулевой последовательности вводится ток, который обуславливает во вторичной цепи ток, равный и противоположно направленный по отношению к вторичному току небаланса, то суммарный ток в цепи нагрузки будет равен нулю. В соответствии с принятым положением ток, вводимый в первичную обмотку трансформатора тока в рассматриваемом режиме, и есть первичный ток небаланса. Суммарный ток в цепи нагрузки равен нулю, поэтому при изменении сопротивления нагрузки этот ток попрежнему будет равен нулю, причем первичный ток небаланса в этом случае не изменяется. Следовательно, первичный ток небаланса не зависит от величины вторичной нагрузки и определяется типом трансформаторов тока и их первичным током.

Испытания подтвердили это положение. Зная вторичный ток небаланса, коэффициент трансформации и коэффициент отсоса, можно определить первичный ток небаланса (см. приложение).

При выполнении защиты необходимо выбрать ее первичный ток трогания  $I_{1mT}$  — ток трогания реле, приведенный к первичной цепи, по условию селективности:

$$I_{1mT} = k_n I_{1нб}. \quad (1)$$

Если потребление реле не лимитировано, то выбором оптимальных параметров защиты обусловлена возможность применения более грубого реле, причем чувствительность защиты не может быть выше величины, определенной по условию (1). В том случае, когда задан определенный тип реле и его потребление при трогании слишком велико для обеспечения чувствительности по условию (1), выбор оптимальных параметров обеспечивает максимально возможную чувствительность защиты.

**Способы повышения мощности, отдаваемой трансформаторами тока.** Выбором оптимального сопротивления обмотки реле максимального тока можно обеспечить условия, при которых выделяемая в ней мощность будет максимальной. Для одиночного трансформатора условию максимума мощности соответствует равенство полного сопротивления обмотки реле и полного сопротивления трансформатора тока, замеренного со стороны вторичной обмотки. Для упрощения полное сопротивление намагничивания трансформатора тока и его импедансный угол могут быть приняты неизменными. Это допустимо потому, что, как правило, расчетным случаем при опре-

<sup>1</sup> Впервые понятие о первичном токе небаланса было дано А. М. Бреслером [Л. 4].

делении чувствительности защиты является режим нагруженного генератора, когда полное сопротивление трансформаторов тока задано током нагрузки и наложение тока замыкания на землю существующими методами расчета не учитывается.

Обозначим  $\dot{Z}_{0t} = Z_0 + Z''_t$ ,

где  $\dot{Z}_0$  — полное сопротивление цепи намагничивания;

$Z''_t$  — полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$\varphi_{0t}$  — импедансный угол сопротивления  $\dot{Z}_{0t}$ . Оптимальное сопротивление обмотки реле  $Z_p = Z_{0t}$ .

Мощность, выделяемая в обмотке реле в этом случае,

$$P_{p \max} = i_1^2 Z_0 \frac{Z_0}{2Z_{0t} [1 + \cos(\varphi_{0t} - \varphi_p)]}. \quad (2)$$

Учитывая, что  $Z''_t$  мало по сравнению с  $Z_0$ , можно принять  $Z_{0t} = Z_0$  и  $\varphi_{0t} = \varphi_0$  и соответственно

$$P_{p \max} = i_1^2 Z_0 \frac{1}{2 [1 + \cos(\varphi_0 - \varphi_p)]}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что чем больше  $\varphi_0$  отличается от  $\varphi_p$ , тем больше  $P_{p \max}$ .

Для трансформатора тока с включением последовательно с обмоткой реле конденсатора (компенсированная схема) условию максимума  $P_p$  соответствует: а) равенство активного сопротивления обмотки реле  $R_p$  и активной составляющей сопротивления  $Z_0$  ( $R_p = R_0$ ); б) равенство емкостного сопротивления конденсатора  $x_c$  сумме реактивного сопротивления обмотки реле  $x_p$  и реактивной составляющей сопротивления  $Z_0$  ( $x_c = x_p + x_0$ ).

Таким образом, для получения максимума мощности необходимо выполнить условие резонанса напряжений в контуре, состоящем из последовательно включенных сопротивлений  $Z_p$ ,  $x_c$  и  $Z_0$ .

При оптимальном значении  $x_c$  и  $Z_p$  получается:

$$P'_{p \max} = i_1^2 Z_0 \frac{1}{4 \cos \varphi_0 \cos \varphi_p}. \quad (4)$$

Для оценки эффективности включения конденсатора сопоставим выражения (3) и (4). Обозначим через  $k_p$  отношение максимальных значений мощности в обеих схемах, тогда

$$k_p = \frac{P'_{p \max}}{P_{p \max}} = \frac{1 + \cos(\varphi_0 - \varphi_p)}{2 \cos \varphi_0 \cos \varphi_p}. \quad (5)$$

Угол  $\varphi_0$  определяется типом трансформатора тока (в среднем изменяется в пределах от  $60^\circ$  до  $80^\circ$ ); угол  $\varphi_p$ , определяется типом токового реле (для реле серии ЭТ угол  $\varphi_p \approx 60^\circ$ ). Для частного случая  $\varphi_0 = \varphi_p = 60^\circ$ ,  $k_p = 4$ . Для значений  $\varphi_0 > 60^\circ$  соответственно возрастает  $k_p$ , так, например, при  $\varphi_0 = 80^\circ$ ,  $k_p = 11$ .

Из приведенного очевидна эффективность включения конденсатора с точки зрения увеличения мощности трогания (загрузления) применяемого реле.

Принципиально возможно выполнить компенсированную схему с включением конденсатора параллельно обмотке реле. В этом случае максимальной отдаче мощности соответствует условие резонанса токов:  $b_c = b_p + b_{0t}$ , где  $b_c$  — проводимость конденсатора,  $b_p$  — реактивная проводимость обмотки реле,  $b_{0t}$  — реактивная проводимость трансформатора тока со стороны вторичной обмотки. По этому же условию  $g_p = g_{0t}$ , т. е. должно иметь место равенство активных проводимостей обмотки реле и трансформатора тока со стороны вторичной обмотки.

Величины  $P_{p \max}$  для схемы с последовательным и параллельным включением конденсаторов одинаковы, однако первой надо отдать предпочтение, так как для ее выполнения, как правило, требуется конденсатор меньшей емкости; с эксплуатационной точки зрения первая схема также лучше, так как при пробое конденсатора защита только

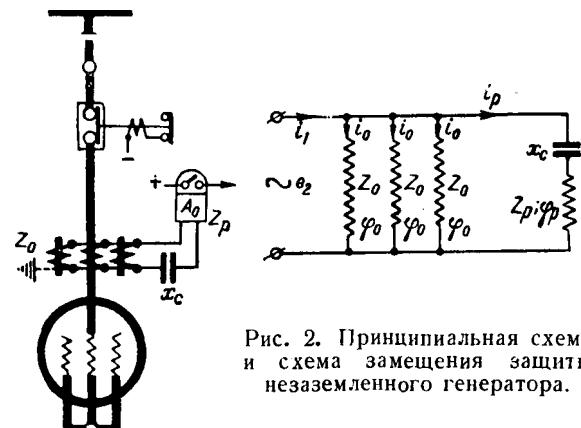


Рис. 2. Принципиальная схема и схема замещения защиты незаземленного генератора.

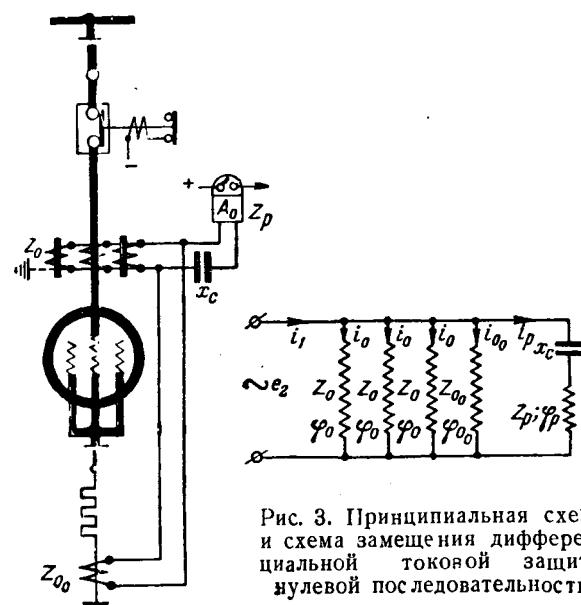


Рис. 3. Принципиальная схема и схема замещения дифференциальной токовой защиты нулевой последовательности.

загрублется, а по второй схеме защита выводится из действия. Таким образом, схему защиты целесообразно выполнять компенсированной с последовательным включением конденсатора.

Приведенные соотношения могут быть распространены на компенсированные схемы токовой защиты от замыканий на землю генераторов, выполненные в виде схемы фильтра токов нулевой последовательности или дифференциального фильтра.

На рис. 2 приведены принципиальная схема защиты и схема замещения для генератора с незаземленной и на рис. 3 для генератора с заземленной нулевой точкой. На рис. 4 приведена принципиальная схема и схема замещения общей дифференциальной токовой защиты генератора от междуфазовых замыканий и замыканий на землю.

Выражения для одиночного трансформатора можно распространить на эти схемы, подставив вместо  $Z_0$  эквивалентное сопротивление  $Z_9$ , которое для схемы рис. 2 составляет:

$$Z_9 = \frac{Z_0}{3}, \quad (6)$$

для схемы рис. 3

$$Z_9 = \frac{Z_0}{\frac{Z_0}{Z_0} + 3}. \quad (7)$$

Для схемы рис. 4, пренебрегая сопротивлением соединительных проводов,

$$Z_9 = \frac{Z_0}{6}. \quad (8)$$

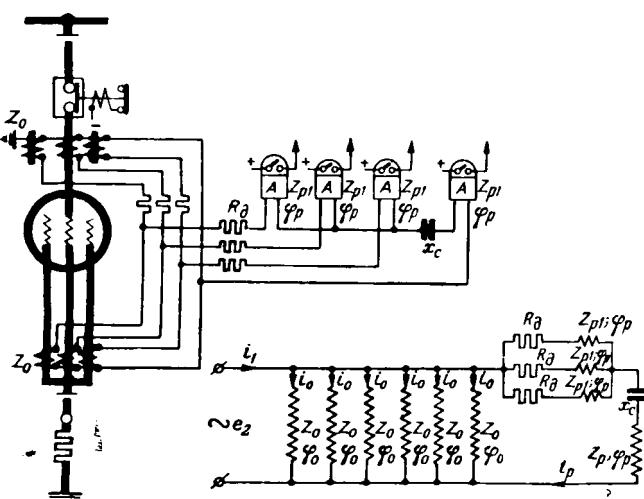


Рис. 4. Принципиальная схема и упрощенная схема замещения общей дифференциальной токовой защиты генератора.

Для схемы рис. 2 после подстановки и преобразований при принятом упрощении  $Z_{0t} = Z_0$ , получим:

$$x_c = Z_0 \frac{\sin(\varphi_p + \varphi_0)}{3 \cos \varphi_p}, \quad (9)$$

$$Z_p = Z_0 \frac{\cos \varphi_0}{3 \cos \varphi_p} \quad (10)$$

$$P_{p \max} = i_1^2 Z_0 \frac{1}{12 \cos \varphi_0 \cos \varphi_p}. \quad (11)$$

Для схемы рис. 3 после аналогичных преобразований в предположении равенства импедансных углов фазных и нулевого трансформаторов тока получим:

$$x_c = Z_0 \frac{\sin(\varphi_p + \varphi_0)}{\left(\frac{Z_0}{Z_{00}} + 3\right) \cos \varphi_p}, \quad (12)$$

$$Z_p = Z_0 \frac{\cos \varphi_0}{\left(\frac{Z_0}{Z_{00}} + 3\right) \cos \varphi_p} \quad (13)$$

$$P_{p \max} = i_1^2 Z_0 \frac{1}{4 \left(\frac{Z_0}{Z_{00}} + 3\right) \cos \varphi_0 \cos \varphi_p}. \quad (14)$$

Для схемы рис. 4 после преобразований в предположении равенства импедансных углов фазных и нулевого реле получим:

$$x_c = \frac{Z_0 \sin(\varphi_p + \varphi_0) - 2 R_\partial \sin \varphi_p}{6 \cos \varphi_p}, \quad (15)$$

$$Z_p = \frac{Z_0 \cos \varphi_0 - 2 (Z_{p1} \cos \varphi_p + R_\partial)}{6 \cos \varphi_p} \quad (16)$$

$$P_{p \max} = i_1^2 \frac{Z_0 \cos \varphi_0 - 2 (Z_{p1} \cos \varphi_p + R_\partial)}{24 \cos^2 \varphi_0 \cos \varphi_p}. \quad (17)$$

Из составления выражений (11), (14) и (17) следует, что при одинаковых значениях тока наибольшая мощность имеет место в схеме рис. 2 и наименьшая в схеме рис. 4; схема рис. 3 занимает среднее положение. Для выполнения защиты по схеме рис. 4 требуется применить конденсатор большей емкости, чем для схем рис. 2 и 3.

**Расчет защиты.** Расчет защиты сводится к определению полного тока замыкания на землю  $I_{z \text{расч}}$  и параметров реле и конденсатора, исходя

из заданной чувствительности защиты (коэффициента полноты замыкания на землю  $b_{\text{расч}}$ ).

Расчет защит можно вести двумя способами: 1) потребление реле не лимитировано. Определяются параметры реле  $P_{pm}$ ,  $i_{pm}$  и  $Z_p$ , емкость конденсатора (для схемы с емкостной компенсацией) и чувствительность защиты; 2) задан определенный тип реле (задано  $P_{pm}$ ). Определяется полное сопротивление обмотки реле, емкость конденсатора (для схемы с емкостной компенсацией), оптимальный ток трогания реле и чувствительность защиты.

При расчете защиты по первому способу расчетному случаю по чувствительности соответствует режим нагруженного генератора.

В расчетные выражения для защиты входит полное сопротивление  $Z_0$  и угол  $\varphi_0$ . Обычно завод дает коэффициенты  $A_x$  и  $A_n$ , связывающие  $Z_0$  с э. д. с. вторичной обмотки —  $e_2$ . Угол  $\varphi_0$  в заводских каталогах не приводится, в связи с чем при проведении расчетов были использованы значения  $\varphi_0$ , определенные лабораторным испытанием для некоторых типов трансформаторов тока.

Расчет защиты ведется, исходя из условия резонанса при трогании защиты; в этом случае справедлива векторная диаграмма токов рис. 5. Вектор  $\Sigma i_0$  — сумма намагничивающих токов трансформаторов тока; для схемы рис. 2  $\Sigma i_0 = 3i_0$ , для схемы рис. 3 —  $\Sigma i_0 = 3i_0 + i_{00}$ , и для схемы рис. 4 —  $\Sigma i_0 = 6i_0$ .

При расчете защиты с точки зрения селективности по схеме рис. 4 необходимо ввести двойной ток небаланса.

В приложении приводится пример расчета защиты по первому способу для нагруженного генератора 24 000 kW 6,3 kV для случаев выполнения защиты согласно схемам рис. 2, 3 и 4. Из приведенного примера расчета следует, что чувствительность защиты получается достаточно высокой, даже при принятии повышенного коэффициента надежности  $k_n = 1,8$ .

При перемотке трансформаторов тока на вторичный ток ниже 10 A емкость конденсатора снижается, полное сопротивление реле возрастает, ток трогания реле снижается, потребление реле остается неизменным, необходимый ток замыкания на землю остается неизменным.

Проверка чувствительности защиты показывает, что если схема настроена в резонанс в режиме нагрузки на грани трогания блокировки,

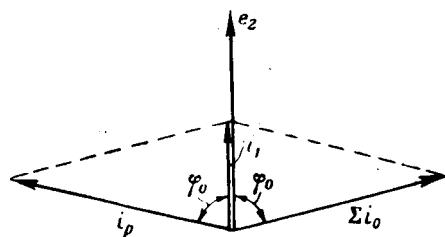


Рис. 5. Векторная диаграмма токов в резонансных условиях.

то при холостом ходе резонанс, естественно, будет нарушен; чувствительность защиты на холостом ходу получается того же порядка или даже несколько ниже, например, для схемы рис. 2 первичный ток трогания составляет  $I_{1\text{res}} = 15 \text{ A}$ , что соответствует  $I_{\text{расч}} = 50 \text{ A}$ , т. е. больше, чем при нагруженном генераторе (см. приложение).

Если защиту настраивать в резонанс при холостом ходе генератора, то ее чувствительность при нагруженном генераторе будет ниже, чем при холостом ходе, причем в этом случае имеет место большая разница в чувствительности, чем в случае выбора параметров защиты по режиму нагрузки. Следовательно, целесообразно пользоваться приведенным способом расчета с проверкой чувствительности защиты на холостом ходу.

Расчет защиты нагруженного генератора по второму способу, когда задано реле и его потребление, производится аналогично.

В этом случае определяется первичный расчетный ток небаланса  $I_{1\text{нб расч}}$ , полное сопротивление реле  $Z_p$ , емкость конденсатора и оптимальный ток трогания реле

$$i_{\text{рт опт}} = \sqrt{\frac{P_{\text{рт}}}{Z_p}}. \quad (18)$$

Чувствительность защиты определяется по выражению для  $I_{\text{зрасч}}$ , примера расчета; вместо  $i_{\text{рт}}$  в это выражение необходимо подставить  $i_{\text{рт опт}}$  согласно выражению (18).

**Реле повышенной чувствительности.** Из изложенного следует, что для выполнения защиты требуется токовое реле с потреблением при трогании меньшим, чем потребление токовых реле серии ЭТ.

При проведении испытаний данной защиты в лаборатории Теплоэлектропроекта путем переделки реле ЭТ-70 было выполнено реле с потреблением при трогании от 0,0135 до 0,054 VA. Снижение потребления реле было достигнуто за счет ослабления противодействующей пружины, вертикального расположения механизма реле (для устранения момента от несбалансированности подвижной системы) и термической обработки пакета железа и якоря (для уменьшения явлений гистерезиса). Испытания переделанного реле показали его надежную работу и отсутствие ложного действия при вибрациях.

Из приведенных расчетов (приложение) следует, что для выполнения защиты требуется реле с большим потреблением при трогании, чем переделанное реле, т. е. еще более надежное.

По имеющимся сведениям заводом выполнены опытные образцы чувствительных токовых реле для защит от замыканий на землю.

**Схема защиты.** Принципиальная схема дифференциальной токовой защиты от замыканий на землю генератора с заземленной нулевой точкой приведена на рис. 6. Вывод защиты из действия при сверхточках осуществляется шунтированием цепи реле и конденсатора и снятием оперативного тока при помощи промежуточного реле,

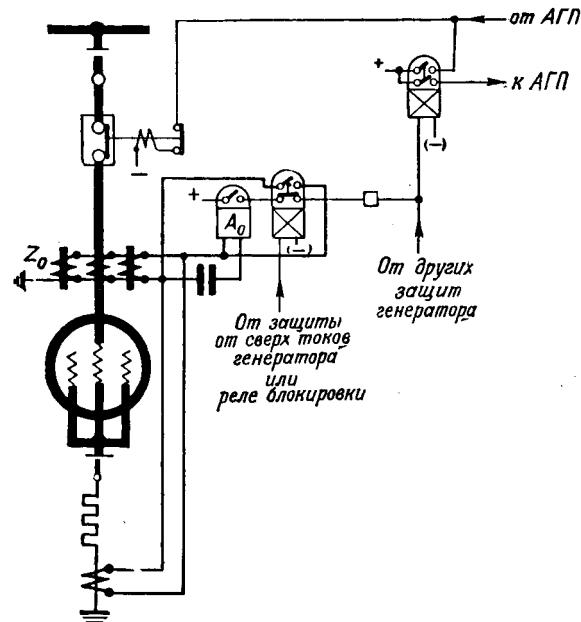


Рис. 6. Принципиальная схема защиты.

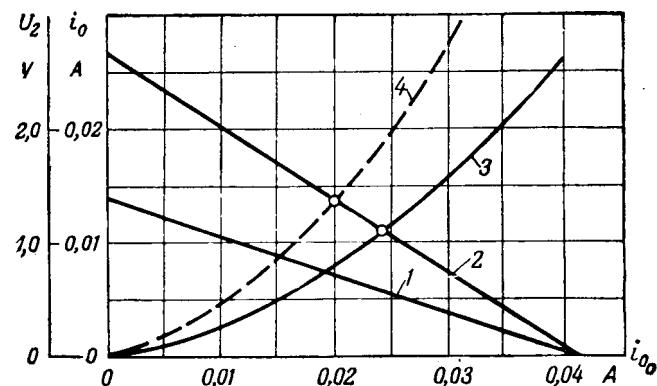


Рис. 7. Графоаналитическое определение полного сопротивления нулевого трансформатора тока при трогании защиты для схемы рис. 3.

Характеристики:  $1 - i_0 = f(i_{00})$  при  $i_{00} = 0,042 \text{ A}$ , построена по уравнению  $i_0 = \frac{2i_0 - i_{00}}{3}$ ;  $2 - U_2 = f(i_{00})$  для фазного трансформатора построена по уравнению  $U_2 = Z_{0\text{об}} \cdot i_0$ ;  $3 - U_2 = f(i_0)$  для нулевого трансформатора, построена по уравнению  $U_2 = (A_x i_0)^{\frac{1}{0,6}}$ ;  $4$  — опытная характеристика  $U_2 = f(i_0)$  для трансформатора тока ТПШФЗ-3000/10 на холостом ходу. Пересечение характеристик 2 и 3 имеет место при  $i_{00} = 0,02 \text{ A}$  и  $Z_{00} = A_x U_2^{0,4} = 45 \cdot 1,1^{0,4} = 47 \Omega$ . Пересечение характеристик 2 и 4 имеет место при  $i_{00} = 0,02 \text{ A}$  и  $Z_{00} = \frac{U_2}{i_{00}} = \frac{1,4}{0,02} = 70 \Omega$ .

управляемого защитой от сверхтоков, или реле блокировки. Шунтирование необходимо для предотвращения пробоя конденсатора и сгорания реле при двойном замыкании на землю, когда одна точка находится в зоне защиты, а также для обеспечения надежного возврата реле и неучета коэффициента возврата в расчетных выражениях. Испытания показали, что блокирующее реле должно выбираться типа ЭП-100 или РПМ при относительно медленно действующем выходном промежуточном реле типа ЭП-231. Нормаль-

но замкнутые контакты реле ЭП-100 должны регулироваться на минимальный совместный ход при обеспечении их надежного нажатия.

**Выводы.** Токовая защита генераторов от замыканий на землю является более простой и быстродействующей, чем применяемая в настоящее время защита максимальной мощности.

В расчетном режиме заземления при расчетном значении тока небаланса токовая защита обеспечивает такую же чувствительность, как защита максимальной мощности. При всяком отступлении от расчетных условий чувствительность токовой защиты больше.

Осуществление токовой защиты необходимой

чувствительности возможно при помощи токового реле с малым потреблением мощности при трогании. Включением емкости последовательно с реле требования в отношении мощности трогания реле могут быть значительно снижены. Реле с мощностью трогания порядка 0,025 VA позволяют осуществить токовую защиту в подавляющем большинстве случаев.

Для выполнения защиты с применением малых емкостей необходимо применять трансформаторы тока с вторичными токами, сниженными до  $1 \div 2$  A, которые могут быть получены из существующих перемоткой или изготовлены заводом.

#### Приложение

##### Расчет защиты генератора 24000 kW, 6,3 kV, выполняемой согласно схемам рис. 2, 3 и 4

Наименование величины	Обозначение	Метод определения	Числовое значение		
			Схема рис. 2	Схема рис. 3	Схема рис. 4

#### I. Исходные данные

Номинальная мощность генератора	$P_n$	Задается	$30 \cdot 10^3$ kVA		
Номинальное напряжение	$U_n$	Задается	6,3 kV		
Номинальный ток генератора	$I_n$	$\frac{P_n \cdot 1000}{U_n}$	2760 A		
Расчетная величина коэффициента полноты замыкания на землю	$\delta_{расч}$	Задается	0,3		
Трансформаторы тока		По каталогу	ТПШФЗ-3000/10		
Коэффициент, характеризующий трансформатор тока под нагрузкой	$A_n$	По каталогу	100		
То же, на холостом ходу	$A_x$	По каталогу	45		
Сопротивление вторичной обмотки трансформатора тока	$Z''_t$	По каталогу	0,38 Ω		
Первичный ток, при котором блокируется защита от замыканий на землю	$I_6$	$1,4 \cdot I_n$	3870 A		
Вторичный ток небаланса схемы фильтра токов нулевой последовательности при сопротивлении вторичной цепи 5 Ω и номинальном токе трансформаторов тока	$i_{1nб}$	По каталогу	0,012 A		

#### II. Определение расчетного тока небаланса и тока трогания реле

Электродвижущая сила вторичной обмотки трансформаторов тока при их номинальном токе	$e_2$	$i_{2n} Z''_t$	3,8 V	3,8 V	3,8 V
Полное сопротивление нагруженного номинальным током трансформатора тока	$Z_{0n}$	$A_n \cdot e_2^{0,4}$	171 Ω	171 Ω	171 Ω
Коэффициент отсоса при сопротивлении вторичной цепи 5 Ω	$\eta_n$	$\frac{5}{5+0,33 Z_{0n}}$	0,081	0,081	0,081
Первичный ток небаланса при номинальном токе трансформаторов тока	$I_{1nб}$	$\frac{i_{1nб} \cdot n_t}{1-\eta}$	3,92 A	3,92 A	3,92 A
Первичный ток небаланса при трогании блокировки	$I_{1nб}$	$I_{1nб} \left( \frac{I_6}{I_{nм.т}} \right)^{0,7}$	4,66 A	4,66 A	4,66 A
Первичный расчетный ток небаланса	$I_{1nб расч}$	Для схемы рис. 2 и 3 $I_{1nб расч} = I_{1nб}$ . Для схемы рис. 4 $I_{1nб расч} = 2I_{1nб}$	4,66 A	4,66 A	9,32 A

## Продолжение приложения

Наименование величины	Обозначение	Метод определения	Числовое значение		
			Схема рис. 2	Схема рис. 3	Схема рис. 4
Первичный ток трогания защиты	$I_{1,3m}$	$k_n I_{нбрасч}$ принимаем повышенный $k_n = 1,8$ , так как при подсчете $i_{pm}$ значение угла $\varphi_0$ берется приближенно	8,4 A	8,4 A	16,8 A

## III. Параметры реле и конденсатора

Ток трогания реле	$i_{pm}$	$\frac{I_{1,3m}}{2n_t \cos \varphi_0}$ Соотношение очевидно из рис. 5. Значение $\varphi_0$ получено из испытаний	0,042 A	0,042 A	0,084 A
Полное сопротивление намагничивания фазных трансформаторов тока при токе трогания блокировки	$Z_{ob}$	$A_n \left( \frac{I_6}{n_t} Z''_t \right)^{0,4}$	189 Ω	189 Ω	189 Ω
Полное сопротивление намагничивания нулевого трансформатора тока при трогании защиты для схемы рис. 3	$Z_{0o}$	Графоаналитический согласно рис. 7		70 Ω по опытной характеристике	
Ток ветви намагничивания трансформаторов тока при трогании защиты	$i_0$ $i_{0o}$	Для схемы рис. 2 $i_0 = \frac{i_{pm}}{3}$ Для схемы рис. 3 $i_0$ и $i_{0o}$ из графоаналитического расчета по рис. 7. Для схемы рис. 4 $i_0 = \frac{i_{pm}}{6}$	$i_0 = 0,014 A$ $i_{0o} = 0,02 A$	$i_0 = 0,014 A$ $i_{0o} = 0,02 A$	$i_0 = 0,014 A$
Импедансный угол ветви намагничивания при трогании защиты	$\varphi_0$	По опытной характеристике $\varphi_0 = f(i_0)$	70°	72° (среднее значение)	77°
Полное сопротивление обмотки реле	$Z_p$	Для схемы рис. 2 по выражению (10) при $Z_0 = Z_{ob}$ Для схемы рис. 3 по выражению (13) при $Z_0 = Z_{ob}$ и $Z_{0o} = 70 \Omega$ Для схемы рис. 4 по выражению (16) при $Z_0 = Z_{ob}$	43 Ω	20,6 Ω	9,9 Ω Подсчитано при $R_d = 5 \Omega$ , пренебрегая $Z_{p1}$
Емкостное сопротивление конденсатора	$x_c$	По выражениям (9), (12), (15) при тех же $Z_0$ и $Z_{0o}$ , что и в предыдущем пункте	97 Ω	49 Ω	42,3 Ω
Емкость конденсатора	$C$	$\frac{10^6}{\omega x_c}$	33 μF	65 μF	75 μF
Потребление реле при трогании	$P_{pm}$	$i_{pm}^2 Z_p$	0,074 VA	0,036 VA	0,07 VA

## IV. Чувствительность защиты

Расчетный ток замыкания на землю	$I_{3,расч}$	$\frac{2i_{pm}n_t \cos \varphi_0 + I_{1,нбрасч}}{b_{расч}}$	44,3 A	41,5 A	69 A
----------------------------------	--------------	-------------------------------------------------------------	--------	--------	------

## V. Параметры реле и конденсатора при перемотке вторичных обмоток трансформаторов тока на меньший ток

При перемотке трансформаторов тока на меньший номинальный ток вторичной обмотки, при равных ампервитках его полное сопротивление возрастает пропорционально квадрату отношения чисел витков вторичной обмотки после и до перемотки; импедансный угол  $\varphi_0$  при этом практически не изменяется. В связи с изменением числа витков изменяется  $Z_p$ ,  $C$  и  $i_{pm}$  причем потребление реле и чувствительность защиты не изменяются.

Продолжение приложения

Наименование величины	Обозначение	Метод определения	Числовое обозначение		
			Схема рис. 2	Схема рис. 3	Схема рис. 4
а) Вторичная обмотка трансформаторов тока выполняется на ток 5 А					
Емкость конденсатора после перемотки трансформаторов тока на 5 А	$c'$	$c \left( \frac{5}{10} \right)^2$	8,25 $\mu$ F	16,2 $\mu$ F	18,75 $\mu$ F
Полное сопротивление обмотки реле после перемотки трансформаторов тока на 5 А	$z'_p$	$z_p \left( \frac{10}{5} \right)^2$	172 $\Omega$	82,4 $\Omega$	39,6 $\Omega$
Ток трогания реле после перемотки трансформаторов тока на 5 А	$i'_{pm}$	$i_{pm} \left( \frac{5}{10} \right)$	0,021 A	0,021 A	0,042 A
б) Вторичная обмотка трансформаторов тока выполняется на ток 1 А					
Емкость конденсатора	$c''$	$c \left( \frac{1}{10} \right)^2$	0,33 $\mu$ F	0,65 $\mu$ F	0,75 $\mu$ F
Полное сопротивление обмотки реле	$z''_p$	$z_p \left( \frac{10}{1} \right)^2$	4 300 $\Omega$	2 060 $\Omega$	990 $\Omega$
Ток трогания реле	$i''_{pm}$	$i_{pm} \left( \frac{1}{10} \right)$	0,0042 A	0,0042 A	0,0084 A

## Литература

1. В. Е. Казанский. Применение конденсаторов для повышения предельной мощности трансформаторов тока. Эл. станции, № 3, 1944.  
 1. И. А. Сыромятников. Применение максимальной токовой защиты от замыканий на землю для генераторов. Эл. станции, № 8, 1945.

3. Теплоэлектропроект. Руководящие указания по релейной защите. Проект, ч. III, 1945.  
 4. А. М. Бреслер. Защита генераторов при замыкании на землю. Технический бюллетень завода МЭП, октябрь, 1946.  
 5. Теплоэлектропроект. Разработка и испытания максимальной токовой защиты генераторов от замыканий на землю. Москва, декабрь, 1946.



# Схемы включения трехфазных реле направления мощности

Доктор техн. наук, проф. Г. И. АТАБЕКОВ

Москва

Практический и теоретический интерес представляет рассмотрение схем включения трехфазных реле направления мощности, в которых вращающие моменты трех самостоятельных электродинамических или индукционных систем действуют на общую ось, осуществляя тем самым механическое суммирование моментов, пропорциональных составляющим мощности на зажимах разных фаз. Рассмотрим в связи с этим: 1) выражение для мощностей, пропорциональных вращающим моментам (при непосредственном подводе напряжений), для разных сочетаний токов и напряжений; 2) особенности, накладываемые на схемы включения трансформацией звезда-треугольник; 3) область применения схем направленных защит с пофазным пуском.

Следует иметь в виду, что выводы, сделанные ниже в отношении так называемой модифицированной  $60^\circ$  схемы, распространяются также на трехфазные барабанчиковые реле направления мощности с электромагнитным суммированием вращающих моментов, поскольку для них справедливы те же расчетные выражения мощностей [Л. 1]. В связи с этим условие необходимости применения пофазного пуска может одновремен-

Таблица 1

Полные мощности, подводимые к зажимам реле

Схема	Напряжение	Ток	Полная мощность, подводимая к зажимам трехфазного реле
$30^\circ$	$\dot{U}_{AC}$	$\dot{I}_A$	$3\sqrt{3}[\dot{P}_1e^{-j30} + \dot{P}_2e^{j30}]$
$60^\circ$	$-\dot{U}_C$	$\dot{I}_A$	$3[\dot{P}_1e^{-j60} + \dot{P}_2e^{j60} - \dot{P}_0]$
модифицированная	$\dot{U}_{BC}$	$\dot{I}_A - \dot{I}_C$	$9[\dot{P}_1e^{-j60} + \dot{P}_2e^{j60}]$
$90^\circ$	$\dot{U}_{BC}$	$\dot{I}_A$	$3\sqrt{3}[\dot{P}_1e^{-j90} + \dot{P}_2e^{j90}]$
$120^\circ$	$\dot{U}_{BC}$	$\dot{I}_A - \dot{I}_B$	$9[\dot{P}_1e^{-j120} + \dot{P}_2e^{j120}]$

Примечание.  $\dot{P}_1 = \dot{U}_{1A}\dot{I}_{1A}$ ,  $\dot{P}_2 = \dot{U}_{2A}\dot{I}_{2A}$ ,  $\dot{P}_0 = \dot{U}_0\dot{I}_0$ .

Дан теоретический анализ схем включения трехфазных реле направления мощности. Приведено обоснование наивыгоднейших схем включения реле и даны критерии применимости схем без пофазного пуска.

но рассматриваться в качестве условия, ограничивающего применение трехфазных барабанчиковых реле (в которых не существует пофазный пуск).

**Выражения мощностей.** Поведение трехфазных реле направления мощности определяется суммарным взаимодействием систем токов и напряжений одноименных фазных последовательностей — положительной, отрицательной и там, где это возможно, нулевой. Взаимодействие токов и напряжений разноименных фазных последовательностей равно нулю [Л. 2].

Обозначим через  $\dot{U}_\alpha$ ,  $\dot{U}_\beta$ ,  $\dot{U}_\gamma$  — фазные или линейные напряжения, подводимые к зажимам трехфазного реле, а через  $\dot{I}_x$ ,  $\dot{I}_y$ ,  $\dot{I}_z$  — соответствующие линейные токи или их разности.

Суммарная подводимая мощность

$$\dot{P} = \dot{U}_\alpha \dot{I}_x + \dot{U}_\beta \dot{I}_y + \dot{U}_\gamma \dot{I}_z. \quad (1)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_\alpha &= \dot{U}_{1\alpha} + \dot{U}_{2\alpha} + \dot{U}_{0\alpha}, \\ \dot{U}_\beta &= a^2 \dot{U}_{1\alpha} + a \dot{U}_{2\alpha} + \dot{U}_{0\alpha}, \\ \dot{U}_\gamma &= a \dot{U}_{1\alpha} + a^2 \dot{U}_{2\alpha} + \dot{U}_{0\alpha}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_x &= \dot{I}_{1x} + \dot{I}_{2x} + \dot{I}_{0x}, \\ \dot{I}_y &= a \dot{I}_{1x} + a^2 \dot{I}_{2x} + \dot{I}_{0x}, \\ \dot{I}_z &= a^2 \dot{I}_{1x} + a \dot{I}_{2x} + \dot{I}_{0x}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Известно, что

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1\alpha} \dot{I}_{2x} + a^2 \dot{U}_{1\alpha} a^2 \dot{I}_{2x} + a \dot{U}_{1\alpha} \cdot a \dot{I}_{2x} &= 0, \\ \dot{U}_{2\alpha} \dot{I}_{1x} + a \dot{U}_{2\alpha} a \dot{I}_{1x} + a^2 \dot{U}_{2\alpha} a^2 \dot{I}_{1x} &= 0, \\ \dot{U}_{0\alpha} (\dot{I}_{1x} + a \dot{I}_{1x} + a^2 \dot{I}_{1x}) + \dot{U}_{0\alpha} (\dot{I}_{2x} + a^2 \dot{I}_{2x} + a \dot{I}_{2x}) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

С учетом (2) — (4) выражение (1) принимает вид [Л. 2]:

$$\dot{P} = 3 [\dot{U}_{1\alpha} \dot{I}_{1x} + \dot{U}_{2\alpha} \dot{I}_{2x} + \dot{U}_{0\alpha} \dot{I}_{0x}]. \quad (5)$$

При подведении к реле фазных напряжений  $\dot{U}_{0\alpha} = \dot{U}_0$ , а при подведении линейных напряжений  $\dot{U}_{0\alpha} = 0$ .

На основании (5) в табл. 1 приведены выражения мощностей, подводимых к трехфазным реле направления, при различных сочетаниях токов и напряжений (показанных в табл. 1 для одного из элементов).

Судя по величине выражений, заключенных в скобки (табл. 1),  $90^\circ$  схема соединений реле, обеспечивающая при диаметрально противоположном направлении  $\dot{P}_1$  и  $\dot{P}_2$

(рис. 1) совпадение по направлению слагаемых  $\dot{P}_1 e^{-j\varphi_0}$  и  $\dot{P}_2 e^{j\varphi_0}$ , имеет преимущество. В свою очередь схемы  $60^\circ$  (модифицированная) и  $120^\circ$ , предусматривающие включение реле на разности токов, характеризуются числовым коэффициентом 9, превышающим соответствующие коэффициенты при  $90^\circ$  и  $60^\circ$  схемах в  $\sqrt{3}$  и 3 раза.

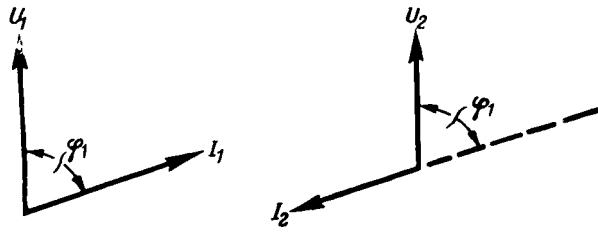


Рис. 1.

В случае применения чисто косинусного реле  $P_p = U_p I_p \cos \varphi_p$  вращающий момент пропорционален сумме действительных частей слагаемых, входящих в скобки выражений табл. 1. Так, например, применительно к схеме  $30^\circ$  имеем:\*

$$P_p = 3\sqrt{3} \cdot [\dot{P}_1 e^{-j80^\circ}]_d + 3\sqrt{3} [\dot{P}_2 e^{j30^\circ}]_d$$

или, что то же,

$$P_p = 3\sqrt{3} [U_1 I_1 \cos(\varphi_1 - 30^\circ) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2 + 30^\circ)],$$

здесь  $\varphi_1$  — угол между векторами  $U_1$  и  $I_1$ ;

$\varphi_2$  — угол между векторами  $U_2$  и  $I_2$  (положительный угол соответствует отстающему току).

В случае применения реле смешанного типа  $P_p = U_p I_p \cos(\varphi_p + \alpha)$  вращающий момент пропорционален сумме действительных частей слагаемых, заключенных в скобках выражений табл. 1 и умноженных на множитель  $e^{j\alpha}$ . Умножение  $\dot{P}$  на  $e^{j\alpha}$  равносильно повороту  $\dot{U}$  или  $\dot{I}$  на угол  $\alpha$  против вращения часовой стрелки (последнее равносильно повороту  $I$  на угол  $\alpha$  в обратном направлении). Так, например, применительно к  $90^\circ$  схеме [Л. 3]

$$P_p = 3\sqrt{3} [\dot{P}_1 e^{-j(90^\circ - \alpha)}]_d + 3\sqrt{3} [\dot{P}_2 e^{j(90^\circ + \alpha)}]_d$$

или, что то же,

$$P_p = 3\sqrt{3} [U_1 I_1 \cos(\varphi_1 - 90^\circ + \alpha) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2 + 90^\circ + \alpha)],$$

В табл. 2 приведены выражения мощностей для указанных выше пяти схем включения реле. На основании табл. 2 составлена табл. 3, дающая представление о мощностях, пропорциональных вращающим моментам трехфазных реле, при замыканиях между тремя и двумя фазами (для разных значений  $\alpha$ ). Из числа приведенных в табл. 3 двенадцати вариантов надлежит выбрать наивыгоднейшие. Для этого целесообразно руководствоваться следующими исходными положениями:

1. Знаки вращающих моментов, обусловленных системами токов и напряжений положительной последовательности при трехфазных коротких замыканиях и системами токов и напряжений отрицательной последовательности при двухфазных коротких замыканиях, должны быть одинаковы.

2. Величины вращающих моментов при трехфазном и двухфазном коротких замыканиях должны быть, по возможности, велики.

3. При двухфазном замыкании удельный вес вращающего момента от составляющих отрицательной последовательности должен быть, по возможности, большим (так как мощность положительной последовательности не всегда направлена к месту повреждения).

Рассматривая с этой точки зрения данные табл. 3, необходимо в первую очередь отвергнуть вариант 10, как

\* Индекс „д“ означает действительную часть комплекса.

не удовлетворяющий требованию п. 1, и варианты 7 и 11 как не удовлетворяющие требованию п. 2 (при  $\varphi_1 = 0$ ). Далее, в связи с требованием п. 3 приходится признать не вполне удовлетворительными варианты 2, 3 и 5. Обращает на себя внимание положительная особенность вариантов 4, 6, 8 и 9, заключающаяся в том, что при двухфазных коротких замыканиях<sup>1</sup>  $U_1 I_1$  и  $U_2 I_2$  суммируются. Наибольшая величина вращающего момента как при трехфазных, так и при двухфазных коротких замыканиях обеспечивается в варианте 6. Следует иметь в виду, что все сказанное относительно случаев двухфазных коротких замыканий в равной мере относится и к случаям замыканий на землю при всех схемах включения трехфазного реле кроме  $60^\circ$  схемы (при которой составляющие нулевой последовательности входят в выражение мощности табл. 2).

В этом отношении  $60^\circ$  схема имеет тот недостаток перед остальными, что при  $\cos(\varphi_0 + \alpha) > 0$  момент от составляющих нулевой последовательности становится противодействующим (в направлении к месту повреждения).

В качестве наивыгоднейших схем включения трехфазных реле направления мощности следует признать схемы модифицированную  $60^\circ$  — при  $\alpha = 30^\circ$  (вариант 6) и  $90^\circ$  — при  $\alpha = 30^\circ$  и  $\alpha = 45^\circ$  (варианты 8 и 9).

### Влияние трансформации звезда-треугольник.

При несимметричных коротких замыканиях, связанных с электрической системой (в которой установлены трехфазные реле направления мощности) трансформаторами, имеющими соединение звезда-треугольник, приведенные выше выражения для мощностей, пропорциональных вращающим моментам, сохраняются в силе. Изменение взаимного расположения систем положительной и отрицательной последовательности, обусловленное присутствием трансформации звезда-треугольник, не отражается на поведении трехфазного реле, так как его вращающий момент определяется взаимодействием напряжений и токов одноименных фазных последовательностей. Поэтому при анализе поведения трехфазных реле трансформаторная связь может учитываться только величиной сопротивлений трансформаторов (в комплексных схемах замещения).

При наличии трансформатора по схеме  $Y/\Delta-11$  и питании<sup>1</sup> цепей напряжения реле направления мощности со стороны треугольника, а цепей тока — со стороны звезды, информационное письмо Оргрэс № 9/217 (январь 1944) рекомендует включать трехфазные реле направления мощности косинусного типа (с непосредственным подводом напряжений) следующим образом: ток  $I_d$  сочетается с напряжением  $U_{bc}$  и т. д.

1  $U_1 I_1$  и  $U_3 I_3$  входят в выражение для мощности с одинаковыми коэффициентами при:

$$a) \varphi_1 - \delta + \alpha = \varphi_2 + \delta + \alpha, \quad \text{т. е. } \delta = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2};$$

$$b) \varphi_1 - \delta + \alpha = -(\varphi_2 + \delta + \alpha), \quad \text{т. е. } \alpha = -\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2};$$

здесь  $\delta$  — угол, характеризующий схему включения реле направления мощности. В случае  $\varphi_1 - \varphi_2 = 180^\circ$  это имеет место при  $\delta = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} = 90^\circ$ , т. е. в  $90^\circ$  схеме, вне зависимости от  $\alpha$ .

Б случае  $-(\varphi_1 + \varphi_2) = 60^\circ$  это имеет место при  $\alpha = -\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} = 30^\circ$ , т. е. при внутреннем сдвиге реле  $30^\circ$  вне зависимости от схемы включения.

С учетом соотношений, вытекающих из рис. 2 и 3 (при коэффициенте трансформации, равном единице),

$$U_{1bc} = \sqrt{3} U_{1A} e^{-j60^\circ}, \quad U_{2bc} = \sqrt{3} U_{2A} e^{j60^\circ},$$

выражение для мощности принимает вид:

$$P_p = 3\sqrt{3} [U_1 I_1 \cos(\varphi_1 - 60^\circ) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2 + 60^\circ)], \quad (6)$$

$U_1, U_2, I_1, I_2$  — напряжения и токи одноименных фаз на стороне звезды.

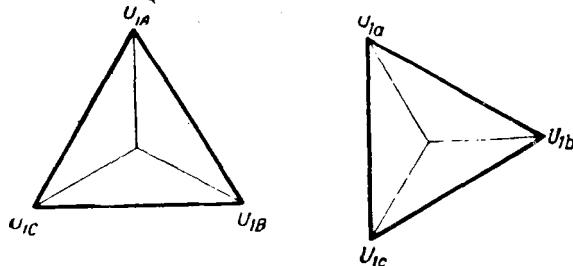


Рис. 2.

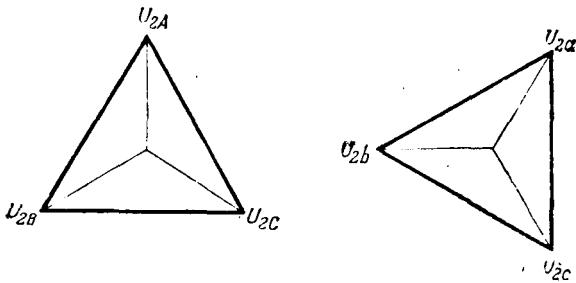


Рис. 3.

Анализ показывает, что более выгодной с точки зрения вращающих моментов является схема включения трехфазного реле смешанного типа ( $\alpha = 30^\circ$ ), в которой ток  $I_A - I_B$  сочетается с напряжением  $U_{bc}$  и т. д.

С учетом соотношений

$$I_{1A} - I_{1B} = \sqrt{3} I_{1A} e^{j30^\circ}, \quad I_{2A} - I_{2B} = \sqrt{3} I_{2A} e^{-j30^\circ},$$

выражение для мощности принимает вид аналогичный полученному ранее для  $90^\circ$  схемы (табл. 2)

$$P_p = 9 [U_1 I_1 \cos(\varphi_1 - 90^\circ + \alpha) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2 + 90^\circ + \alpha)]. \quad (7)$$

На основании (6) и (7) в табл. 4 указаны мощности для случаев трехфазных и двухфазных коротких замыканий.

Преимуществом второй схемы является больший удельный вес момента от составляющих отрицательной последовательности (аналогично тому, как это имело место в схемах  $60^\circ$  и  $90^\circ$  — см. табл. 3, варианты 3 и 8).

**Пофазный пуск.** При применении трехфазных реле направления мощности вопрос о пофазном пуске подлежит разрешению в зависимости от конкретных условий защищаемой электрической системы. Пофазный пуск необходим в тех случаях, когда тормозной вращающий момент, обусловленный неповрежденными фазами, может превышать или уравновешивать рабочий момент.

Таблица 2  
Мощности, на которые реагируют реле

Схемы	Мощность
$30^\circ$	$3\sqrt{3} [U_1 I_1 \cos(\varphi_1 - 30^\circ + \alpha) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2 + 30^\circ + \alpha)]$
$60^\circ$	$3 [U_1 I_1 \cos(\varphi_1 - 60^\circ + \alpha) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2 + 60^\circ + \alpha) - U_0 I_0 \cos(\varphi_0 + \alpha)]$
модифицированная	$9 [U_1 I_1 \cos(\varphi_1 - 60^\circ + \alpha) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2 + 60^\circ + \alpha)]$
$90^\circ$	$3\sqrt{3} [U_1 I_1 \cos(\varphi_1 - 90^\circ + \alpha) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2 + 90^\circ + \alpha)]$
$120^\circ$	$9 [U_1 I_1 \cos(\varphi_1 - 120^\circ + \alpha) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2 + 120^\circ + \alpha)]$

Таблица 3

Вариант	Схема	Трехфазное короткое замыкание		Двухфазное короткое замыкание		Внутренний сдвиг $\alpha$ (градусы)
		$\varphi_1 = 0$	$\varphi_1 = 60^\circ$	$\varphi_1 = 60^\circ$	$\varphi_2 = -120^\circ$	
1	$30^\circ$	$4,5 U_1 I_1$	$4,5 U_1 I_1$	$4,5 U_1 I_1$		0
2	$30^\circ$	$5,2 U_1 I_1$	$5,2 U_1 I_1$	$5,2 [U_1 I_1 + 0,5 U_2 I_2]$		30
3	$60^\circ$	$1,5 U_1 I_1$	$3 U_1 I_1$	$3 [U_1 I_1 + 0,5 U_2 I_2]$		0
4	$60^\circ$	$2,6 U_1 I_1$	$2,6 U_1 I_1$	$2,6 [U_1 I_1 + U_2 I_2]$		30
5	$60^\circ$ (мод)	$4,5 U_1 I_1$	$9 U_1 I_1$	$9 [U_1 I_1 + 0,5 U_2 I_2]$		0
6	$60^\circ$ (мод)	$7,8 U_1 I_1$	$7,8 U_1 I_1$	$7,8 [U_1 I_1 + U_2 I_2]$		30
7	$90^\circ$	0	$4,5 U_1 I_1$	$4,5 [U_1 I_1 + U_2 I_2]$		0
8	$90^\circ$	$2,6 U_1 I_1$	$5,2 U_1 I_1$	$5,2 [U_1 I_1 + U_2 I_2]$		30
9	$90^\circ$	$3,7 U_1 I_1$	$5,0 U_1 I_1$	$5 [U_1 I_1 + U_2 I_2]$		45
10	$120^\circ$	$-4,5 U_1 I_1$	$4,5 U_1 I_1$	$9 [0,5 U_1 I_1 + U_2 I_2]$		0
11	$120^\circ$	0	$7,8 U_1 I_1$	$7,8 [U_1 I_1 + U_2 I_2]$		30
12	$120^\circ$	$2,3 U_1 I_1$	$8,7 U_1 I_1$	$9 [0,97 U_1 I_1 + 0,7 U_2 I_2]$		45

Таблица 4  
Мощности, на которые реагируют реле при питании обмоток напряжения с низкой стороны трансформаторов  $Y/\Delta$

Расчетное выражение	Трехфазное короткое замыкание		Двухфазное короткое замыкание		Внутренний сдвиг $\alpha$ (градусы)
	$\varphi_1 = 0$	$\varphi_1 = 60^\circ$	$\varphi_1 = 60^\circ$	$\varphi_2 = -120^\circ$	
(6)	$2,6 U_1 I_1$	$5,2 U_1 I_1$	$5,2 [U_1 I_1 + 0,5 U_2 I_2]$		0
(7)	$4,5 U_1 I_1$	$9 U_1 I_1$	$9 [U_1 I_1 + U_2 I_2]$		30

Теоретическое рассмотрение данного вопроса применительно к элементарной системе, изображенной на рис. 4, удобно проводить методом наложения [Л. 4]. Проанализируем условия работы трехфазных реле направления мощности типа  $P_p = U I_p \cos(\varphi_p + \alpha)$ , включенных в точках 1 и 2 по  $90^\circ$  схеме при следующих видах коротких замыканий: а) замыкание между двумя фазами; б) однофазное замыкание на землю; в) двухфазное замыкание на землю (около точки 1).

Примем следующие допущения: 1) схемы положительной и отрицательной последовательности одинаковы; 2) переходные сопротивления в

месте короткого замыкания равны нулю. При пользовании методом наложения аварийные слагающие токов создают рабочий вращающий момент, а токи предшествующего нагружочного режима — рабочий на одном конце и тормозной на противоположном конце участка. Результирующий вращающий момент определяется алгебраической суммой рабочего и тормозного моментов от токов положительной и отрицательной последовательности:

$$P_p = P_{pab} + P_{torm} = 3\sqrt{3} [U_1 I_1 \cos(\varphi_1 - 90^\circ + \alpha) + U_2 I_2 \cos(\varphi_2 + 90^\circ + \alpha)] + 3\sqrt{3} U_1 I_{1n} \cos(\varphi_{1n} - 90^\circ + \alpha),$$

здесь  $I_{1n}$  — ток предшествующего режима,  $\varphi_{1n}$  — угол между  $U_1$  и  $I_{1n}$ .

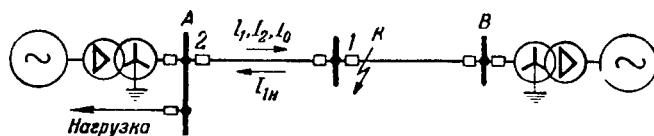


Рис. 4.

Применимально к реле 1 и 2 рис. 4 токи нагрузки создают тормозной вращающий момент, т. е.  $\cos(\varphi_{1n} - 90^\circ + \alpha) < 0$ . Наименее благоприятным условием является  $\varphi_{1n} - 90^\circ + \alpha = 180^\circ$ , т. е.  $\varphi_{1n} = 270^\circ - \alpha$ . Аналогичным образом наименее благоприятным условием для модифицированной  $60^\circ$  схемы является:  $\varphi_{1n} - 60^\circ + \alpha = 180^\circ$ , т. е.  $\varphi_{1n} = 240^\circ - \alpha$ . Условием, достаточным для правильного действия трехфазного органа направления мощности в этих неблагоприятных случаях, является

$$I_1 > I_{1n}. \quad (8)$$

В зависимости от вида повреждения условие (8) приводит к различным критическим отношениям, при которых пофазный пуск не требуется.

*Замыкание между двумя фазами.* При равенстве схем положительной и отрицательной последовательности

$$I_1 = -I_2, \quad (9)$$

$$\dot{U}_{1K} = \dot{U}_{2K} = -I_{2K} Z_{2K} = \frac{U}{Z_{1K} + Z_{2K}} \cdot Z_{2K} = 0,5U, \quad (10)$$

$U$  — напряжение фазы  $A$  в точке  $K$  при предшествующем нагружочном режиме;

$\dot{U}_{1K}, \dot{U}_{2K}$  — напряжения положительной и отрицательной последовательности в точке  $K$ ;

$I_{2K}$  — ток отрицательной последовательности в ответвлении короткого замыкания;

$Z_{1K}, Z_{2K}$  — результирующие сопротивления положительной и отрицательной последовательности, приведенные к точке короткого замыкания.

Рабочий вращающий момент в точке  $1$  (рис. 4) при  $\cos(\varphi_1 - 90^\circ + \alpha) = \cos(\varphi_2 + 90^\circ + \alpha)$  с учетом (9) и (10)

$$P_{pab} = 3\sqrt{3} UI_1 \cos(\varphi_1 - 90^\circ + \alpha).$$

В точке  $2$  возникают дополнительные моменты от взаимодействия тока  $I_1$  с падением напряжения  $I_1 Z_1$  и тока  $I_2$  с падением напряжения  $I_2 Z_2$ , которые взаимно компенсируются. Таким образом, рабочий вращающий момент остается неизменным вдоль всей линии  $1-2$ . Аналогичное положение имеет место и в случае модифицированной  $60^\circ$  схеме при условии, что

$$\cos(\varphi_1 - 60^\circ + \alpha) = \cos(\varphi_2 + 60^\circ + \alpha).$$

Условие (8) для рассматриваемого вида повреждения переписывается следующим образом:

$$\left| \frac{U}{2Z_{1K}} \frac{Z_{111}}{Z_{11} + Z_{111}} \right| > I_{1n}, \quad (11)$$

$Z_{11}, Z_{111}$  — сопротивления положительной последовательности слева и справа от места короткого замыкания.

Неравенство (11) может быть переписано следующим образом:

$$U > 2z_{11} I_{1n}. \quad (12)$$

Итак, при замыкании между двумя фазами на конце участка, где ток нагрузки  $I_{1n}$  (предшествующего режима) имеет направление, противоположное направлению аварийной слагающей  $I_1$ , при соблюдении условия (12) блокировка неповрежденной фазы не требуется.

*Однофазное замыкание на землю.* При равенстве схем положительной и отрицательной последовательности и  $Z_{0K} = m Z_{1K}$

$$I_1 = I_2 \text{ и } I_{1K} = I_{2K} = I_{0K} = \frac{U}{(2+m) Z_{1K}}, \quad (13)$$

$$\dot{U}_{1K} = -(U_{2K} + \dot{U}_{0K}) = I_{2K} Z_{2K} + I_{0K} Z_{0K};$$

$$U_{1K} = U \frac{1+m}{2+m}; \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\}$$

$$U_{2K} = -U \frac{1}{2+m}. \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \quad (14)$$

Рабочий момент в точке  $1$  при  $\cos(\varphi_1 - 90^\circ + \alpha) = \cos(\varphi_2 + 90^\circ + \alpha)$  с учетом (13) и (14):

$$P_{pab} = 3\sqrt{3} UI_1 \cos(\varphi_1 - 90^\circ + \alpha).$$

В точке  $2$  падениями напряжений  $I_1 Z_1$  и  $I_2 Z_2$  обусловлены вращающие моменты, которые взаимно компенсируются.

Следовательно, так же как и в предыдущем случае, рабочий вращающий момент вдоль линии  $AK$  не меняется. Аналогичное явление имеет место в случае модифицированной  $60^\circ$  схемы, если

$$\cos(\varphi_1 - 60^\circ + \alpha) = \cos(\varphi_2 + 60^\circ + \alpha).$$

Условие (8) для рассматриваемого вида повреждения записывается следующим образом:

$$\left| \frac{U}{(2+m) Z_{1K}} \frac{Z_{111}}{Z_{11} + Z_{111}} \right| > I_{1n}. \quad (15)$$

Неравенство (15) может быть представлено в виде:

$$U > (2 + m) z_{11} I_{1n}. \quad (16)$$

Итак, при однофазном замыкании на землю на конце участка, где  $I_{1n}$  имеет направление, противоположное  $I_1$ , непосредственный подвод напряжений к трехфазному реле мощности допустим только при соблюдении условия (16). Из сопоставления (12) и (16) следует, что с удовлетворением условия (16) одновременно удовлетворяется и (12).

*Двухфазное замыкание на землю.* При тех же допущениях, что и ранее,

$$i_2 = -i_1 \frac{Z_{0K}}{Z_{2K} + Z_{0K}} = -I_{11} \frac{m}{1+m}, \quad (17)$$

$$\dot{U}_{1K} = \dot{U}_{2K} = \dot{U}_{0K} = \frac{1}{3} U. \quad (18)$$

Рабочий момент в точке 1 с учетом (17) и (18)

$$P_{раб} = \sqrt{3} U I_1 \cos(\varphi_1 - 90^\circ + \alpha).$$

В точке 2 дополнительный момент от падения напряжения  $i_1 Z_1$  превышает момент, созданный от  $i_2 Z_2$  (имеющий противоположный знак) вследствие того, что  $I_1 > \frac{1+m}{m} I_2$  больше  $I_2$ .

Поэтому по мере удаления от места короткого замыкания в сторону генераторов при рассматриваемом виде повреждения рабочий вращающий момент трехфазного реле направления мощности растет. То же имеет место и в случае модифицированной  $60^\circ$  схемы, если

$$\cos(\varphi_1 - 60^\circ + \alpha) = \cos(\varphi_2 + 60^\circ + \alpha).$$

Условие (8) принимает вид:

$$\left| \frac{U}{Z_{1K} + \frac{Z_{2K} Z_{0K}}{Z_{2K} + Z_{0K}}} \frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_{11}} \right| > I_{1n},$$

откуда

$$U > \left(1 + \frac{m}{1+m}\right) z_{11} I_{1n}. \quad (19)$$

Таким образом, при двухфазном замыкании на землю на конце участка, где  $I_{1n}$  имеет направление, противоположное  $I_1$ , непосредственный подвод напряжений к трехфазному реле мощности допустим только при соблюдении условия (19). Из сопоставления (16) и (19) следует, что с удовлетворением условия (16) одновременно удовлетворяется и условие (19). Поэтому в тех случаях, когда с точки зрения однофазных замыканий на землю пофазный пуск реле направления мощности не требуется, он заведомо оказывается лишним и при остальных видах замыканий. В заключение следует заметить, что выполнение условий (12), (16), (19) требуется также и в случае применения барабанчиковых трехфазных реле направления мощности.

**Основные выводы.** Вращающий момент трехфазного реле направления мощности обусловлен взаимодействием симметричных составляющих напряжений и токов одноименных фазных последовательностей.

Наи выгоднейшими схемами включения трехфазных реле направления мощности, основанными на механическом суммировании моментов, являются схемы: модифицированная  $60^\circ$  ( $\alpha = 30^\circ$ ) и  $90^\circ$  ( $\alpha = 30^\circ$  и  $\alpha = 45^\circ$ ); они обеспечивают наибольший удельный вес момента от составляющих отрицательной последовательности при одновременном удовлетворении требований в отношении величин и знаков моментов при симметричных и несимметричных коротких замыканиях.

Фазный сдвиг между системами положительной и отрицательной последовательностей, создаваемый трансформацией звезда-треугольник между местом питания реле и местом несимметричного короткого замыкания, не влияет на работу трехфазного реле направления мощности.

Аварийные слагающие  $I_1$  и  $I_2$ , получаемые при пользовании методом наложения, обеспечивают правильный выбор направления, а ток  $I_{1n}$  предшествующего режима на одном из концов линии создает тормозной момент. Соблюдение условия  $I_1 > I_{1n}$  гарантирует на указанном конце линии преобладание рабочего момента (от  $I_1$ ) над тормозным, причем момент от  $I_2$  идет в запас.

При замыканиях между двумя фазами и при однофазных замыканиях на землю суммарный рабочий вращающий момент от токов  $I_1$  и  $I_2$  не изменяется вдоль всего участка от места короткого замыкания до шин станции при соблюдении условия

$$\cos(\varphi_1 - \delta + \alpha) = \cos(\varphi_2 + \delta + \alpha),$$

где  $\delta$  — угол, характеризующий схему включения трехфазного реле направления мощности;  $\alpha$  — внутренний угол сдвига реле.

В отношении трехфазных барабанчиковых реле справедливы выводы, сделанные применительно к модифицированной  $60^\circ$  схеме. Поэтому условие необходимости применения пофазного пуска в модифицированной  $60^\circ$  схеме является одновременно условием, ограничивающим применение трехфазных барабанчиковых реле<sup>2</sup>.

#### Литература

1. М. Ф. Костров, И. И. Соловьев и А. М. Федосеев. Основы техники релейной защиты. Госэнергоиздат, стр. 102, 1944.
2. П. Л. Калантаров. Теория переменных токов. Госэнергоиздат, стр. 260—261, 1940.
3. Ф. А. Ступель. Реле защиты и автоматики. Госэнергоиздат, стр. 263—264, 1941.
4. Н. Н. Шедрин. Токи короткого замыкания высоковольтных систем. ОНТИ, стр. 35—36, 1935.
5. Electrical Transmission and Distribution Reference Book. Westinghouse, 1943.

<sup>2</sup> После представления статьи в редакцию журнала автору стало известно, что В. Л. Фабрикант независимо исследовал некоторые вопросы, затронутые в первой части настоящей статьи.

# Расчет токов и напряжений для целей анализа релейной защиты при коротких замыканиях с одновременным обрывом фазы

Кандидат техн. наук, доц. А. Б. ЧЕРНИН

Москва

В последние годы получило широкое распространение однофазное отключение и автоматическое повторное включение (АПВ) при повреждениях на линиях в сетях с большим током замыкания на землю. Однако, поведение релейной защиты при этих режимах в настоящее время недостаточно исследовано.

Ниже приведены расчетные выражения для токов и напряжений для некоторых характерных случаев повреждений с одновременным обрывом фазы. С помощью указанных выражений воз-

расчеты токов при коротких замыканиях с одновременным обрывом фазы имеют важное значение для проектирования и анализа релейной защиты в связи с широким развитием однофазного отключения и автоматического повторного включения линии [Л. 1]. Дан метод расчета токов и напряжений при коротких замыканиях с одновременным обрывом фазы. Расчетные выражения даны для ряда практических случаев повреждений на линиях с двух- и односторонним питанием при учете и неучете нагрузок.

можно анализировать действие релейной защиты при применении однофазного отключения и АПВ.

Расчетные выражения для случая короткого замыкания с одновременным обрывом фазы на линии с двухсторонним питанием

(нагрузочные сопротивления не учитываются). В рассматриваемом случае принимается равенство э. д. с. генераторов и сопротивлений положительной и отрицательной последовательностей всех элементов. При указанном допущении на основании схемы замещения рис. 1 [Л. 2 и 3] могут быть составлены следующие выражения для токов отдельных последовательностей в месте повреждения при одно- и многофазных замыканиях на землю:

$$i_{\kappa 1} = \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{\text{рез11}}} + \alpha_1^{(2)} \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{\text{рез12}}} + \alpha_1^{(0)} \frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{\text{рез10}}} + \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{\text{II1}}}, \quad (1)$$

$$i_{\kappa 2} = -\alpha_2^{(1)} \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{\text{рез11}}} - \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{\text{рез12}}} + \alpha_2^{(0)} \frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{\text{рез10}}} - \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{\text{II2}}}, \quad (2)$$

$$i_{\kappa 0} = -\alpha_0^{(1)} \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{\text{рез11}}} + \alpha_0^{(2)} \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{\text{рез12}}} - \frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{\text{рез10}}} - \frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{\text{II0}}}. \quad (3)$$

В выражениях (1) — (3):  $Z_{\text{рез1}}$  — результирующие сопротивления левой части схемы замещения рис. 1;  $\alpha$  — коэффициенты распределения токов в левой части схемы; индекс внизу указывает последовательность тока, а индекс вверху в скобках — последовательность э. д. с., определяющую этот ток.

Сопротивления  $Z_{\text{рез1}}$  и коэффициенты распределения  $\alpha$  могут быть выражены через сопротивления левой части схемы замещения рис. 1:

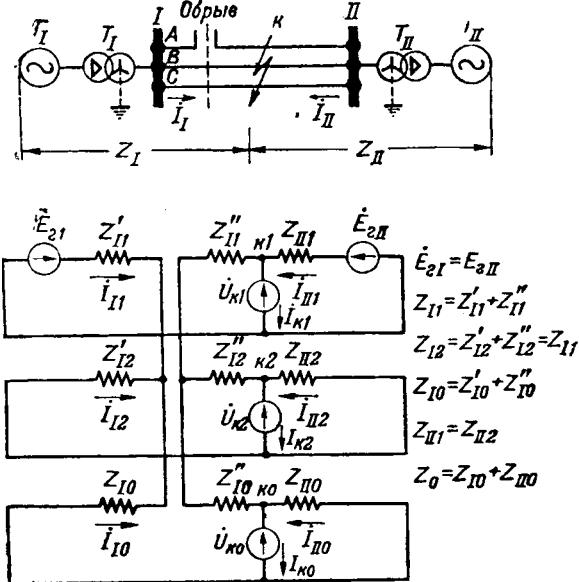
$$Z_{\text{рез11}} = Z_{\text{рез12}} = \frac{Z_{11}(Z_{11} + 2Z_{10})}{Z_{11} + Z_{10}}, \quad (4)$$

$$Z_{\text{рез10}} = \frac{Z_{11} + 2Z_{10}}{2}, \quad (5)$$

$$\alpha_1^{(2)} = \alpha_2^{(1)} = \frac{Z_{10}}{Z_{11} + Z_{10}}, \quad (6)$$

Рис. 1. Исходная схема и комплексная схема замещения, составленная по месту обрыва для случая короткого замыкания с одновременным обрывом в сети с двухсторонним питанием.

Примечание. В случае повреждения без замыкания на землю в схеме замещения должна отсутствовать связь между точками  $\kappa$  и нулевым проводом ( $I_{\kappa 0} = 0$ ).



$$\alpha_0^{(1)} = \alpha_0^{(2)} = \frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_{10}} \quad (7)$$

$$\alpha_1^{(0)} = \alpha_2^{(0)} = \frac{1}{2}, \quad (8)$$

При замыканиях между фазами следует принять в выражениях (1—3) напряжение  $U_{\kappa 0} = 0$ , а в выражениях (4—8) необходимо подставить вместо  $Z_{10}$  величину

$$Z_0 = Z_{10} + Z_{\text{II}0}. \quad (9)$$

Уравнения (1)—(3) в сочетании с известными тремя условиями для места к. з. для отдельных видов повреждений дают 6 уравнений, по которым определяются величины токов и напряжений отдельных последовательностей. В таблице приведены полученные таким образом токи и напряжения для наиболее характерных видов повреждений. Из анализа данных таблицы для случая замыкания между двумя фазами с одновременным обрывом следует, что суммарные токи положительной и отрицательной последовательности совпадают по фазе с токами нулевой последовательности и с полными токами. Эта особенность данного вида повреждения весьма упрощает вычисления.

Выражения, приведенные в таблице, удобны для анализа изменения величин токов и напряжений в зависимости от величин сопротивлений отдельных последовательностей исходной схемы.

Расчетные выдержки для случая замыкания на землю и обрыва в одной фазе на линии с двухсторонним питанием (нагрузочные сопротивления учитываются). Уточненные выражения для данного вида повреждений представляют значительный практический интерес для анализа релейной защиты линий, соединяющих две генерирующие станции или системы в тех случаях, когда для этих линий предусматривается однофазное отключение и АПВ, но не допускается длительная работа двумя фазами.

Схема замещения при учете нагрузочных сопротивлений дана на рис. 2.

Расчетные выражения для рассматриваемого случая повреждений могут быть получены аналогично схеме замещения рис. 1, в которой учтено, что: а) сопротивления левой и правой частей схемы рис. 1 в положительной и отрицательной последовательностях различны в связи с тем, что они содержат сопротивления нагрузок (в соответствии с рис. 2); б) э. д. с. левой и правой частей схемы различны и представляют эквивалентные э. д. с. генераторов и нагрузок в положительной последовательности.

Выражения (1)—(3) для данного случая принимают вид:

$$i_{\kappa 1} = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{\text{pesl}1}} + \alpha_1^{(2)} \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{\text{pesl}2}} + \alpha_1^{(0)} \frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{\text{pesl}0}} + \frac{\dot{E}_{\text{II}} - U_{\kappa 1}}{Z_{\text{II}1}}, \quad (10)$$

$$i_{\kappa 2} = -\alpha_2^{(1)} \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{\text{pesl}1}} - \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{\text{pesl}2}} + \alpha_2^{(0)} \frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{\text{pesl}0}} - \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{\text{II}2}}, \quad (11)$$

$$i_{\kappa 0} = -\alpha_0^{(1)} \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{\text{pesl}1}} + \alpha_0^{(2)} \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{\text{pesl}2}} - \frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{\text{pesl}0}} - \frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{\text{II}0}}, \quad (12)$$

где

$$Z_{\text{pesl}1} = Z_{11} + \frac{Z_{12} Z_{10}}{Z_{12} + Z_{10}}, \quad (13)$$

$$Z_{\text{pesl}2} = Z_{12} + \frac{Z_{11} Z_{10}}{Z_{11} + Z_{12}}, \quad (14)$$

$$Z_{\text{pesl}0} = Z_{10} + \frac{Z_{11} Z_{12}}{Z_{11} + Z_{12}}, \quad (15)$$

$$\alpha_1^{(2)} = \frac{Z_{10}}{Z_{11} + Z_{10}}, \quad (16)$$

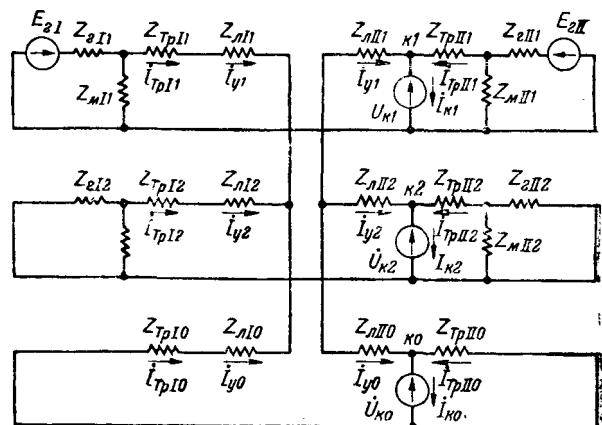


Рис. 2. Комплексная схема замещения, составленная по месту обрыва для схемы установки рис. 1 при учете нагрузочных сопротивлений  $Z_{\text{M}}$ .

$$\alpha_1^{(0)} = \frac{Z_{12}}{Z_{11} + Z_{12}}, \quad (17)$$

$$\alpha_2^{(1)} = \frac{Z_{10}}{Z_{12} + Z_{10}}, \quad (18)$$

$$\alpha_2^{(0)} = \frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_{12}}, \quad (19)$$

$$\alpha_0^{(1)} = \frac{Z_{12}}{Z_{12} + Z_{10}}, \quad (20)$$

$$\alpha_0^{(2)} = \frac{Z_{11}}{Z_{11} + Z_{10}}. \quad (21)$$

( $Z_1$  и  $Z_{\text{II}}$  — эквивалентные сопротивления левой и правой частей схемы, рис. 2).

Решая совместно выражения (10) и (11), (10) и (12) с учетом выражений (13) — (21) и условий для места короткого замыкания, можно получить

$$L\dot{E}_{21} + \frac{1}{Z_{\text{II}1}} \dot{E}_{2II} - A\dot{U}_{\kappa 1} + B\dot{U}_{\kappa 2} = 0, \quad (22)$$

$$M\dot{E}_{21} + \frac{1}{Z_{\text{II}2}} \dot{E}_{2II} - C\dot{U}_{\kappa 1} + D\dot{U}_{\kappa 2} = 0. \quad (23)$$

В выражениях (22) и (23)

$$A = \frac{2Z_{12} + 2Z_{10} - Z_{11}}{K} + \frac{1}{Z_{\text{II}1}}, \quad (24)$$

$$B = \frac{2Z_{11} + 2Z_{10} - Z_{12}}{K} + \frac{1}{Z_{\text{II}2}}, \quad (25)$$

$$C = \frac{4Z_{12} + Z_{10} + Z_{11}}{K} + \frac{1}{Z_{\text{II}1}} + \frac{1}{Z_{\text{II}0}}, \quad (26)$$

$$D = \frac{Z_{10} - 2Z_{11} - 2Z_{12}}{K} - \frac{1}{Z_{\text{II}0}}, \quad (27)$$

$$L = \frac{Z_{12} + 2Z_{10}}{K}, \quad (28)$$

$$M = \frac{2Z_{12} + Z_{10}}{K}. \quad (29)$$

где

$$K = Z_{11} Z_{12} + Z_{11} Z_{10} + Z_{12} Z_{10}. \quad (30)$$

Решая совместно выражения (22) и (23), получим:

$$\dot{U}_{\kappa 1} = \frac{(LD - MB) \dot{E}_1 - \frac{B - D}{Z_{II 1}} \cdot \dot{E}_{II}}{AD - BC}, \quad (31)$$

$$\dot{U}_{\kappa 2} = \frac{(CL - AM) \dot{E}_1 + \frac{C - A}{Z_{II 1}} \dot{E}_{II}}{AD - BC}, \quad (32)$$

$$U_{\kappa 0} = -(\dot{U}_{\kappa 1} + \dot{U}_{\kappa 2}). \quad (33)$$

Токи отдельных последовательностей определяются подстановкой величин  $U_{\kappa 1}$ ,  $U_{\kappa 2}$  и  $U_{\kappa 0}$  в выражения (10) — (12). Полные напряжения и токи находятся суммированием составляющих отдельных последовательностей.

Расчетные выражения для случая замыкания на землю с одновременным обрывом в одной фазе на линии с односторонним питанием (без учета и с учетом нагрузок). Расчетные выражения для данного вида повреждения необходимы для анализа релейной защиты при каскадном отключении одной фазы при замыкании ее на землю. Ниже приводятся расчетные выражения для случаев учета и неучета нагрузочных сопротивлений.

Нагрузки учитываются. Исходная схема и схема замещения даны на рис. 3. Для рассматриваемого случая действительны выражения (10) — (12) и (31) — (33), если в них принять  $E_{II} = 0$ . Если, кроме этого, принять равенство сопротивлений положительной и отрицательной последовательностей в левой части схемы рис. 3, то получаются весьма простые расчетные выражения, приведенные ниже.

Напряжения в месте короткого замыкания схемы рис. 3:

$$\dot{U}_{\kappa 0} = -\frac{3 + \frac{Z_{11} - Z_{10}}{Z_{II 1}} + \frac{2Z_{11} + Z_{10}}{Z_{II 2}}}{P} \dot{E}_z, \quad (34)$$

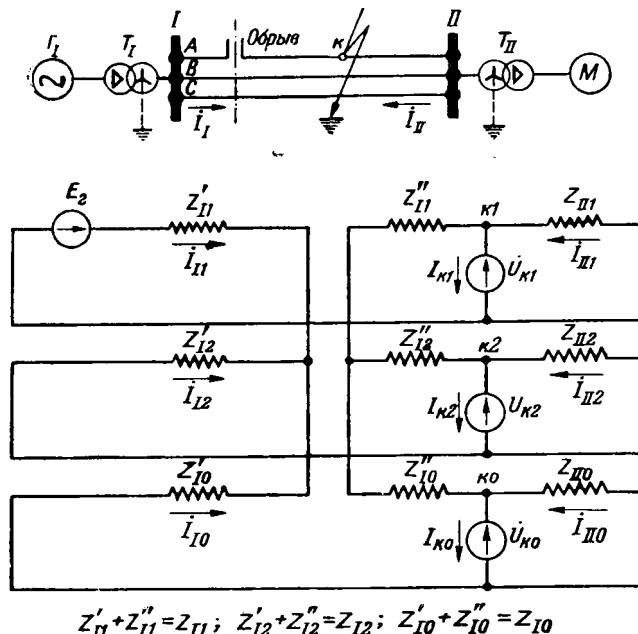


Рис. 3. Исходная схема и комплексная схема замещения для случая замыкания на землю с одновременным обрывом на линии с односторонним питанием при учете нагрузок.

$$\dot{U}_{\kappa 2} = -\frac{3 + \frac{Z_{10} - Z_{11}}{Z_{II 1}} + \frac{Z_{11} + 2Z_{10}}{Z_{II 0}}}{P} \dot{E}_z, \quad (35)$$

$$\dot{U}_{\kappa 1} = -(\dot{U}_{\kappa 2} + \dot{U}_{\kappa 0}), \quad (36)$$

где

$$P = (Z_{11} + 2Z_{10}) \left( \frac{2}{Z_{II 0}} + \frac{Z_{11}}{Z_{II 1} Z_{II 0}} + \frac{Z_{11}}{Z_{II 1} Z_{II 2}} + \frac{Z_{11}}{Z_{II 2} Z_{II 0}} \right) + (5Z_{11} + Z_{10}) \left( \frac{1}{Z_{II 1}} + \frac{1}{Z_{II 2}} \right) + 9. \quad (37)$$

Токи отдельных последовательностей, текущих в линии и нагрузке схемы рис. 3:

$$\begin{aligned} I_{11} = & \frac{1}{Z_{11}(Z_{11} + 2Z_{10})} \cdot [(Z_{11} + Z_{10})(\dot{E}_z - \dot{U}_{\kappa 1}) + \\ & + Z_{10}U_{\kappa 2} + Z_{11}\dot{U}_{\kappa 0}], \end{aligned} \quad (38)$$

$$I_{II 1} = -\frac{\dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{II 1}}, \quad (39)$$

$$\begin{aligned} I_{12} = & -\frac{1}{Z_{11}(Z_{11} + 2Z_{10})} [Z_{10}(\dot{E}_z - \dot{U}_{\kappa 1}) + \\ & + (Z_{11} + Z_{10})\dot{U}_{\kappa 2} - Z_{11}\dot{U}_{\kappa 0}], \end{aligned} \quad (40)$$

$$I_{II 2} = -\frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{II 2}}, \quad (41)$$

$$I_{10} = -\frac{1}{Z_{11} + 2Z_{10}} (\dot{E}_z + 3\dot{U}_{\kappa 0}), \quad (42)$$

$$I_{II 0} = -\frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{II 0}}. \quad (43)$$

Нагрузки не учитываются. В рассматриваемом случае [см. также Л. 4], в схеме рис. 3 следует принять  $Z_{II 1} = Z_{II 2} = \infty$ . При этом  $I_{11} = I_{\kappa 1}$ ;  $I_{12} = I_{\kappa 2}$ . Условия для места короткого замыкания и места обрыва:

$$I_{\kappa 1} = I_{\kappa 2} = I_{10} + I_{II 0}, \quad (44)$$

$$I_{\kappa 1} + I_{\kappa 2} + I_{10} = 0, \quad (45)$$

$$\dot{U}_{\kappa 1} + \dot{U}_{\kappa 2} + \dot{U}_{\kappa 0} = 0, \quad (46)$$

$$I_{10} = -2I_{\kappa 1}; I_{II 0} = 3I_{\kappa 1} \quad (47)$$

Напряжения отдельных последовательностей в месте короткого замыкания определяются, исходя из выражений (34) — (37) при  $Z_{II 1} = Z_{II 2} = \infty$ :

$$\dot{U}_{\kappa 1} = \frac{Z_{11} + 2Z_{10} + 6Z_{II 0}}{2Z_{11} + 4Z_{10} + 9Z_{II 0}} \dot{E}_z, \quad (48)$$

$$\dot{U}_{\kappa 2} = -\frac{Z_{11} + 2Z_{10} + 3Z_{II 0}}{2Z_{11} + 4Z_{10} + 9Z_{II 0}} \dot{E}_z, \quad (49)$$

$$\dot{U}_{\kappa 0} = -\frac{3Z_{II 0}}{2Z_{11} + 4Z_{10} + 9Z_{II 0}} \dot{E}_z. \quad (50)$$

Токи в месте короткого замыкания, исходя из выражений (38)–(40), равны:

$$I_{\kappa 1} = I_{\kappa 2} = \frac{E_e}{2Z_{11} + 4Z_{10} + 9Z_{110}}. \quad (51)$$

Выражения (48)–(51) могут быть также получены, исходя из уравнений, составленных для комплексной схемы замещения рис. 3.

**Выводы.** Приведенные в данной работе выражения для токов и напряжений при коротком замыкании с одновременным обрывом при учете и неучете нагрузок весьма просты и удобны для расчетов, необходимых для проектирования и анализа релейной защиты.

Расчетные выражения, приведенные для линий, соединяющих две генерирующие станции и системы, применимы для случаев, когда короткое замыкание и обрыв имеют место на одной и той же линии. Именно этот случай представляет для практики наибольший интерес.

## Приложение 1

Для примера дан вывод выражений, приведенных в табл. 1, для случая замыкания на землю фаз  $A$  и  $B$  и обрыва фазы  $A$ . Из выражения (1) — (3) с учетом выражений (4) — (8) и условий для места короткого замыкания

$$\alpha I_{\kappa 1} + \alpha^2 I_{\kappa 2} + I_{\kappa 0} = 0, \quad (52)$$

$$a \dot{U}_{\kappa 1} = a^2 \dot{U}_{\kappa 3} = \dot{U}_{\kappa 0}, \quad (53)$$

можно получить выражения для токов и напряжений в рассматриваемом случае:

$$\left[ \frac{a - a^2 \alpha_2^{(1)} - \alpha_0^{(1)}}{Z_{pe311}} + \frac{a}{Z_{II1}} \right] \dot{E}_2 + \left[ \frac{-a + a^2 \alpha_2^{(1)} + \alpha_0^{(1)}}{Z_{pe311}} - \frac{a}{Z_{II1}} \right] \dot{U}_{\kappa 1} + \left[ \frac{a \alpha_1^{(2)} - a^2 + \alpha_0^{(2)}}{Z_{pe311}} - \frac{a^2}{Z_{II2}} \right] \dot{U}_{\kappa 2} + \left[ \frac{a \alpha_1^{(0)} + a^2 \alpha_2^{(0)} - 1}{Z_{pe310}} - \frac{1}{Z_{II0}} \right] \dot{U}_{\kappa 0} = 0;$$

$$\left[ 1 - a \frac{Z_{10}}{Z_{11} + Z_{10}} - \frac{a^2 Z_{11}}{Z_{11} + Z_{10}} + \frac{Z_{11}(Z_{11} + 2Z_{10})}{(Z_{11} + Z_{10})Z_{111}} \right] \dot{E}_2 = \\ = \left[ 2 + \frac{Z_{10}}{Z_{11} + Z_{10}} + \frac{4Z_{11}}{Z_{11} + Z_{10}} + \right. \\ \left. + \frac{Z_{11}(Z_{11} + 2Z_{10})}{Z_{11} + Z_{10}} \left( \frac{2}{Z_{111}} + \frac{1}{Z_{110}} \right) \right] \dot{U}_{k1},$$

$$\dot{U}_{\kappa 1} = a \dot{U}_{\kappa 2} = a^2 \dot{U}_{\kappa 0} =$$

$$= \frac{(1-a^2) + (1-a) \frac{Z_{10}}{Z_{11}} + \frac{Z_{11} + 2Z_{10}}{Z_{11}}}{6 + 3 \frac{Z_{10}}{Z_{11}} + (Z_{11} + 2Z_{10}) \left( \frac{2}{Z_{11}} + \frac{1}{Z_{10}} \right)} \dot{E}_z, \quad (54)$$

$$\dot{I}_{11} = \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{pe311}} + \frac{\alpha_1^{(2)} \dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{pe312}} + \frac{\alpha_1^{(0)} \dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{pe310}} = \frac{\dot{E}_2}{Z_{pe311}} -$$

$$\begin{aligned}
 & - \left[ \frac{1}{Z_{pes11}} - \frac{a^2 z_1^{(2)}}{Z_{pes12}} - \frac{a z_1^{(0)}}{Z_{pes10}} \right] \dot{U}_{\kappa 1} = \\
 & = \frac{\left( 1 + \frac{Z_{10}}{Z_{11}} \right) \dot{E}_2 - \left[ (1-a) + (1-a^2) \frac{Z_{10}}{Z_{11}} \right] \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{11} + 2Z_{10}}, \quad (55)
 \end{aligned}$$

$$I_{\text{II}} \cdot 1 = \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{\text{II} 1}}, \quad (56)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{12} &= -\alpha_2^{(1)} \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{pes11}} - \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{pes12}} + \alpha_2^{(0)} \frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{pes10}} = \\ &= -\frac{\frac{Z_{10}}{Z_{11}} \dot{E}_2 + \left[ (a - a^2) + (1 - a^2) \frac{Z_{10}}{Z_{11}} \right] \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{11} + 2Z_{10}}, \quad (57) \end{aligned}$$

$$J_{\text{II}2} = -\frac{a^2 \dot{U}_{\kappa 1}}{\gamma}, \quad (58)$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{10} &= -\alpha_0^{(1)} \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{\kappa 1}}{Z_{pes11}} + \alpha_0^{(2)} \frac{\dot{U}_{\kappa 2}}{Z_{pes12}} - \frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{pes10}} = \\ &= -\frac{\dot{E}_2 + 3\dot{U}_{\kappa 0}}{Z_{pes1} + 2Z_{pes0}}, \end{aligned} \quad (59)$$

$$\dot{I}_{\Pi,0} = -\frac{\dot{U}_{\kappa 0}}{z}. \quad (60)$$

Аналогично выведены выражения для токов и напряжений для других случаев повреждений, приведенные в таблице.

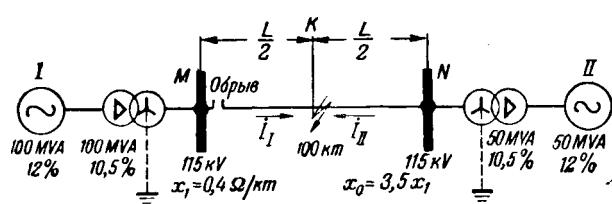


Рис. 4. Исходная схема, принятая для примера расчета токов короткого замыкания между фазами  $A$  и  $B$  с одновременным обрывом в фазе при двухстороннем питании.

## Расчетные выражения для различных случаев короткого замыкания с

Вид повреждения	Замыкание на землю и обрыв в фазе $A$	Замыкание на землю фаз $A$ и $B$ при обрыве фазы $A$
	1	2
Условия, характеризующие повреждение	$I_{k1} = I_{k2} = I_{10} + I_{110}$ $\dot{U}_{k1} + \dot{U}_{k2} + \dot{U}_{k0} = 0$	$aI_{k1} + a^2I_{k2} + I_{10} + I_{110} = 0$ $a\dot{U}_{k1} = a^2\dot{U}_{k2} = \dot{U}_{k0}$
Расчетные выражения	$\dot{U}_{k1} = \frac{6 + (Z_{11} + 2Z_{10}) \left( \frac{1}{Z_{111}} + \frac{1}{Z_{110}} \right)}{9 + (Z_{11} + 2Z_{10}) \left( \frac{1}{Z_{111}} + \frac{2}{Z_{110}} \right)} \dot{E}_2$ $\dot{U}_{k2} = - \frac{3 + \frac{Z_{11} + 2Z_{10}}{Z_{110}}}{9 + (Z_{11} + 2Z_{10}) \left( \frac{1}{Z_{111}} + \frac{2}{Z_{110}} \right)} \dot{E}_2$ $U_{k0} = - \frac{3 + \frac{Z_{11} + 2Z_{10}}{Z_{111}}}{9 + (Z_{11} + 2Z_{10}) \left( \frac{1}{Z_{111}} + \frac{2}{Z_{110}} \right)} \dot{E}_2$ $I_{111} = I_{112} = - \frac{1}{Z_{111} + 2Z_{10}} (\dot{U}_{k2} - \dot{U}_{k0})$ $I_{111} = I_{112} = - \frac{\dot{U}_{k2}}{Z_{111}}$ $I_{10} = - 2I_{111}$ $I_{110} = - \frac{\dot{U}_{k0}}{Z_{110}}$	$\dot{U}_{k1} = \frac{(1 - a^2) + (1 - a) \frac{Z_{10}}{Z_{11}} + \frac{Z_{11} + 2Z_{10}}{Z_{111}}}{6 + 3 \frac{Z_{10}}{Z_{11}} + (Z_{11} + 2Z_{10}) \left( \frac{2}{Z_{111}} + \frac{1}{Z_{110}} \right)} \dot{E}_2$ $I_{111} = \frac{\left( 1 + \frac{Z_{10}}{Z_{11}} \right) \dot{E}_2 - \left[ (1 - a) + (1 - a^2) \frac{Z_{10}}{Z_{11}} \right] \dot{U}_{k1}}{Z_{111} + 2Z_{10}}$ $I_{112} = - \frac{\frac{Z_{10}}{Z_{11}} \dot{E}_2 + \left[ (a - a^2) + (1 - a^2) \frac{Z_{10}}{Z_{11}} \right] \dot{U}_{k1}}{Z_{111} + 2Z_{10}}$ $I_{110} = - \frac{\dot{E}_2 + 3\dot{U}_{k0}}{Z_{111} + 2Z_{10}}$ $I_{110} = - \frac{\dot{U}_{k0}}{Z_{110}}$

## Приложение 2

Для иллюстрации способа расчета по выражениям таблицы произведен расчет токов и напряжений при замыкании между фазами  $A$  и  $B$  и обрыве в фазе  $A$  в схеме рис. 4.

На основании исходных данных схемы рис. 4, принимая э. д. с. генераторов приближенно равными напряжению на шинах, можно получить:

$$E_{21} = E_{211} = \frac{115}{\sqrt{3}},$$

$$Z_{11} = Z_{12} = j50\Omega; Z_{111} = Z_{112} = j80\Omega; Z_{10} = j84\Omega;$$

$$Z_{110} = j98\Omega; Z_0 = Z_{10} + Z_{110} = j182\Omega.$$

На основании выражений таблицы:

$$U_{k1} = aU_{k2} = \frac{1 + \frac{182}{50} + \frac{50 + 2 \cdot 182}{80} + \left( 0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \frac{182}{50}}{2 + 3 \frac{182}{50} + 2 \frac{50 + 2 \cdot 182}{80}} \times \frac{115}{\sqrt{3}} = 34 \text{ kV } |15^\circ,$$

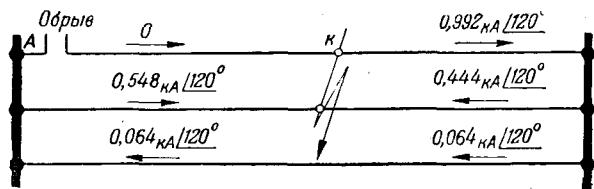


Рис. 5. Распределение полных токов в схеме рис. 4.

$$I_{A112} = I_{111} + I_{112} = 0,161 \text{ kA } | -60^\circ,$$

$$I_{A112} = I_{111} + I_{112} = 0,829 \text{ kA } | -60^\circ,$$

$$I_{B112} = a^2 I_{111} + a I_{112} = 0,386 \text{ kA } |120^\circ,$$

$$I_{B112} = a^2 I_{111} + a I_{112} = 0,605 \text{ kA } |120^\circ,$$

$$I_{C112} = -(I_{A112} + I_{B112}) = 0,225 \text{ kA } | -60^\circ,$$

$$I_{C112} = -(I_{A112} + I_{B112}) = 0,225 \text{ kA } |120^\circ,$$

$$I_{110} = -I_{110} = -I_{A112} = 0,161 \text{ kA } |120^\circ.$$

одновременным обрывом одной фазы на линии с двухсторонним питанием

Таблица 1

Замыкание между фазами $A$ и $B$ при обрыве фазы $A$	Замыкание между тремя фазами при обрыве фазы $A$	Замыкание трех фаз на землю при обрыве фазы $A$
3	4	5
$a\dot{I}_{k1} = -a^2\dot{I}_{k2}$ $a\dot{U}_{k1} = a^2\dot{U}_{k2}$	$\dot{U}_{k1} = \dot{U}_{k2} = 0$	$\dot{U}_{k1} = \dot{U}_{k2} = \dot{U}_{k0} = 0$
$\dot{U}_{k1} = \frac{\left(1 + \frac{Z_0}{Z_{11}} + \frac{Z_{11} + 2Z_0}{Z_{11}}\right) - a\frac{Z_0}{Z_{11}}}{2 + 3\frac{Z_0}{Z_{11}} + 2\frac{Z_{11} + 2Z_0}{Z_{11}}} \dot{E}_2$ $\dot{I}_{11} = \frac{\left(1 + \frac{Z_0}{Z_{11}}\right) \dot{E}_2 - \left[1 + \frac{Z_0}{Z_{11}} - a^2 \frac{Z_0}{Z_{11}}\right] \dot{U}_{k1}}{Z_{11} + 2Z_0}$ $\dot{I}_{11} = \frac{\dot{E}_2 - \dot{U}_{k1}}{Z_{11}}$ $\dot{I}_{12} = \frac{\frac{Z_0}{Z_{11}} \dot{E}_2 + \left[a^2 \left(1 + \frac{Z_0}{Z_{11}}\right) - \frac{Z_0}{Z_{11}}\right] \dot{U}_{k1}}{Z_{11} + 2Z_0}$ $\dot{I}_{12} = -\frac{a^2 \dot{U}_{k1}}{Z_{11}}$ $\dot{I}_{10} = -\dot{I}_{11} = -\dot{I}_{A112}$	$\dot{I}_{11} = \frac{Z_{11} + Z_0}{Z_{11}(Z_{11} + 2Z_0)} \dot{E}_2$ $\dot{I}_{11} = \frac{\dot{E}_2}{Z_{11}}$ $\dot{I}_{12} = -\frac{Z_0}{Z_{11}(Z_{11} + 2Z_0)} \dot{E}_2$ $\dot{I}_{12} = 0$ $\dot{I}_{10} = -\dot{I}_{11} =$ $\dot{I}_{10} = -\frac{1}{Z_{11} + 2Z_0} \dot{E}_2$	$\dot{I}_{11} = \frac{Z_{11} + Z_{10}}{Z_{11}(Z_{11} + 2Z_{10})} \dot{E}_2$ $\dot{I}_{11} = 0$ $\dot{I}_{12} = -\frac{Z_{10}}{Z_{11}(Z_{11} + 2Z_{10})} \dot{E}_2$ $\dot{I}_{12} = 0$ $\dot{I}_{10} = -\frac{1}{Z_{11} + 2Z_{10}} \dot{E}_2$ $\dot{I}_{10} = 0$

Примечания к таблице.

1. При замыкании на землю фаз  $A$  и  $C$  с обрывом в фазе  $A$  выражения аналогичны приведенным в п. 2, но вместо величин  $a$  и  $a^2$  следует писать  $a^2$  и  $a$ .2. При замыкании между фазами  $A$  и  $C$  с обрывом в фазе  $A$  выражения аналогичны приведенным в п. 3, но вместо величины  $a$  и  $a^2$  следует писать  $a^2$  и  $a$ .

Полные токи находятся суммированием токов положительной и отрицательной последовательностей и токов нулевой последовательности; распределение полных токов дано на рис. 5.

Как видно из приведенного примера, в рассматриваемом случае векторы суммарных токов положительной и отрицательной последовательностей в отдельных фазах и токов нулевой последовательности располагаются по одной оси.

Автор считает долгом отметить помощь, оказанную Т. Н. Дородновой, при расчетах и анализе материала к данной статье.

#### Литература

1. Н. Н. Щедрин. К теории сложных несимметричных режимов электрических систем. Электричество, № 5, 1946.
2. О. М. Богатырев и А. Б. Чернин. Метод расчета токов короткого замыкания при одновременном обрыве провода. Эл. станции, № 2, 1941.
3. А. Б. Чернин. Расчеты токов короткого замыкания при одновременном обрыве фазы для анализа релейной защиты. Сборник МЭС по релейной защите и автоматике, Госэнергоиздат. 1948.
4. П. К. Фейст. Поведение релейной защиты при работе двумя фазами элементов сети на участках с односторонним питанием. Сборник "Релейная защита и системная автоматика Мосэнерго", Госэнергоиздат. 1946.



# Импульсные характеристики линейной изоляции

Доктор техн. наук, проф. А. А. ГОРЕВ и кандидат техн. наук Б. М. РЯБОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

В Ленинградском политехническом институте им. Калинина кроме кривых критических (50%) разрядных напряжений для типичных электродов [Л. 1] были получены вольтсекундные характеристики для стандартного стержневого разрядника.

Получение вольтсекундных характеристик изоляции при очень высоких напряжениях и малых предразрядных временах связано с большими измерительными трудностями. Вследствие этого вольтсекундные характеристики одного и того же объекта при малых предразрядных временах, полученные в различных лабораториях, существенно отличаются друг от друга. Это обстоятельство не позволило до настоящего времени нормировать вольтсекундную характеристику даже для стандартного стержневого разрядника.

Для искровых промежутков типа провод — провод или провод — плоскость, электроды которых обладают значительным протяжением, получение вольтсекундных характеристик осложняется также появлением предразрядных ионных токов, вызывающих падение напряжения во внутреннем сопротивлении импульсного генератора и соответствующее искажение формы волны напряжения на искровом промежутке.

В дальнейшем приводится сравнение результатов испытаний, произведенных в ЛПИ, с американскими данными [Л. 3 и 4].

Предварительно проведенные в ЛПИ испытания показали, что омический делитель напряжения с подачей напряжения к пластинам катодного осциллографа через кабель вносит существенную ошибку, возрастающую с уменьшением предразрядного времени и достигающую 12—15% от значения разрядного напряжения при предразрядном времени около 1—2  $\mu$ sec. Поэтому все основные опыты по снятию вольтсекундных характеристик производились как с омическим делителем, так и с емкостным делителем, электрод высокого напряжения которого имел диаметр 3,5 м и был удален от генератора импульсов напряжения на расстояние 25 м. Во всех опытах коронирование отсутствовало и на

сообщаются опытные данные об импульсных разрядных напряжениях стандартного стержневого разрядника и промежутка провод — заземленная плоскость. Рассматривается явление искажения импульсных волн, возникающее при испытании протяженных коронирующих электродов.

электроде высокого напряжения и на приемном электроде делителя. Коэффициент деления емкостного делителя определялся с помощью измерительных шаров диаметром 2,5 м. Градуировочная кривая для шаров этого размера приведена на рис. 1.

Для получения большей надежности результатов наблюдений коэффициент деления определялся при различных значениях напряжения во время снятия каждой вольтсекундной характеристики. Для каждой вольтсекундной характеристики снималось от 50 до 60 осциллограмм при

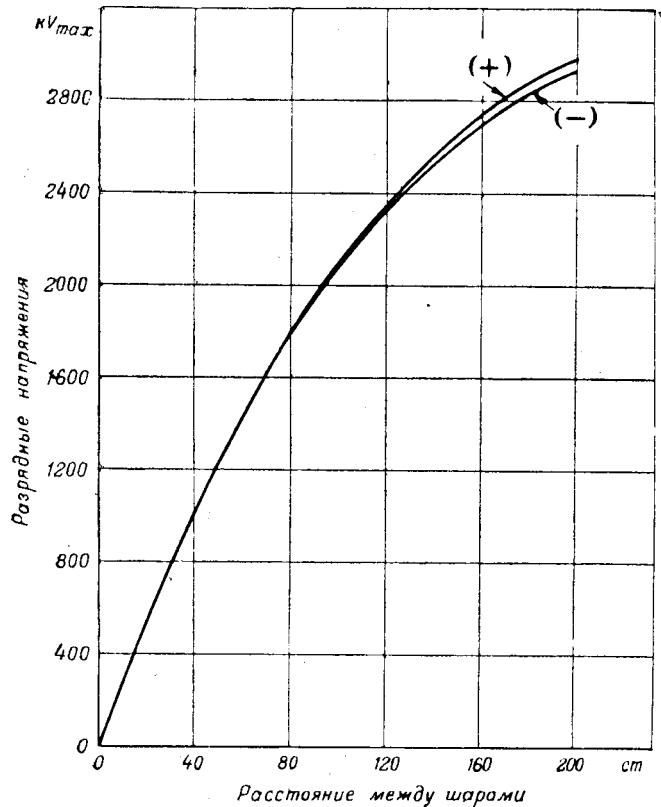


Рис. 1. Градуировочная кривая шарового разрядника с диаметром шаров 250 см. Один шар заземлен. Нормальные атмосферные условия: давление 760 мм рт. ст., температура 20°C.

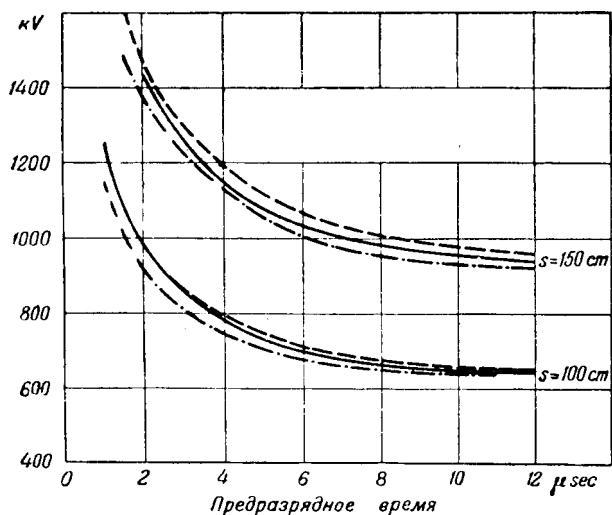


Рис. 2. Вольтсекундные характеристики стандартного стержневого разрядника, полученные с омическим делителем, для волны  $+1,5/40 \mu\text{sec}$ , приведенные к стандартным атмосферным условиям.  $B = 760 \text{ mm rt. ст.}$ ;  $t = 25^\circ\text{C}$ ; абсолютная влажность  $14,87 \text{ g/m}^3$ . Расстояние между электродами  $s = 100$  и  $150 \text{ см}$ .

различных разрядных напряжениях — от возможного максимума до минимального разрядного напряжения. Обработка осциллограмм производилась по методу, принятому ГОСТ. Построение вольтсекундных характеристик производилось по методу наименьших квадратов в предположении, что веса наблюдений искомой функции — в данном случае величины разрядного напряжения — пропорциональны корню квадратному из величины предразрядного времени. Это предположение оправдывается тем, что значение разрядного напряжения при больших предразрядных временах является более устойчивым, чем при малых предразрядных временах. Полученные указанным выше способом вольтсекундные характеристики приводились к соответствующим атмосферным условиям —  $B = 760 \text{ mm rt. ст.}$ ,  $t = 25^\circ\text{C}$ , абсолютная влажность  $14,87 \text{ g/m}^3$  [Л. 5]. Для электродов провод — заземленная плоскость поправка на влажность определялась по кривой для стержневого разрядника.

Импульсные характеристики [Л. 3 и 4] были получены с помощью омических делителей; поэтому при предварительном сравнении для получения характеристики, по возможности, в одинаковых условиях мы сняли вольтсекундные характеристики стандартного стержневого разрядника и с омическим делителем напряжения, имевшем сопротивление плеча высокого напряжения около  $25\,000 \Omega$ . Напряжение к отклоняющим пластинам катодного осциллографа подводилось одножильным освивцованным кабелем, длиной около 15 м, с бумажной изоляцией на напряжение 35 kV. Сопротивление плеча высокого напряжения состояло из 7 элементов. Каждый элемент, представляющий собой каркас из гетинаксовых полосок, на который бифилярно наматывается проволока, был погружен в заполненную маслом гетинаксовую трубку. Наши ха-

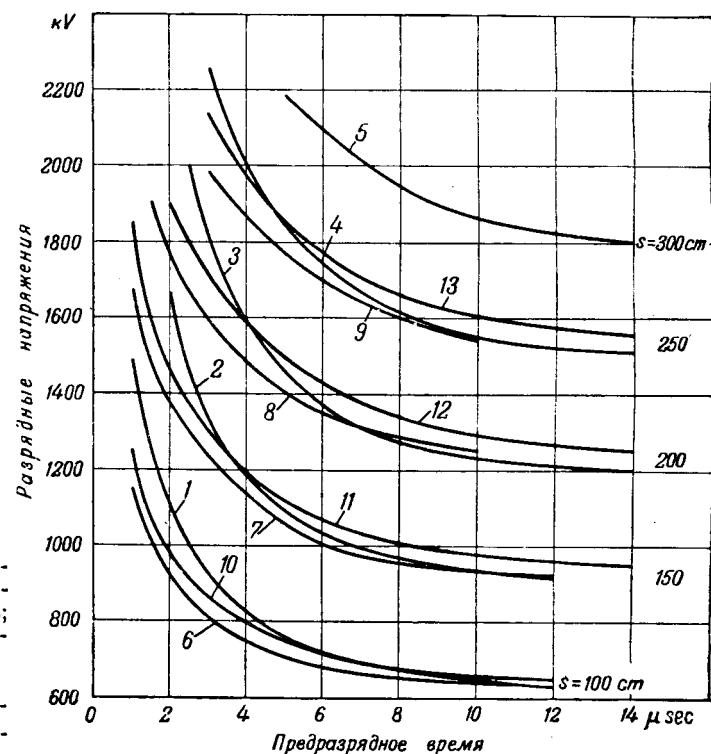


Рис. 3. Вольтсекундные характеристики стандартного стержневого разрядника для волны  $+1,5/40 \mu\text{sec}$ .  $B = 760 \text{ mm rt. ст.}$ ;  $t = 25^\circ\text{C}$ ; абсолютная влажность  $14,87 \text{ g/cm}^3$ . Кривые: 1, 2, 3, 4 и 5 — лаборатория ЛПИ (емкостный делитель); 6, 7, 8 и 9 — ГЕ (омический делитель); 10, 11, 12 и 13 — Вестинггауз (омический делитель).

рактеристики, полученные с омическим делителем, достаточно точно совпадают с характеристиками американских лабораторий (рис. 2). Совпадение характеристик дает основание считать, что расхождение в ходе вольтсекундных характеристик, полученных в ЛПИ с помощью емкостного делителя, с характеристиками американских лабораторий объясняется только ошибками измерений, допущенными в этих лабораториях вследствие применения омических делителей напряжения.

На рис. 3 приведены вольтсекундные характеристики, полученные в различных лабораториях. Видно, что вольтсекундные характеристики, полученные в ЛПИ при предразрядном времени больше  $5 \mu\text{sec}$ , проходят между характеристиками GE и Вестинггауз или совпадают с одной из них. При малых предразрядных временах характеристики ЛПИ проходят выше характеристик других лабораторий. Для предразрядного времени  $2 \mu\text{sec}$  разница достигает приблизительно 18 %. Для  $3 \mu\text{sec}$  эта разница несколько меньше (рис. 4). На том же рис. 4 приведена характеристика критического (50 %) разрядного напряжения, полученная в ЛПИ.

При испытании образца «провод — заземленная плоскость», состоявшего из провода длиной 6,4 м и диаметром 3 mm в одном случае и площадки  $9 \times 15 \text{ m}^2$ , оклеенной фольгой, и из провода марки AC-150/27, диаметром 17 mm во втором случае, было обнаружено следующее яв-

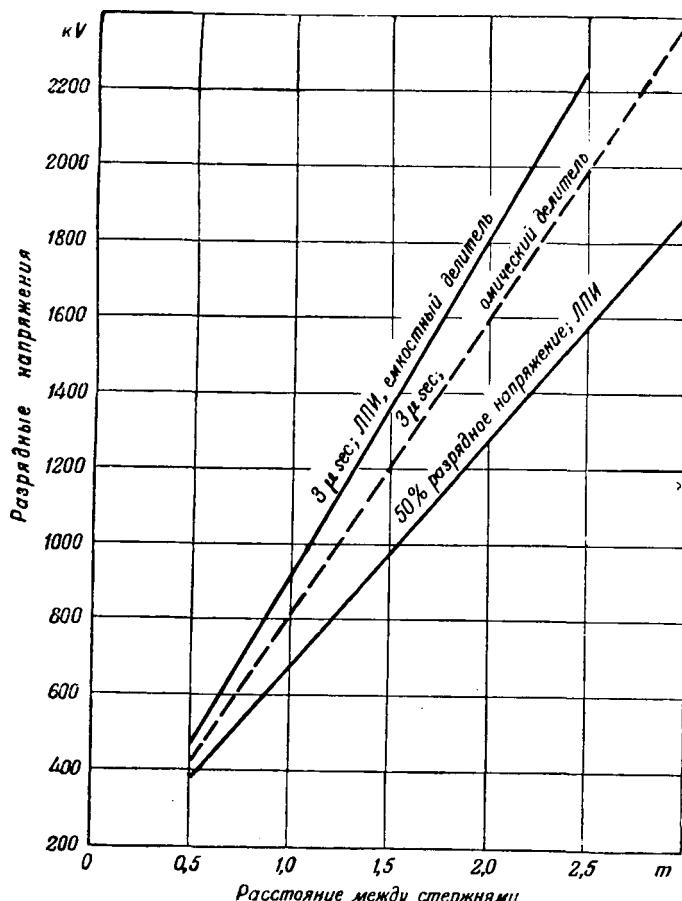


Рис. 4. Импульсные характеристики стандартного стержневого разрядника для волны  $+1,5/40 \mu\text{sec}$ .  $B = 760 \text{ mm rt. st.}$ ;  $t = 25^\circ\text{C}$ ; абсолютная влажность  $14,87 \text{ g/cm}^3$ . — — — по данным GE.

ление: пока расстояние между проводом и плоскостью было 2 м, осциллограмма разряда при напряжении, близком к критическому (50%) разрядному напряжению и несколько превышающем его, имела нормальный вид, оставаясь не искаженной до момента среза (рис. 5). Если значительно увеличить приложенное к образцу напряжение, наступает сильное искажение волны. При уменьшении расстояния между электродами искажение формы волны становится очень сильным (рис. 6). На этом рисунке пунктирная кривая показывает волну холостого хода (не срезанную), получающуюся при том же разрядном напряжении генератора. При малых расстояниях искажение формы волны можно наблюдать при значениях напряжения, слегка превышающих критическое разрядное напряжение. При критическом разрядном напряжении и ниже никакого искажения формы волны не наблюдалось.

Наблюдавшееся искажение формы волны в значительной мере зависит от емкости импульсного генератора и величины демпфирующего сопротивления. Осциллограммы рис. 5 и 6 были получены, когда емкость генератора при разряде равнялась  $2980 \mu\text{F}$ , а демпфирующее сопротивление  $1100 \Omega$ . Увеличение емкости генератора импульсов напряжения и уменьшение его демпфирующего сопротивления может значитель-

Рис. 5. Осциллограмма напряжения при разряде на образце: провод—плоскость. Провод длиной 6,4 м и диаметром 3 мм;  $U = 1800 \text{ kV}$ ;  $s = 3,4 \text{ м}$ . Период синусоиды —  $8 \mu\text{sec}$ .

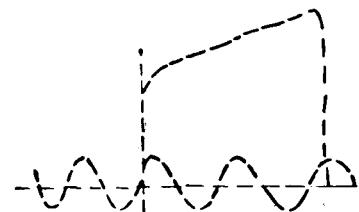


Рис. 6. Осциллограмма напряжения при разряде на образце провод—плоскость. Провод длиной 6,4 м и диаметром 3 мм.  $U = 1175 \text{ kV}$ ;  $s = 1,2 \text{ м}$ . Период синусоиды —  $0,44 \mu\text{sec}$ .

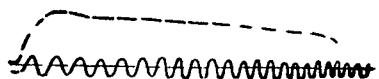


Рис. 7. Осциллограмма напряжения при разряде на образце провод—плоскость. Провод длиной 6,4 м и диаметром 3 мм.  $U = 1070 \text{ kV}$ ;  $s = 2,0 \text{ м}$ . Период синусоиды —  $1,53 \mu\text{sec}$ .

но уменьшить указанные искажения формы волны, однако полностью избежать этого искажения невозможно.

Все последующие опыты, так же как и описанное выше испытание стержневого разрядника, были проведены с переоборудованным генератором [Л. 2], имевшим емкость при разряде  $1500 \mu\text{F}$  и полное демпфирующее сопротивление  $850 \Omega$ .

Наблюдения показали, что при больших расстояниях между электродами (например,  $3 \div 3,5 \text{ м}$ ) корона около провода образуется в виде не очень яркого свечения, охватывающего более или менее близкую к проводу зону. Из этой зоны выступают значительно более длинные стримеры. При расстояниях между электродами 2 м и меньше свечение становится более интенсивным и заполняет весь промежуток между электродами, образуя светящуюся фиолетовую полосу; это свидетельствует о наличии весьма значительного предразрядного ионного тока между электродами. Следует думать, что этот ионный ток значительно превосходит емкостный ток между электродами и вызывает большое падение напряжения в демпфирующем сопротивлении и индуктивности генератора. В силу этого процесс развития разряда задерживается, и окончательный срез волны наступает спустя значительное время, и, с другой стороны, искажается форма волны.

Чтобы избежать искажения формы волны при напряжениях, значительно превышающих критическое разрядное напряжение, демпфирующее сопротивление генератора было уменьшено до

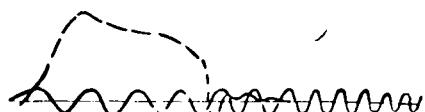


Рис. 8. Осциллограмма напряжения при разряде на образце: провод — плоскость. Провод длиной 6,4 м диаметром 3 мм.  $U = 1549$  кВ;  $s = 2,0$  м. Период синусоиды — 1,53  $\mu$ sec.



Рис. 9. Осциллограмма напряжения при разряде на образце: провод — плоскость. Провод АС-150/27 длиной 6,4 м.  $U = 1610$  кВ. Период синусоиды — 1,53  $\mu$ sec.

570  $\Omega$ ; однако, искажение формы волны продолжало оставаться значительным, тогда как при критическом разрядном напряжении и несколько выше его искажение отсутствовало. На рис. 7 показана осциллограмма волны на образце „провод — заземленная плоскость“ при расстоянии между электродами  $s = 2$  м и диаметре провода 3 мм при напряжении, близком к критическому разрядному. Искажение формы волны отсутствует. Поражает длительность предразрядного времени, достигающего 32  $\mu$ sec. Наибольшее предразрядное время, наблюдавшееся при испытании стандартного стержневого разрядника, — 19  $\mu$ sec. На рис. 8 приведена искаженная волна, полученная при испытании того же образца. В этом случае амплитудное значение напряжения равно 1549 кВ, а предразрядное время — 6  $\mu$ sec. В обоих случаях демпфирующее сопротивление генератора равнялось 823  $\Omega$ .

На рис. 9 приведена осциллограмма искаженных волн, полученных при испытании провода АС-150/27. Амплитудное значение напряжения равно 1610 кВ, предразрядное время — 4,9  $\mu$ sec и при этом демпфирующее сопротивление генератора равнялось 570  $\Omega$ .

При производстве описываемых опытов абсолютная влажность была близка к 9 г/м<sup>3</sup>.

Существенной разницы в ходе вольтсекундных характеристик для провода диаметром 3 мм и для провода диаметром 17 мм (АС-150/27) не было замечено.

Вольтсекундные характеристики промежутка «провод — заземленная плоскость» для провода АС-150/27, приведенные к стандартным атмосферным условиям, даны на рис. 10. Вследствие искажения формы приложенной к образцу волны не удавалось получить на образце напряжений, значительно превышающих критическое разрядное напряжение, и предразрядное время меньше 3  $\mu$ sec.

Следует указать, что сопротивление в 570  $\Omega$ , через которое разряжался импульсный генера-

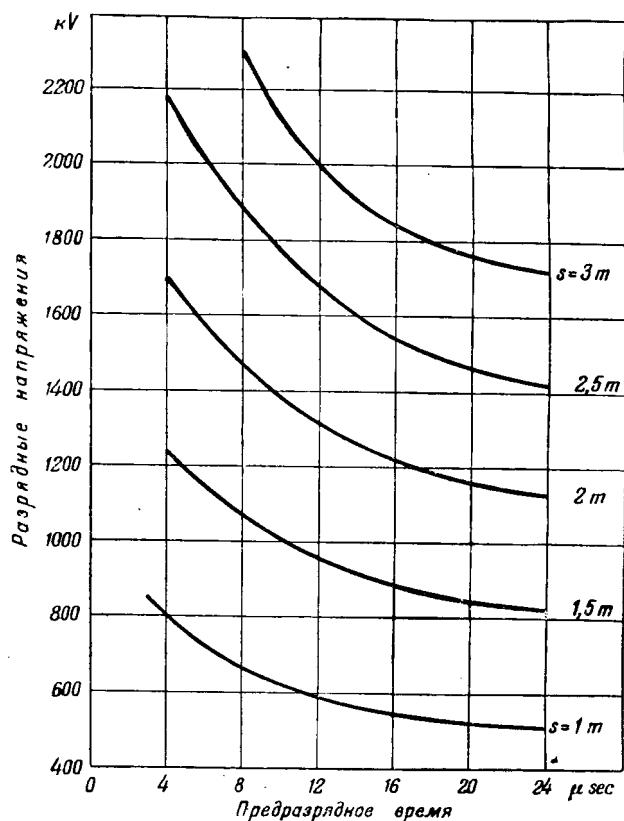


Рис. 10. Вольтсекундные характеристики образца провод — плоскость для волны  $+1,5/40$   $\mu$ sec, приведенные к стандартным атмосферным условиям;  $B = 760$  мм рт. ст.,  $t = 25^\circ\text{C}$ , абсолютная влажность 14,87 г/м<sup>3</sup>. Провод АС-150/27, длиною 6,4 м.

тор, близко по своему значению к величине волнового сопротивления канала молнии. Таким образом, при протяженных сильно коронирующих промежутках искажение формы волны следует рассматривать, как характерную особенность самого явления разряда, имеющую место не только в лаборатории, но и при грозовых разрядах в натуральных условиях. С этой точки зрения для получения сравнимых результатов достаточно, чтобы стандартной была не искаженная волна при значениях разрядного напряжения, близких к критическому, а при значительных перенапряжениях общее сопротивление, через которое разряжается импульсный генератор, должно быть близким величине волнового сопротивления канала молнии. Попытки получения не искаженной стандартной волны при включенном коронирующем промежутке значительных размеров следует признать бесцельными.

#### Литература

1. А. А. Горев и Б. М. Рябов. Импульсные характеристики линейной изоляции. Электричество, № 10, стр. 28, 1945.
2. А. А. Горев и Б. М. Рябов. Генератор импульсов напряжения на 4300 кВ. Электричество, № 5, стр. 31, 1941.
3. Dowell, Foust. GER, стр. 141, 1937.
4. Mc Auley. The El. Journal, стр. 273, 1938.
5. Recomendations of High-Voltage Testing (EEI NEMA), El. Eng., т. 59, Tr., стр. 598, 1940.

# Построение вольтсекундных характеристик изоляции

Кандидат техн. наук А. С. ЗИНГЕРМАН

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Расчет грозоупорности подстанций или линий электропередачи может быть произведен при наличии данных о поведении изоляции при тех волнах перенапряжения, которые следует ожидать на подстанции или линии при поражении их молнией. Это поведение изоляции описывается вольтсекундными характеристиками.

Вольтсекундные характеристики изоляции представляют собой семейство кривых  $U=f(t)$ , зависящих от формы волны. Каждая кривая характеризуется определенной вероятностью разряда с запаздыванием  $t$  при напряжении волны  $U$ , которая является параметром кривой.

Имеющиеся вольтсекундные характеристики представляют собой только одну кривую, причем различные ее участки имеют различную неизвестную вероятность. Большинство вольтсекундных кривых, которыми пользуются в Союзе, снимались в лаборатории им. Смуррова, и их относят к стандартной волне 1,5/40  $\mu$ sec. Это обозначение волны соответствует старому стандарту, действовавшему в то время, когда снимались кривые. По новому стандарту эта волна напряжения должна быть обозначена 0,7/40  $\mu$ sec. Кроме того, при больших напряжениях осциллограф приключается через омический делитель, и истинная форма волны остается неизвестной. Таким образом, даже для стандартной волны в действительности не имеется никаких кривых.

Сравнение кривых, снятых разными авторами в Союзе и за границей, показывает расхождение, часто весьма значительное. Это объясняется, с одной стороны, старой, несовершенной методикой снятия вольтсекундных кривых, а с другой стороны, отсутствием данных для учета разных условий, при которых снимались кривые.

Рядом авторов [Л. 1, 2, 8 и др.] были предложены эмпирические формулы для составления вольтсекундной кривой изоляции при любой форме волны. По поводу предложенных формул можно сделать следующие замечания.

Поведение высоковольтной изоляции описывается ее вольтсекундной характеристикой. Имеющиеся вольтсекундные характеристики высоковольтных изоляторов не удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к ним, вследствие неполных и большей частью неточных данных, которые даются этими характеристиками, и несовершенной методикой их получения. Предлагается новая методика построения вольтсекундных характеристик для волны любой формы и знака, основанная на физических процессах, происходящих в разряде.

Во-первых, все формулы приводят не к семейству кривых, а к одной кривой, следовательно, не дают вероятности разряда. Во-вторых, эти формулы либо основаны на некоторых постуатах, не доказанных, а иногда и присторочащих экспериментальным данным, либо базируются на феноменологии явлений электрического разряда, а не на физических процессах, происходящих в нем, либо вовсе не имеют никакого обоснования и являются чисто эмпирическими. Вследствие этого справедливость формул вызывает сомнение, и они могут иметь в лучшем случае только частичное применение. Поэтому представляется весьма интересным разработать методику составления вольтсекундных характеристик (для любой формы волны и полярности), базирующуюся на действительных физических процессах, происходящих в разряде, и на закономерностях, вытекающих из них.

**Вольтсекундная характеристика.** В основе вольтсекундной характеристики лежит явление запаздывания электрического разряда. Теоретические и экспериментальные [Л. 3—5] исследования этого явления показали, что запаздывание электрического разряда имеет статистический характер и состоит из двух компонент, каждая из которых подчиняется своей статистике. Первая компонента — это холостое время, время выжидания случайных благоприятных обстоятельств для начала разряда. Вторая компонента — рабочее время, в течение которого формируется разрядный канал. Обе компоненты зависят от ряда факторов, и в особенности от напряжения. С увеличением напряжения каждая из компонент уменьшается в разной степени, причем при переходе из области критических напряжений в область перенапряжений изменение общего времени запаздывания происходит в очень резкой форме. Это видно из рис. 1, на котором приведены времена запаздывания с вероятностью 50% стержневых промежутков в за-



Рис. 1. Времена запаздывания разряда стержневых промежутков длиной  $d = 20, 25$  и  $30$  см в зависимости от напряжения положительной прямоугольной и бесконечной волны напряжения при вероятности  $\psi = 0,5$ .

всимости от напряжения положительной прямоугольной и бесконечной волны напряжения.

Известно, что если постепенно увеличивать напряжение волны, подаваемой на промежуток, то пробой будет происходить при разных значениях напряжения. Процентное число пробоев, происходящих при напряжении, меньшем или равном  $U$ , будет расти с увеличением  $U$ . Диапазон напряжений, в котором относительное число пробоев меньше 100 %, мы называем областью критических напряжений. Напряжение выше того, которому соответствует 100 % пробоев, мы называем перенапряжением. Граница между областями критического напряжения и перенапряжения для технических промежутков при прямоугольной и достаточно длинной волне лежит примерно на 20—25 % выше напряжения соответствующего 50 % пробоев (или среднего пробивного постоянного напряжения).

Наши исследования показали, что процессы, происходящие в разрядном промежутке, сильно изменяются при переходе из первой области во вторую. Это весьма резко влияет на запаздывание электрического разряда. Если в области перенапряжений время запаздывания измеряется десятками долей и единицами  $\mu$ sec, то в области критических напряжений запаздывание измеряется десятками и сотнями  $\mu$ sec.

В области перенапряжений холостое время очень мало и не превосходит нескольких процентов от общего времени запаздывания. Таким образом, в той области, которая представляется интерес при расчетах грозоупорности — в области перенапряжений — время запаздывания состоит практически из одного рабочего времени, которое зависит от физических процессов, происходящих в разряде во время формирования канала.

Вертикальная часть кривых на рис. 1 при высоких напряжениях дает время запаздывания разряда, представляющего собой фактически рабочее время. Резкое изменение хода кривой про-

исходит из-за сильного увеличения холостого времени с уменьшением напряжения и обуславливает возникновение вероятности разряда, меньшей единицы. Пунктирная часть вертикальной кривой дает продолжение зависимости от напряжения только одной компоненты запаздывания — рабочего времени. Развилка кривых соответствует примерно границе двух областей критического напряжения и перенапряжения.

Механизм образования разрядного канала согласно современным взглядам [Л. 6] состоит из отдельных небольших отрезков-стримеров, которые формируются частично одновременно и частично последовательно друг за другом. Стремеры растут до встречи друг с другом, после чего они срашиваются в единый канал. Время, необходимое для образования разрядного канала — рабочее время, слагается из времени развития отдельных стримеров.

В предыдущих работах [Л. 4, 5] теоретически и экспериментально было показано, что вероятность рабочего времени меньшего или равного  $t_\psi$  выражается зависимостью

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2\pi\vartheta}} \int_0^{t_\psi} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\vartheta^2}} dt,$$

где  $\tau$  — среднее рабочее время;

$\vartheta$  — его среднее отклонение для данного напряжения прямоугольной и бесконечной волны.

Этим же выражением определяется вольт-амперная кривая для вероятности  $\psi$  и указанной волны.

Построение семейства вольтсекундных кривых для прямоугольной и бесконечной волны напряжения удобно производить следующим образом: построим сначала кривую для вероятности  $\psi = 0,5$ . Эта кривая для положительной волны и стержневых промежутков длиной 10—40 см выражается формулой, полученной нами на основании экспериментальных данных [Л. 5]:

$$\tau_{\psi=0,5} = \tau = \frac{e^{45,64:Vd} 57,6 \cdot 10^{-2Vd}}{U^{10,65:Vd}}, \quad (1)$$

где  $d$  — длина промежутка в см;  
 $U$  — напряжение в кВ.

Кривые для других вероятностей строятся по временному сдвигу их  $\Delta t$  от кривой для  $\psi = 0,5$ , определяемому по формуле

$$\Delta t = \tau_\psi - \tau = \sqrt{2 \cdot \vartheta \psi}.$$

Значения для  $\vartheta$  в зависимости от  $\psi$ :

$\psi = 0,01$	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,99
$U = 1,645$	— 0,906	— 0,372	0	+ 0,372	+ 0,908	+ 1,645

Зависимость  $\vartheta$  для стержневых промежутков и для положительной прямоугольной и бесконечной волны напряжения была экспериментально нами найдена [Л. 5] в виде

$$\vartheta = \frac{0,61d}{U - 20 - 4,8d} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \quad (2)$$

следовательно,

$$\Delta t = \frac{0,86d\psi}{U - 20 - 4,8d} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\}$$

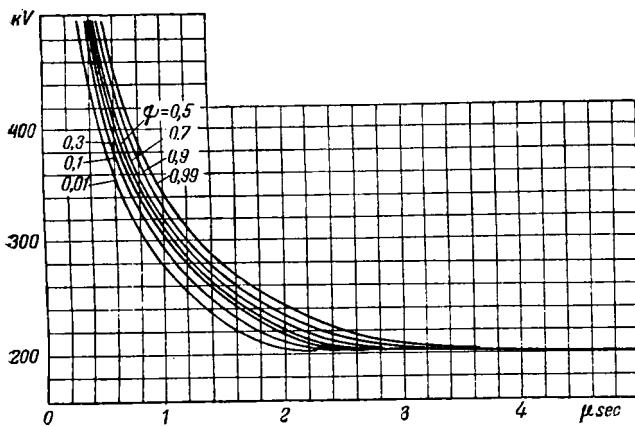


Рис. 2. Вольтсекундная характеристика стержневого промежутка длиной 25 см при положительной прямоугольной и бесконечной волне напряжения.

Построенное этим методом семейство вольтсекундных характеристик стержневого промежутка длиной 25 см приведено на рис. 2.

Средняя составляющая скорости роста канала по оси промежутка (в дальнейшем для краткости будем ее называть скоростью разряда)

$$v_\psi = \frac{d}{\tau_\psi}. \quad (3)$$

При одном и том же напряжении разряды, как было указано выше, имеют разные рабочие времена соответственно разным вероятностям  $\psi$ . Если задаться определенной вероятностью  $\psi$ , то при данном напряжении однозначно будет определяться рабочее время  $\tau_\psi$ , а следовательно, определенная средняя скорость разряда  $v_\psi$ , отнесенная к определенной вероятности  $\psi$ .

**Составление вольтсекундной характеристики при волне любой формы и знака.** Заменим поданную на промежуток плавную волну напряжения любой формы ступенчатой волной с произвольно выбранной шириной ступенек  $T_s$ , в течение которых действует постоянное напряжение  $U_s$  (рис. 3).

Пусть  $w_{qs}$  — средняя составляющая скорости роста стримера по оси промежутка, а  $n_{qs}$  — число стримеров, развивающихся при напряжении  $U_s$  с временем формирования  $t_q$ . Тогда составляющая длины канала по оси промежутка

$$d = \sum_s \sum_q n_{qs} w_{qs} t_q.$$

Обозначим через  $v_{\psi s}$  — среднюю скорость данного разряда при напряжении  $U_s$  и вероятности  $\psi$ . Тогда

$$v_{\psi s} T_s = \sum_q n_{qs} w_{qs} t_q; \quad d = \sum_s v_{\psi s} T_s.$$

В общем случае  $v_s$  не отождествляется со скоростью стримера  $w$ , так как стримеры могут развиваться одновременно или, наоборот, между образованием отдельных стримеров могут быть

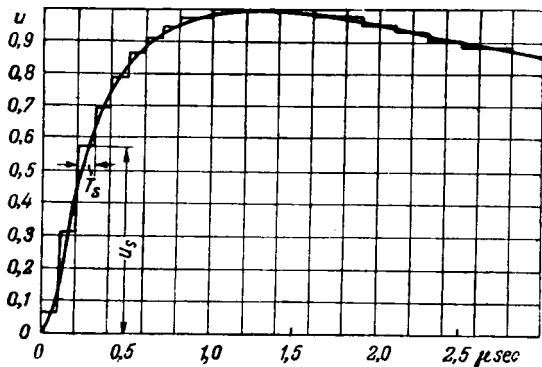


Рис. 3. Волна напряжения 0,7/8,5  $\mu$  sec.

паузы. Суммирование нельзя распространить на все степени напряжения, начиная с самых низких, так как при критических напряжениях начало разряда может еще не наступить, а следовательно, канал не будет формироваться. Правильным было бы начать суммирование для каждой вероятности с того критического напряжения, которое соответствует этой степени вероятности. Однако, это несколько усложняет расчет и дает практически незначительное увеличение точности. Поэтому целесообразно для всех вероятностей начинать суммирование с напряжения верхней границы критической области, которое может быть принятым равным  $U_0 = 1,25 U_{50\%}$ ; где  $U_{50\%}$  — напряжение, соответствующее 50% пробоев при прямоугольной и бесконечной волне или среднее пробивное постоянное напряжение.

Для стержневых промежутков длиной  $d \geq 15$  см и для положительного напряжения нами была получена экспериментальная зависимость  $U_{50\%} = 12 + 6,3 d$  кВ.

Уменьшая ширину ступенек до бесконечно малой величины  $dt$ , имеем:

$$d = \int_{t_0}^{t_\psi} v_\psi dt, \quad (4)$$

где  $t_0$  — время, соответствующее на волне напряжению  $U_0$ .

Для практических расчетов необходимо знать функцию  $v_\psi$  — скорость разряда в данный момент. Для определения последней функции можно исходить из двух предположений.

Первое предположение: скорость разряда зависит не только от действующего в данный момент напряжения, но и от его предистории. Последняя может быть учтена следующим образом. Допустим, что за время  $t$  длина разрядного канала достигла величины  $d_t$ , тогда действующее в данный момент напряжение будет приложено к меньшему промежутку длиной  $d - d_t$ .

Исходя из этого предположения, были подсчитаны рабочие времена разрядов с вероятностью  $\psi = 0,5$  для волн различной формы и разных промежутков (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что полученные рабочие времена, если предположить зависимость скорости разряда от его предистории, в 1,5—2 раза

Таблица 1

Рабочие времена разрядов вероятности  $\phi=0,5$  в стержневом промежутке в предположении зависимости скорости разряда от его предистории

Длина промежутка, см	Форма положительной волны, $\mu\text{sec}/\mu\text{sec}$	Максимальное напряжение, кВ	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Давление, мм рт. ст.	Влажность воздуха, г/м <sup>3</sup>	Рабочее время, $\mu\text{sec}$	
						теоретическое	экспериментальное
20	1,75/24	277,0	20	768,5	13,0	2,25	3,30
25	0,7/8,5	231,5	18	761,5	9,9	1,70	2,67
20	0,25/15	197,0	19,8	761	10,7	1,10	1,80
15	1,65/31	166,5	17,4	761	11,0	2,00	2,72

меньше величин, определенных экспериментально. Это становится понятным, если учесть, что в первой стадии формирования разрядного канала, т. е. при лидерном процессе, диаметр канала чрезвычайно мал (десяти доли миллиметра). Такой канал образует резко неравномерное поле, геометрия которого около головки канала практически не зависит от расстояния до противоположного электрода. Так как скорость разряда в какой-либо момент времени зависит, глазным образом, от напряжения, действующего в данный момент времени, и геометрии поля, определяемой предисторией, то последнее обстоятельство не должно влиять на скорость разряда.

При прямоугольной и бесконечной волне напряжения скорость разряда должна быть постоянна по всей его длине, исключая сравнительно небольшой участок в начале и совершенно ничтожный участок в конце его. Средняя скорость разряда при прямоугольной и бесконечной волне напряжения будет больше действительной скорости в начальном участке и меньше скорости на остальной длине.

Если для  $v_{\phi}$  принять значения средней скорости разряда при прямоугольной и бесконечной волне напряжения, то в вычислении рабочего времени для любой другой формы волны из соотношения  $\sum v_{\phi s} T_s = d$  будут иметь место две

взаимно компенсирующиеся погрешности. В первых интервалах времени вычисленные скорости разрядов будут больше, а в остальных меньше действительных.

Из вышесказанного следует второе предположение: скорость разряда практически зависит только от действующего в данный момент напряжения и равна для не очень малых промежутков (не менее 10 см) средней скорости разряда при прямоугольной и бесконечной волне напряжения такой же величины.

Приведенные на рис. 4 и в табл. 2 данные были вычислены, исходя из второго предположения, для волн напряжения различной формы и стержневых промежутков различной длины. Там же приведены экспериментальные данные. В табл. 3 приведены рабочие времена для вероятности  $\phi=0,5$ . Отклонение экспериментальных данных от теоретических в большинстве случаев

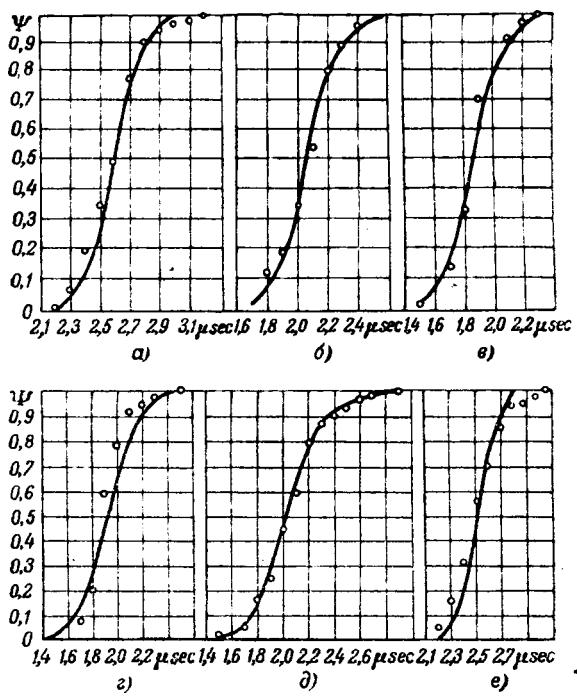


Рис. 4. Кривые вероятности запаздывания разряда в стержневых промежутках различной длины и волнах напряжения разной формы.

Рисунок	Длина промежутка $d$ , см	Форма волны, $\mu\text{sec}/\mu\text{sec}$	Максимальное напряжение, кВ	Температура $^{\circ}\text{C}$	Давление, мм рт. ст.	Влажность воздуха, г/м <sup>3</sup>	Число осцилограмм
а	30	1,65/31	294	17,2	757	11,5	111
б	25	0,25/30	230	19,6	761	10,7	39
в	20	0,25/30	192	19,4	759	9,5	49
г	20	0,25/15	197	19,8	761	10,7	31
д	15	0,7/8,5	153	18,0	759	10,8	116
е	15	1,75/24	169,5	18,0	768	10,8	64

Кривые б, в и а сдвинуты влево соответственно на 0,1, 0,2 и 0,4  $\mu\text{sec}$ .

не превосходит 15 %. Если учесть, что экспериментальные точки, на основании которых была получена формула (1) для  $\tau(U, d)$ , имеют отклонения до 15—18 %, то нельзя ожидать лучшего совпадения теоретических данных с экспериментальными.

На рис. 4 приведены подсчитанные этим методом кривые вероятности запаздывания разряда (т. е. рабочего времени) для стержневых промежутков различной длины и волны напряжения различной формы. По оси абсцисс отложено время запаздывания, по оси ординат — вероятность запаздывания, равного или меньшего абсциссе. Нанесенные на рисунках точки получены из экспериментов. Для более удобного сравнения некоторые из кривых сдвинуты по оси абсцисс. Из рис. 4 видно, что совпадение теоретических данных с экспериментальными достаточно хорошее для всех вероятностей. На рис. 5 приведены вычисленные этим методом вольтсекундные характеристики стержневого промежутка длиной  $d = 20$  см с вероятностью  $\phi = 0,01$  и  $\phi = 0,5$  для положительной униполярной колебательной волны, показанной на том же рисунке. На рисунке нанесены экспериментальные

Таблица 2

Времена запаздывания стержневых промежутков при положительных волнах для вероятности  $\psi=0,5$

Длина промежутка, см	Волна, $\mu\text{sec}/\mu\text{sec}$	Максимальное напряжение, кВ	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Давление, мм рт. ст.	Влажность воздуха, $\text{g}/\text{m}^3$	Число осциллограмм	Время запаздывания, $\mu\text{sec}$		Отклонение, %
							теоретическое	экспериментальное	
30	1,75/24	277	20,0	768,5	13,0	90	3,30	3,30	0
	1,65/31	294	17,2	757,0	11,5	111	3,05	2,60	+14,7
25	279	16,8	757,0	11,0	96	3,43	3,16	+7,9	
	1,25/10	218	17,6	755,0	10,0	95	3,30	3,60	-9,0
0,7 / 8,5	0,7 / 8,5	231,5	18,0	761,5	9,9	87	2,79	2,67	+3,4
	0,25/30	230	19,6	761,0	10,7	39	2,08	2,04	+2,0
20	194	18,8	764,5	10,6	60	2,60	2,60	0	
	0,25/15	239	20,0	761,0	10,7	28	1,90	2,10	-1,0
15	1,1 / 50	167	18,8	759,0	9,0	53	3,14	3,36	-7,0
	0,25/30	192	19,4	759,0	9,5	49	1,86	1,86	0
0,25/15	197	19,8	761,0	10,7	31	1,82	1,80	+1,0	
	1,75/24	169,5	18,0	768,0	10,8	64	2,30	2,50	-8,7
15	168,5	19,2	768,0	12,4	106	2,31	2,56	-11,0	
	158	17,0	768,0	10,3	97	2,59	3,16	-23,0	
1,65/31	166,5	17,4	761,0	11,0	87	2,53	2,72	-7,5	
	153	18,4	761,0	12,4	87	2,90	3,90	-34,5	
1/38	158	17,6	765,5	11,0	51	2,18	1,77	+18,8	
	147	17,0	765,5	10,6	50	2,56	2,22	+13,4	
1,25/10	144	17,4	769,0	10,5	71	2,68	2,95	-10,0	
	134	16,8	769,0	10,2	50	3,20	3,10	+3,0	
0,7/8,5	168	19,1	756,0	11,4	87	2,18	2,32	-5,2	
	164	19,0	756,0	11,7	120	2,28	2,60	-14,0	
153	18,0	756,0	10,7	101	2,63	3,20	-21,6		
	183,5	18,0	760,5	11,0	98	1,48	1,28	+13,5	
153	18,0	759,0	10,8	116	2,30	2,03	+11,7		
	142	18,0	759,0	11,0	113	2,60	2,95	-13,5	

Таблица 3

Подсчет времени запаздывания разряда в стержневом промежутке длиной  $d=25$  см для положительной волны  $0,7/8,5 \mu\text{sec}$  максимальным напряжением  $U=230$  кВ

$s$	$T_s$ , $\mu\text{sec}$	$\sum T_s$ , $\mu\text{sec}$	$U_s$ , кВ	$\psi=0,01$		$\psi=0,3$		$\psi=0,5$	
				$\tau_s$ , $\mu\text{sec}$	$T_s/\tau_s$	$\tau_s$ , $\mu\text{sec}$	$T_s/\tau_s$	$\tau_s$ , $\mu\text{sec}$	$T_s/\tau_s$
1	0,6	0,6	<205	—	—	—	—	—	—
2	0,1	0,7	209	1,80	0,056	2,10	0,048	2,32	0,043
3	0,1	0,8	218	1,65	0,060	2,00	0,050	2,11	0,047
4	0,2	1,0	224	1,56	0,128	1,90	0,105	2,00	0,050
5	0,6	1,6	230	1,48	0,415	1,89	0,320	1,98	0,303
6	0,2	1,8	226	1,53	0,131	0,86	0,108	1,96	0,102
7	0,2	2,0	222	1,59	0,090	1,94	0,103	2,03	0,098
8	0,2	2,2	217	1,66	0,121	2,02	0,099	2,13	0,094
					1,001				
9	0,2	2,4	215			2,05	0,098	2,18	0,092
10	0,1	2,5	212			2,18	0,047	2,24	0,045
11	0,05	2,55	208			2,20	0,022	2,32	0,022
			(2,5)				1,000		
12	0,15	2,70	208					2,32	0,065
13	0,09	2,79	204					2,40	0,039
			(2,67)					1,000	

подтверждается опытом. Это дает основание значительно упростить формулу для составления вольтсекундных характеристик. Подставляя значение  $v_\psi$  из (3) в (4), после сокращения получим:

$$1 = \int_{t_0}^{t_\psi} \frac{dt}{\tau_\psi} \approx \sum \frac{T_s}{\tau_{\psi s}}, \quad (5)$$



Рис. 5. Вольтсекундная характеристика стержневого промежутка длиной  $d=20$  см для положительной униполлярной колебательной волны.

$U$  — форма волны положительной полярности;  $A$  — случаи с запаздыванием  $> 25 \mu\text{sec}$ ;  $B$  — случаи без разряда.

точки, заимствованные из работы Я. С. Ицхоки и С. Л. Зайненца. Каждая точка представляет собой единичный отсчет на основании одной осциллограммы. Малое количество экспериментальных единичных точек не дает возможности их статистической обработки и более точно го сравнения. Ход кривых и их расположение довольно хорошо согласуются с экспериментальными данными<sup>1</sup>.

Из табл. 2 и рис. 4 видно, что отмеченное выше второе предположение достаточно хорошо

<sup>1</sup> Автором были проделаны более обширные опыты с униполлярными колебательными волнами разных знаков, которые дали для всех вероятностей очень хорошее согласие с теорией (примечание в корректуре).

где  $\tau_{\psi s}$  — рабочее время с вероятностью  $\psi$  при напряжении  $U_s$  прямоугольной бесконечной волны напряжения.

Схема расчета времени запаздывания для разных вероятностей приведена в табл. 3, которая составлена для волны  $0,7/8,5 \mu\text{sec}$ , приведенной на рис. 3 (величины в скобках взяты из опыта).

**Определение функции  $\tau(\psi, U)$ .** Итак, для составления вольтсекундной характеристики для любой формы волны необходимо иметь функцию  $\tau_{\psi}(U)$ . Эта функция может быть получена экспериментально при прямоугольной и бесконечной волне напряжения или приближенно с любой степенью точности при волне любой формы. Опишем метод определения функции  $\tau_{\psi}(U)$  при произвольной форме волны.

Допустим, что экспериментально получены времена запаздывания для определенной вероятности при волне  $0,7/40 \mu\text{sec}$ , приведенной на рис. 6.

По данным лаборатории им. Смуррова [Л. 7] для этой формы отрицательной волны напряжения времена запаздывания стержневого промежутка длиной  $d = 20 \text{ см}$  выражаются формулой

$$t = \frac{4,6 \cdot 10^4}{U^2 - 1,84 \cdot 10^4} \mu\text{sec.}$$

Предположим, что вычисленная по этой формуле кривая однородна, т. е. имеет по всей длине одну и ту же степень вероятности (что, безусловно, неверно). Принимая среднее пробивное напряжение промежутка при отрицательном постоянном напряжении (что соответствует  $U_{50\%}$ ) в  $136 \text{ kV}$ , получим  $U_0 = 1,25 \cdot 136 = 170 \text{ kV}$ .

Для волны с максимальным напряжением  $U_{m1} = 180 \text{ kV}$  на несколько процентов больше  $U_0$  из вышеприведенной формулы получим  $t_1 = 3,34 \mu\text{sec}$ . Заменяя часть плавной волны с напряжением  $> U_0$  ступенчатой с одной ступенькой  $U_1 = 177 \text{ kV}$ , как показано на рис. 6. Получим ширину ступеньки  $T_1' = 2,54 \mu\text{sec}$ . Обозначая  $1:\tau_s = a_s$ , определим его из соотношения

$$a_1 T_1' = 1 \text{ или } 2,54 a_1 = 1, \quad (7)$$

отсюда  $a_1 = 0,394$  и  $\tau_1 = 2,54 \mu\text{sec}$  при напряжении  $U_1 = 177 \text{ kV}$ .

Далее, беря волну с максимальным напряжением  $U_{m2} = 196 \text{ kV}$ , определяем для нее  $t_2 = 2,29 \mu\text{sec}$ . Заменяя плавную часть волны с напряжением  $> U_0$  ступенчатой с двумя ступенями:  $U_1 = 177 \text{ kV}$  и  $U_2 = 195 \text{ kV}$ . Получим для нее  $T_1'' = 0,24 \mu\text{sec}$ ,  $T_2'' = 1,53 \mu\text{sec}$ . Подставляя эти значения  $T_1''$ ,  $T_2''$  и  $a_1$  из (7) в соотношение

$$a_1 T_1'' + a_2 T_2'' = 1$$

найдем  $a_2 = 0,592$  и  $\tau_2 = 1,69 \mu\text{sec}$  при  $U_2 = 195 \text{ kV}$ .

Аналогичным образом действуем дальше. Берем волну с напряжением  $U_{m3}$ . Заменяя часть ее с напряжением  $> U_0$  трехступенчатой со ступенями  $U_1 = 177 \text{ kV}$ ,  $U_2 = 195 \text{ kV}$  и  $U_3 = 213 \text{ kV}$  и соответственно  $T_1''' = 0,09 \mu\text{sec}$ ,  $T_2''' = 0,25 \mu\text{sec}$  и  $T_3''' = 0,94 \mu\text{sec}$ , получаем соотношение для определения  $a_3$  и т. д. Чем меньше разности между  $U_0$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  и т. д., тем точнее можно определить  $\tau_{\psi}(U)$ .

Для определения  $\tau_{\psi}(U)$  нет надобности, как видим, пользоваться какой-нибудь определенной формой волны. Можно даже для разных интервалов напряжения иметь волны разной формы. Это предсказывает экспериментальные преимущества, так как получение волн определенной формы всегда затруднительно и снижает коэффициент использования генератора. Желательно только при низких напряжениях, близких к  $U_0$ , иметь волну с отсутствием колебаний

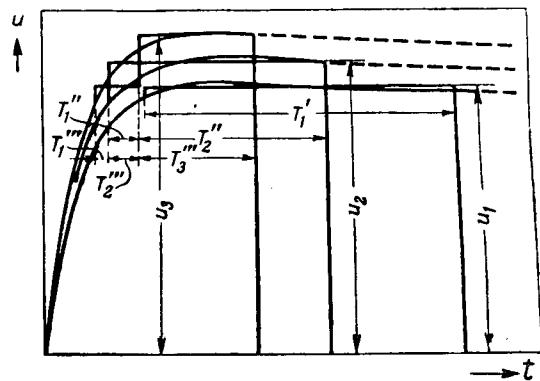


Рис. 6. Определение функции  $\tau_{\psi}(U)$  из волны произвольной формы.

и сравнительно длинным хвостом порядка  $40 \mu\text{sec}$ , что не представляет никаких трудностей при малых напряжениях.

Для определения  $\tau_{\psi}$  во всем диапазоне вероятностей необходимо при любой волне и одном напряжении произвести достаточное число измерений времени запаздывания в отдельных разрядах, чтобы получить зависимость  $t_U(\psi)$  для данной волны и описанным выше аналитическим методом  $\tau(U, \psi)$ .

**Выводы.** Разработан метод составления вольтсекундных характеристик изоляции для волны напряжения любой формы и знака и для любой вероятности.

Для составления указанных вольтсекундных характеристик должна быть известна функция  $\tau(\psi, U)$  — рабочее время разряда в зависимости от напряжения и вероятности разряда.

Разработан метод определения функции  $\tau(\psi, U)$  из времен запаздывания, полученных экспериментально при волне произвольной формы.

Метод этот кроме теоретических имеет экспериментальные преимущества большей простоты и дает возможность лучшего использования импульсного генератора.

При обсуждении результатов настоящей работы автором были получены от проф. А. А. Горева ценные замечания.

#### Литература

1. А. А. Горев и Л. Е. Машкиллайсон. Электричество, № 13, стр. 32, 1935. Эл. станции, № 11, стр. 5, 1936.
2. А. А. Акопян. Электричество, № 3, стр. 55, 1939.
3. А. С. Зингерман. ЖЭТФ, № 9, стр. 508, 1945.
4. А. С. Зингерман, Н. Н. Николаевская и М. А. Бак. ЖТФ, № 6, стр. 669, № 10, стр. 1153, 1947.
5. А. С. Зингерман, Н. Н. Николаевская, М. А. Бак. Труды ЛПИ, № 5, стр. 124, 1947.
6. А. С. Зингерман. Успехи физических наук, т. 25, № 1, стр. 55, 1941.
7. Л. Е. Машкиллайсон. Переходные процессы и перенапряжения в электрических цепях. ОНТИ, 1938.
8. F. P. E. T. AIEE, т. 49, стр. 1456, 1930.



# Термодинамические эффекты, вызываемые электрической дугой в воздушном выключателе

*Кандидат техн. наук Н. Н. ЛИННИЧЕНКО*

## Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

При отключении воздушного выключателя вхолостую его междуконтактная зона обдувается воздушным потоком, имеющим скорость звука. Если бы этот поток мог сохранять ту же скорость и при отключении тока, то отключение происходило бы достаточно легко. Однако, при отключении тока в электрической дуге выделяется энергия, тормозящая поток. Благодаря этому к началу собственно гашения (момент прохождения тока через нуль) приходится иметь дело уже не со «звуковым», а с медленным потоком; отсюда — снижение дугогасящей способности выключателя при больших токах. Как известно, воздушный выключатель способен производить отключение больших токов при значительно меньших скоростях восстановления напряжения, чем малых токов. Практика показала, что в случае достаточно большого тока возможно не только торможение, но даже обратное забрасывание потока внутрь выключателя. Это создает естественный предел разрывной мощности выключателя.

Ясно, что термодинамика воздушного потока, подогреваемого дугой, играет существенную роль в наиболее важных моментах работы воздушного выключателя. Между тем, насколько известно автору, имеются только три работы, посвященные этому вопросу: Юбермута [Л. 1], Кесельринга [Л. 2] и Лабуре [Л. 3], к тому же противоречащие друг другу.

В настоящей работе автор поставил перед собой задачу внести ясность в этот вопрос с чисто теоретических позиций.

**Работа Юбермута.** Явление обратного движения воздушного потока при большом токе было освещено в работе Юбермута. На рис. 1 показана экспериментальная установка, с помощью которой производилось исследование. На пути потока была установлена шайба с узким отверстием. Разность давлений, создающаяся по сторонам этой шайбы при движении потока, передавалась через масло (которое было взято для

Проведено аналитическое исследование и выявлена физическая сущность стационарных и переходных процессов, происходящих в подогреваемом электрической дугой дутьевом потоке воздушного выключателя. Показана неточность и ошибочность выводов в работах некоторых иностранных авторов по рассмотренному вопросу.

исследование и выявлена ационарных и переходных в подогреваемом электропотоке воздушного выночность и ошибочность других иностранных авторов к этому вопросу.

ловых линий катушки и этим меняла индуктивное падение напряжения на ней. Падение напряжения записывалось с помощью осциллографа. Результаты представлены на рис. 2 (кривые *c*). Верхняя кривая *c* получена при умеренном токе, нижняя — при токе, вызывающем обратное движение потока. Последнее отчетливо можно видеть в точке *d*. Через *K* обозначен момент размыкания контактов, *B* — разность давлений.

**Работа Кессельинга.** Теоретическое исследование термодинамики воздушного потока, подогреваемого дугой, было проведено Кессельингом.

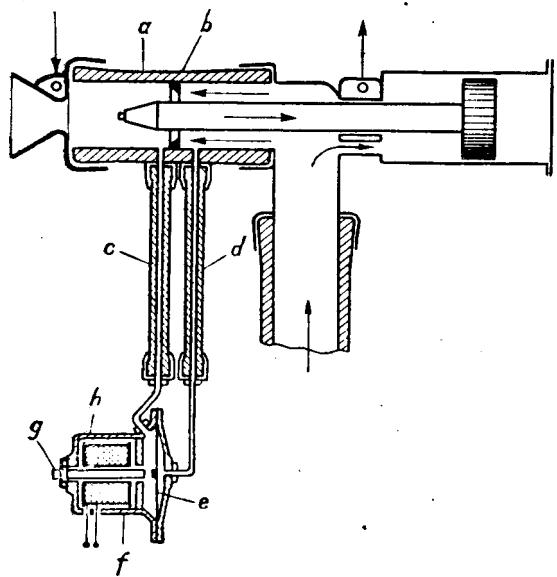


Рис. 1

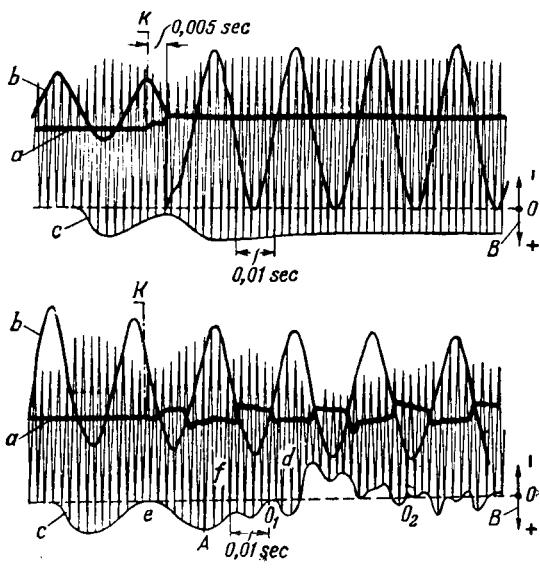


Рис. 2.

На рис. 3 представлена схема выключателя, подвергнутого исследованию. Рассматривался стационарный процесс. Данными являются величины с индексом 0. Требуется найти величины с индексами 1 и 2. Предполагается, что между состояниями 0 и 1 процесс совершается адиабатически, между 1 и 2 — с постоянным подогревом в  $Q$  kcal/sec. Таким образом, предполагается, что в выключателе горит дуга постоянного тока. Последнее предположение дает возможность аналитическим путем выяснить основной характер явления. Изменения, вносимые переменным током, можно рассматривать как модулирование основной кривой. На рис. 4 показаны приведенные в работе Кессельринга кривые зависимости температуры  $T$  и скорости газового потока  $w_1$  от мощности дуги  $N = \frac{Q}{0.24}$ . Однако, по оси абсцисс отложена удельная мощность  $N' = \frac{N}{fp_0}$ , где  $f$  — сечение сопла,

$p_0$  — рабочее давление воздуха в выключателе. Кессельринг ограничился только общими указаниями на исходные дифференциальные уравнения и не дал ни аналитического алгорифма, с помощью которого он получил кривую рис. 4, ни уравнения этой кривой. Последнее восполнено нами. В приложении 1 нами получена формула

$$w_1 = 4,4 \frac{1}{0,013 + \frac{1}{fp_0 T_0}}. \quad (1)$$

От данных Кессельринга эта формула отличается наличием величины  $T_0$  — температуры воздуха в выключателе. Ничего не упомянуто у Кессельринга о  $T_0$  и в тексте. Пользуясь расчетным примером, приведенным Кессельрингом, мы установили, что кривая рис. 4 относится к  $T_0 = -251^\circ\text{C}$  или  $-21^\circ\text{C}$ . Из формулы (1) видно, что при  $-40^\circ\text{C}$  скорость дутья может быть на 25% меньше, чем при  $+35^\circ\text{C}$ . Из формулы и кривой также видно, что уже сравнительно небольшие

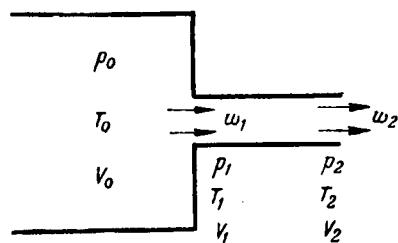


Рис. 3.

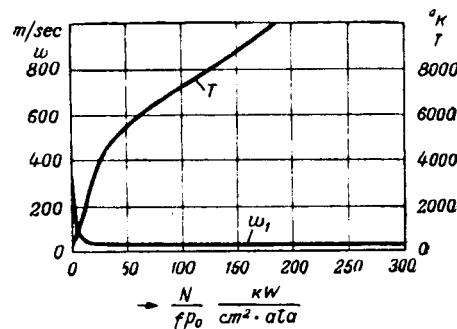


Рис. 4.

мощности вызывают значительное снижение скорости дутья. Так, мощность в 30 kW на 1  $\text{cm}^2$  и 1 atm вызывает при  $T_0 = 251^\circ\text{C}$  снижение скорости дутья с 300 m/sec до 37 m/sec. При бесконечно большой мощности скорость дутья обращается в 0; отрицательной она не может быть никогда.

Последний вывод противоречит экспериментальным данным, в частности, приведенной на рис. 2 кривой  $c$ .

**Работа Лабуре.** Как и Кессельринг, Лабуре рассматривает установившийся процесс и исходит из тех же основных газодинамических положений. Однако, в отличие от Кессельринга Лабуре получает вполне определенную конечную „закупоривающую“ мощность при токе, определяемом по формуле

$$I_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{k+1}{k-1} \cdot \frac{1}{X_0} a_a \frac{f}{L},$$

где  $k = \frac{c_p}{c_v}$  — отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и при постоянном объеме;

$a_a$  — скорость звука при температуре открытой дуги;

$X_0$  — градиент потенциала на дуге;

$f$  — сечение сопла;

$L$  — длина сопла.

В начале доклада Лабуре подкрепляет приведенную формулу ссылкой на то, что она получена в сотрудничестве с Дарье и специалистами в области газовых турбин и реактивных двигателей, а в конце доклада подтверждает экспериментом. Отметим, что рассматриваемая формула получена Лабуре благодаря некоторым дополнительным допущениям, сделанным им произвольно и противоречащим основным положениям, принятым им же самим. Лабуре допускает воз-

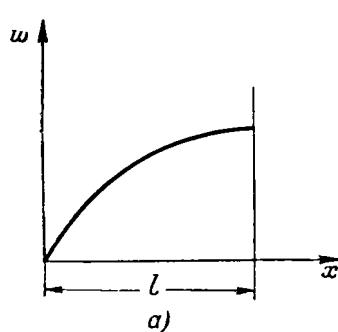


Рис. 5.

можность параболического распределения скоростей вдоль сопла, якобы получающегося в пределе, при приближении  $w_1$  к 0. На рис. 5 даны предельные ( $w_1 = 0$ ) кривые скоростей по Лабуре (a) и действительная (b).

Докажем правоту нашего утверждения, исходя из трех основных положений, из которых исходит и Лабуре: 1) уравнения сплошности  $\frac{w_1}{v_1} = \frac{w_2}{v_2}$ ; 2) уравнения звуковой скорости истечения из сопла  $w_2 = \sqrt{k g p_2 v_2}$ ; 3) уравнения Эйлера-Бернулли —  $v \cdot dp = \frac{w \cdot dw}{g}$ . Если  $w_1 = 0$ , то  $v_1 = v_0$ , т. е. равно конечной величине. Поэтому  $\frac{w_2}{v_2} = 0$ . Подставляя сюда вместо  $w_2$  выражение звуковой скорости, имеем:

$$\frac{w_2}{v_2} = \sqrt{k g} \sqrt{\frac{p_2}{v_2}} = 0.$$

Но из (3) следует (см. приложение 1), что  $p_2$  равно конечной величине. Поэтому неизбежно  $v_2 = \infty$ , но тогда (так как  $w_2 = \sqrt{k g p_2 v_2}$ ) неизбежно и  $w_2 = \infty$ , и  $\frac{dw_2}{dx} = \infty$ . Очевидно, что

Лабуре, исходивший из трех приведенных положений, должен был принять и вытекающее из них распределение (рис. 5, b), а не противоречащее им (рис. 5, a); или же, если он принял распределение по рис. 5, a, то он должен был отказаться от основных газодинамических положений.

Неверность вывода Лабуре очевидна и из чисто физических соображений. Лабуре рассматривает стационарный процесс. Однако, невозможно представить себе стационарный процесс в сопле, в которое с одной стороны воздух совершил не поступает, а с другой стороны выходит со звуковой скоростью.

Таким образом, работа Лабуре явно ошибочна и не разъясняет ранее отмеченные нами противоречия между экспериментальной кривой рис. 2 и теоретической — рис. 4.

**Теория автора.** По мнению автора настоящей статьи, соображения, приведшие к кривой рис. 4, достаточно надежны, чтобы можно было поверить в их, во всяком случае, качественное соответствие действительности. Но тогда в стационарном процессе нечего искать «обратно

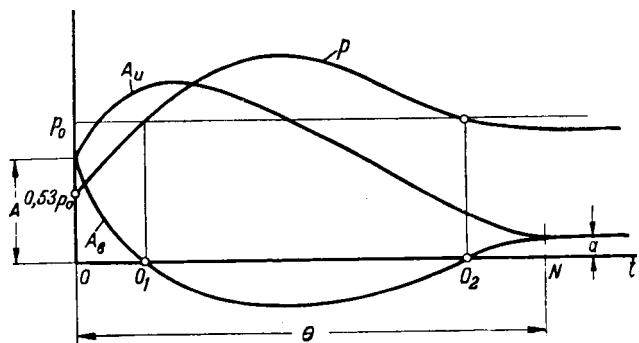


Рис. 6.

забрасывающих» токов. Остается нестационарный процесс. К сожалению, прямой путь математического анализа этого процесса крайне труден и не может привести к наглядным результатам. Поэтому к изучению вопроса надо подойти косвенным путем. Представим себе зону горения дуги в виде резервуара, в который с одной стороны поступает воздух из выключателя, а с другой стороны, воздух вытекает в окружающую атмосферу. Представим себе, далее, что до горения дуги состояние воздуха в резервуаре всюду одинаково соответствует критическому давлению  $0,53p_0$ , где  $p_0$  — рабочее давление воздуха в выключателе. Допустим теперь, что в некоторый момент по всему резервуару началось равномерное выделение энергии (загорелась дуга) и требуется описать получающийся при этом термодинамический процесс. В приложении 2 этот процесс исследован только для того случая, когда скорость втекающего в резервуар воздуха  $w_1 = 0$ . Такой случай имеет специальный интерес при расчете предохранительных клапанов на резервуарах воздушных выключателей, внутри которых может возникнуть стоячая дуга. В нашем случае этот термодинамический процесс помогает составить приблизительно картину изучаемого переходного процесса (рис. 6). Нам известен начальный (до зажигания дуги) режим (до 0), характеризующийся тем, что в резервуар втекает со звуковой скоростью большое количество воздуха  $A$  и такое же количество вытекает, и конечный установившийся режим (за  $N$ ), при котором в резервуар втекает и из резервуара вытекает уже значительно меньшее количество воздуха  $a = BG \sqrt{T}$ , соответствующее сниженной скорости втекания  $w_1$ . Кроме того, нам известно, что при установившемся режиме выделяемая дугой энергия идет только на подогрев:  $aC_p(T - T_0)$  и сообщение скорости  $w_2 = \sqrt{k g R T}$  втекающей в резервуар небольшой массе воздуха  $a$ . Поэтому при большой энергии в резервуаре должна установиться высокая температура и соответственно высокая скорость истечения. Чтобы при такой скорости истечение  $a$  было мало, вес воздуха в резервуаре должен быть значительно меньше, чем до горения дуги. Таким образом, переходный процесс должен заключаться в выбрасывании лишнего воздуха из объема резервуара, а это может происходить: 1) только в том случае, когда во

время переходного процесса количество вытекающего воздуха будет превышать количество втекающего; 2) при достаточно большой мощности дуги, как это показано в приложении 2 (рис. 8), с переходом сначала расхода, а потом давления через максимум. В соответствии со сказанным на рис. 6 и построены вероятные кривые расхода воздуха — втекающего  $A_v$  и истекающего  $A_u$  и кривая давления  $p$ . Между точками  $O_1$  и  $O_2$ , где давление в дуговой зоне превосходит рабочее давление выключателя, происходит эффект забрасывания.

Вернемся к рис. 2 и посмотрим, насколько эксперимент соответствует нашим предположениям. Кривая скорости до точки  $e$  является результатом заполнения объемов выключателя сжатым воздухом после открытия клапана. Между точками  $e$  и  $f$  происходит движение контакта и затягивание дуги внутрь сопла. Переходный процесс „сбрасывания лишнего воздуха“ начинается примерно с точки  $A$  и кончается в точке  $O_2$ . Между точками  $O_1$  и  $O_2$  происходит обратное забрасывание. Весь процесс «модулируется» переменным током.

Представляет интерес определение критической мощности, при которой начинается забрасывание; однако для этого необходим эксперимент. На основании результатов, полученных в приложении 2, можно предполагать, что выражение для критической мощности следует искать в форме

$$N_{kp} = \alpha f p_0 \sqrt{T_0},$$

где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей данного выключателя и термодинамических постоянных;

$f$  — сечение сопла;

$p_0$  — рабочее давление;

$T_0$  — температура, при которой производится отключение.

Рассмотренные нами термодинамические эффекты — торможение и забрасывание — являются факторами, ухудшающими состояние дутьевого потока к началу гашения дуги — к моменту прохождения тока через нуль. Какое влияние это ухудшение окажет на гашение, зависит еще от скорости восстановления напряжения и от того, насколько удачно запроектировано дутьевое устройство выключателя в отношении быстрейшего «выполаскивания» ионизированного потока. Томмен [Л. 4] указывает, что путем правильного газодинамически устройства дутьевой части удается увеличить мощность выключателей. Основываясь на этом, следует считать, что критическая мощность ( $N_{kp}$ ), являясь показателем существенного ухудшения работы выключателя, не обязательно должна совпадать с пределом его разрывной мощности.

**Выводы.** Проведено аналитическое рассмотрение установившегося воздушного потока, подогреваемого дугой, на основании которого внесено уточнение в кривую Кессельринга.

Доказана ошибочность рассуждений Лабуре о причине явления забрасывания.

Выяснена сущность переходного процесса при движении подогреваемого потока и показано, что обратное забрасывание является результатом начального «подскакивания» давления при этом процессе.

Решена задача истечения из подогреваемого резервуара, возникающая при расчете предохранительных клапанов на резервуарах, в которых может появиться стоячая дуга.

Во всех перечисленных пунктах кроме последнего математический анализ играет вспомогательную роль, служа для качественного уточнения отдельных черт весьма сложного процесса.

#### Приложение 1

Зависимость стационарного процесса в воздушном выключателе от подогрева в  $Q$  kcal/sec (рис. 3). Требуется найти  $w_1, p_1, T_1, v_1, w_2, p_2, T_2, v_2$ . Исходными являются уравнения термодинамики:

$$-v \cdot dp = \frac{w \cdot dw}{g}, \quad (1)$$

$$dq = c_p dT + A \frac{w \cdot dw}{2g}, \quad (2)$$

$$\frac{w_1}{v_1} = \frac{w_2}{v_2}, \quad (3)$$

$$pv = RT, \quad (4)$$

где  $w$  — скорость;

$p$  — давление;

$T$  — температура;

$v$  — удельный объем;

$q$  — расход тепла на подогрев 1 kg.

Так как между состояниями 0 и 1 процесс протекает адиабатически, то

$$w_1^2 = 2g \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (5)$$

$$v = v_0 \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (6)$$

$$T_1 = T_0 \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} - 1. \quad (7)$$

Обозначим весовой секундный расход воздуха через сопло

$$G_p = \frac{fw}{v}, \quad (8)$$

где  $f$  — сечение сопла. Тогда

$$q = \frac{Q}{G_p}. \quad (9)$$

Интегрируя (2) между 1 и 2, получим:

$$q = c_p (T_2 - T_1) + \frac{A}{2g} (w_2^2 - w_1^2). \quad (10)$$

Интегрируя (1) между 1 и 2 и принимая во внимание (3), получим:

$$p_2 - p_1 = \frac{w_1}{gv} (w_1 - w_2). \quad (11)$$

Таким образом, для определения восьми неизвестных величин имеем пять уравнений (3), (5), (6), (10), (11). Добавим сюда две формулы Кланейрона для состояний 1 и 2. Восьмое уравнение получим, приняв (как это делают

Кессельинг и Лабуре), что, как и для адиабатического процесса,  $w_2$  равняется скорости звука, т. е.

$$w_2 = \sqrt{kgRT_2} = \sqrt{kgp_2v_2}. \quad (12)$$

Прежде всего найдем соотношение между величинами при достаточно малом  $w_1$ , когда можно пренебречь  $w_1$  по сравнению с  $w_2$  и когда, следовательно, величины с индексами 1 и 0 можно считать равными.

Полагая в (11)  $w_1 = 0$ , получим:

$$p_2 - p_1 = -\frac{w_2^2}{gv_2}.$$

Подставляя сюда  $w_2$  из (12), получим

$$p_2 - p_1 = -kp_2,$$

откуда

$$p_2 = \frac{p_1}{1+k} = \frac{p_0}{1+k}. \quad (13)$$

Из (3) имеем:

$$w_1 = \frac{v_0 w_2}{v_2}.$$

Подставляя сюда из (12)

$$v_2 = \frac{w_2^2}{kgp_2} \quad (14)$$

и (13), получим:

$$w_2 = \frac{kgp_2v_0}{w_1} = \frac{kgRT_0}{(1+k)w_1}. \quad (15)$$

Подставляя (1) в (14), имеем:

$$v_2 = \frac{kgp_2v_0^2}{w_1^2} = \frac{kg}{1+k} \cdot \frac{v_0}{w_1^2}. \quad (16)$$

На основании (4), (13) и (16), можем записать:

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{kg}{(1+k)^2} \cdot \frac{p_1 v_0^2}{R w_1^2} = \frac{kg}{(1+k)^2} \cdot \frac{T_0 v_0}{w_1^2}. \quad (17)$$

Из (10), пренебрегая  $T_1$  и  $w_1$ , имеем:

$$q = c_p T_2 + \frac{A}{2g} w_2^2 = \left( \frac{2c_p}{Rk} + A \right) \frac{w_2^2}{2g}.$$

Поэтому

$$Q = q \cdot f \cdot \frac{w_2}{v_2} = \left( \frac{2c_p}{R} + A \right) f \cdot \frac{w_2^2}{2g} \cdot \frac{w_2}{k_3 p_2} = \left( \frac{2c_p}{R} + A \right) f \cdot \frac{k}{2} \cdot p_2 \cdot w_2 = \left( \frac{2c_p}{R} + A \right) f \cdot \frac{k}{2} \times \times \frac{p_0 \cdot kg}{(1+k)^2} \cdot \frac{RT_0}{w_1} = \left( \frac{2c_p}{R} + A \right) \frac{k^2}{(1+k)^2} \times \times \frac{gR}{2} p_0 T_0 \frac{1}{w_1}.$$

Отсюда

$$w_1 = w_0 \frac{fp_0 T_0}{Q}, \quad (18)$$

где

$$w_0 = \left( \frac{2c_p}{R} + A \right) \left( \frac{k}{1+k} \right)^2 \cdot \frac{gR}{2}.$$

Полагая  $c_p = 0,32$ ,  $R = 29,7$ ,  $k = 1,25$ , найдем  $w_0 = 1,05$ ; или, вводя электрическую мощность в kW,

$$w_1 = 4,4 \frac{fp_0 T_0}{N}. \quad (19)$$

Для того чтобы распространить формулу (19) и на область больших скоростей  $w_1$ , перепишем ее в виде:

$$w_1 = 4,4 \frac{f \cdot p_0 T_0}{N + x}$$

и  $x$  подберем так, чтобы при  $N = 0$  формула давала скорость звука, т. е.

$$w_1 = \sqrt{kgRT_0}.$$

Для этого должно быть

$$x = \frac{4,4}{\sqrt{kgR}} \cdot f \cdot p_0 \sqrt{T_0} = \frac{4,4}{\sqrt{1,4 \cdot 9,8 \cdot 29}} fp_0 \sqrt{T_0} = 0,22 fp_0 \sqrt{T_0}.$$

Тогда

$$w_1 = 4,4 \frac{1}{\frac{fp_0 T_0}{\sqrt{T_0}} + \frac{0,22}{\sqrt{T_0}}}$$

или, при среднем  $T_0 = 273^\circ$

$$w = 4,4 \frac{1}{0,013 + \frac{1}{fp_0 T_0}}. \quad (20)$$

Не представило бы труда вывести более точную, чем (20), формулу. Однако, принимая во внимание общую схематизацию вопроса, вряд ли было бы целесообразно этим заниматься.

### Приложение 2

Истечение из подогреваемого резервуара (рис. 7). В резервуаре, из которого происходит истечение, загорается дуга, выделяющая  $Q$  kcal/sec. Требуется исследовать влияние, оказываемое дугой на истечение.

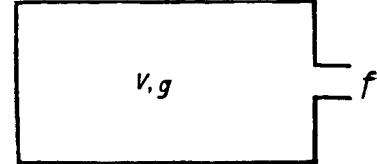


Рис. 7.

Тепло дуги расходуется на подогрев воздуха в резервуаре и работу расширения

$$dq = Qdt = GC_v dt + GAPdv;$$

но  $Gv = V = \text{const}$ . Поэтому  $Gdv = -vdG$ .

Отсюда

$$Qdt = GC_v dt - ApvdG = Gc_v dt - ARTdG. \quad (1)$$

Предполагая, что истечение совершается со скоростью звука, выражение ежесекундного расхода представим в форме

$$-\frac{dG}{dt} = BG \sqrt{T}, \quad (2)$$

где  $B = 2,15 \frac{V\bar{R}}{V}$ ,  $\mu$  — коэффициент расхода;  $f$  — сечение выходного отверстия;  $R$ , как и ранее — газовая постоянная, равная 29,7.

Исключив  $t$  из уравнений (1) и (2), мы вместо дифференциальных уравнений с частными производными получим обыкновенное

$$-\frac{Q}{B} \cdot \frac{dG}{G \sqrt{T}} = Gc_v dt - ARTdG. \quad (3)$$

Заменяя  $\sqrt{T} = y$  и  $G = z$ , получим:

$$\frac{dy}{dz} = \frac{AR}{2c_v} \cdot \frac{y}{z} - \frac{D}{2c_v B} \cdot \frac{y^{-2}}{z^2} \quad (4)$$

— нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка типа уравнения Бернулли.

С помощью известных подстановок находим решение уравнения (4):

$$y^3 = T^{3/2} = G^m c + \frac{n}{m+1} \cdot \frac{1}{G}, \quad (5)$$

где

$$m = 1,5 \frac{AR}{c_v}; \quad n = 1,5 \frac{Q}{Bc_v};$$

$$c = \frac{T_0^{3/2}}{G_0^m} - \frac{n}{m+1} \cdot \frac{1}{G_0^{m+1}}.$$

В частности, при  $Q = 0$  и  $n = 0$  уравнение (5) обращается в уравнение адиабатического изменения состояния

$$\frac{T}{T_0} = \left( \frac{G}{G_0} \right)^{k-1}.$$

Если же  $Q \neq 0$ , то мы имеем некоторый новый термодинамический процесс, детали которого подлежат нашему изучению.

Подставив в (5)  $T = \frac{pV}{RG}$ , получим уравнение изменения давления в резервуаре в функции веса воздуха

$$\left( \frac{pV}{R} \right)^{3/2} = G^{m+1.5} c + \frac{n}{m+1} V \bar{G} = \varphi. \quad (6)$$

Найдем вес  $G_{\max}$ , при котором давление достигает максимума

$$\frac{d\varphi}{dG} = (m+1.5) \cdot G^{m+0.5} \cdot c + \frac{n}{m+1} \cdot \frac{1}{2V\bar{G}} = 0,$$

откуда

$$G_{\max}^{m+1} = -\frac{n}{2(m+1)(m+1.5)c}. \quad (7)$$

Назовем критической мощностью  $Q_{kp}$  мощность дуги, до которой включительно давление не возрастает, а только убывает. Очевидно, что при  $Q > Q_{kp}$  давление сначала возрастает, а затем падает, т. е. процесс падения давления в резервуаре совершается с переходом через максимум. Отсюда — практическое значение критической мощности: только при  $Q > Q_{kp}$  можно ожидать опасных повышений давления в резервуаре.

Определить  $Q_{kp}$  можно из того условия, что при ней вес воздуха, соответствующий максимуму давления, как раз совпадает с начальным весом воздуха в резервуаре, т. е.

$$G_m = G_0. \quad (8)$$

Подставляя в формулу (7) выражение для  $c$  и условие (8), получим:

$$G_0^{m+1} \cdot c = T_0^{3/2} G_0 - \frac{n}{m+1} = -\frac{n}{2(m+1)(m+1.5)}.$$

Отсюда

$$T_0^{3/2} G_0 = \frac{n}{m+1.5}$$

и

$$Q_{kp} = \frac{2}{3} (m+1.5) c_v 2.15 \mu f \frac{V \bar{R}}{V} T_0^{3/2} G_0.$$

$$\text{Полагая здесь } \frac{V}{G_0} = v_0 \text{ и } v_0 = \frac{RT_0}{p_0},$$

получим:

$$Q_{kp} = \alpha \cdot f \cdot p_0 \sqrt{T_0}, \quad (9)$$

где

$$\alpha = \frac{2}{3} (m+1.5) c_v \cdot 2.15 \mu \frac{1}{V \bar{R}}.$$

$$\text{При } c_v = 0.3, A = \frac{1}{427}, R = 29.7$$

$$\alpha = 0.15 \mu$$

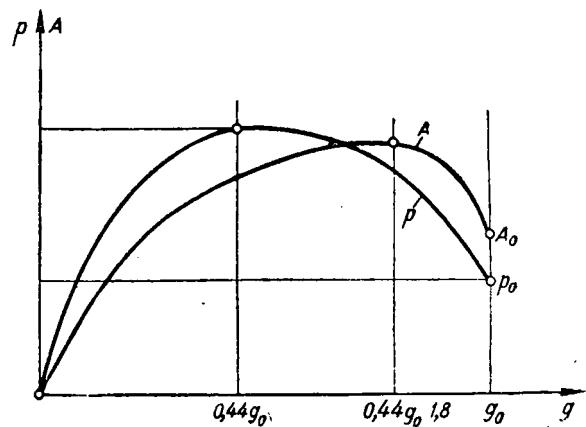


Рис. 8.

$$Q_{kp} = 0.15 \mu f p_0 \sqrt{T_0} \text{ kcal/sec.}$$

Найдем значение  $p_m$  при  $Q > Q_{kp}$ . Обозначим  $\frac{Q}{Q_{kp}} = x$ .

Легко найти следующие уравнения:

$$\frac{G_m}{G_0} = \frac{1}{\left( 3.7 - \frac{2.7}{x} \right)^{0.74}}, \quad (10)$$

$$\frac{p_m}{p_0} = \frac{(5.08x - 4.08)^{3/2}}{\left( 3.7 - \frac{2.7}{x} \right)^{0.92}}. \quad (11)$$

Пользуясь последним уравнением, получаем следующую сводку:

x	1	2	3	4	5	10
$p_m/p_0$	1	1.53	1.96	2.33	2.68	4.17

Видим, что двойное повышение давления в резервуаре получается только при мощности дуги, втрое превышающей критическую.

В заключение найдем изменение расхода  $A$  в функции  $G$ :

$$A = BG \sqrt{T} = BG \sqrt{\left( G^m c + \frac{n}{m+1} \cdot \frac{1}{G} \right)}.$$

Максимум  $A$  получается при

$$G_{mA}^{m+1} = -\frac{2n}{(3+m)(1+m)c}. \quad (12)$$

Деля (12) на (7), получим:

$$\left( \frac{G_{mA}}{G_{kp}} \right)^{m+1} = 4 \frac{m+1.5}{m+3} = 4 \frac{1.85}{3.35} = 2.2.$$

Отсюда

$$\frac{G_{mA}}{G_{kp}} = 2.2^{1.85} = 1.8. \quad (13)$$

Таким образом, сначала наступает максимум расхода, и лишь после того, как вес воздуха в резервуаре уменьшился еще в 1,8 раза, наступит максимум давления. На рис. 8 дано графическое изображение рассмотренного процесса.

#### Литература

1. Uebermuth В сборнике "Hochspannungsforschung und Hochspannungspraxis", под ред. Biermanns и Mayr, 1931.
2. Kesselring, Коррелманн. A. f. E., № 2, 1936.
3. Labouret. CIGRE, № 128, 1946.
4. Thommen. Revue BBC, № 4, 1944.



# Вопросы оборудования сельских электрических установок

Инж. А. П. ЗЛАТКОВСКИЙ

Главсельэлектро Министерства сельского хозяйства СССР

Сельской электрификации свойственны известные технические и экономические особенности. Особенности ее коренятся в технологии сельскохозяйственных производственных процессов, сезонности основных работ и в особых условиях размещения потребителей электрической энергии. Для промышленности характерны крупные сосредоточенные мощности, сельскохозяйственные же потребители разбросаны на большом пространстве.

**Генераторы.** Сельская электрификация прежде всего нуждается в специальных типах генераторов, главным образом для гидроэлектростанций. В связи с размахом мелкого гидроэлектроизделия ряда заводов и мастерских начал производить гидротурбины и генераторы, однако, комплектно эти агрегаты до недавнего времени не выпускались, за исключением опытной серии Московского завода Главсельэлектро. Раздельное производство турбин и генераторов вызывает большие технические осложнения в сопряжении агрегатов при монтаже и эксплуатации сельских гэс. Турбины малой мощности, как правило, наиболее пригодны и изготавливаются заводами с вертикальным валом.

При вертикальном исполнении гидротурбины генераторное помещение гэс располагается над турбинной камерой, мощность передается самим рабочим валом снизу вверх через потолок турбинной камеры без всяких уплотнений. При турбинах с горизонтальным валом этот вал проходит через стену турбинной камеры в шкивное помещение и в этом случае приходится устраивать сложные уплотнения от просачивания воды.

Если почти все мелкие гидротурбины выпускаются нашими заводами в вертикальном исполнении, то мелкие электрогенераторы изготавливаются заводами электропромышленности только в виде горизонтальных машин. Сопряжение вертикальной турбины с горизонтальным генератором на сельских гидроэлектростанциях осуществляют обычно применением полуперекре-

Приводятся основные требования, предъявляемые к электропромышленности с точки зрения необходимости выпуска машин, приборов, аппаратов и материалов, наиболее пригодных для целей развития сельской электрификации СССР. Основное внимание уделяется требованиям к электрическим генераторам, которые должны соответствовать технике и экономике сельских электроустановок, в первую очередь сельских гидроэлектрических станций.

стной ременной или редукторной передачи. Полуперекрестная передача, очень неудобна в эксплуатации и неэкономична. Ремни соскаивают со шкивов и быстро изнашиваются. Потери энергии значительно превышают нормы, установленные для ременной передачи.

Редукторы, передающие вращение с вертикального вала турбины на горизонтальный вал генератора, весьма сложны в производстве и неудобны в эксплуатации. Зубья изнашиваются, особенно из-за смещения колес вследствие деформации деревянных оснований, на которых устанавливаются опорные части вала и редуктора. Работа таких редукторов сопровождается неприятным для обслуживающего персонала шумом.

Единственное рациональное разрешение вопроса комплектования гидроагрегатов — применение вертикальных генераторов.

На московском заводе Главсельэлектро освоено производство опытных образцов нового усовершенствованного гидроэлектрического агрегата, предназначенного для внедрения в практику сельской электрификации. Агрегат состоит из вертикальной турбины с пропеллерным рабочим колесом ПРК-70 диаметром 600 мм и вертикального гидрогенератора нового типа с селеновыми выпрямителями вместо вращающихся машинных возбудителей. Генератор сконструирован по предложению С. Б. Юдицкого (ВЭИ). На рис. 1 показан вертикальный синхронный генератор с селеновыми выпрямителями типа ВСГС-50/8. Техническая характеристика генератора: мощность — 50 кВА; число оборотов в минуту — 750; частота — 50 Hz; напряжение — 400 V с выведенной нейтралью; номинальный ток — 72 A; номинальный коэффициент мощности — 0,8; параметры возбуждения: напряжение — 40 V, ток — 42 A; номинальный к. п. д. с учетом выпрямителя и стабилизирующего трансформатора — 87%; вес генератора без шкивов — 650 kg; вес трансформатора-стабилизатора —

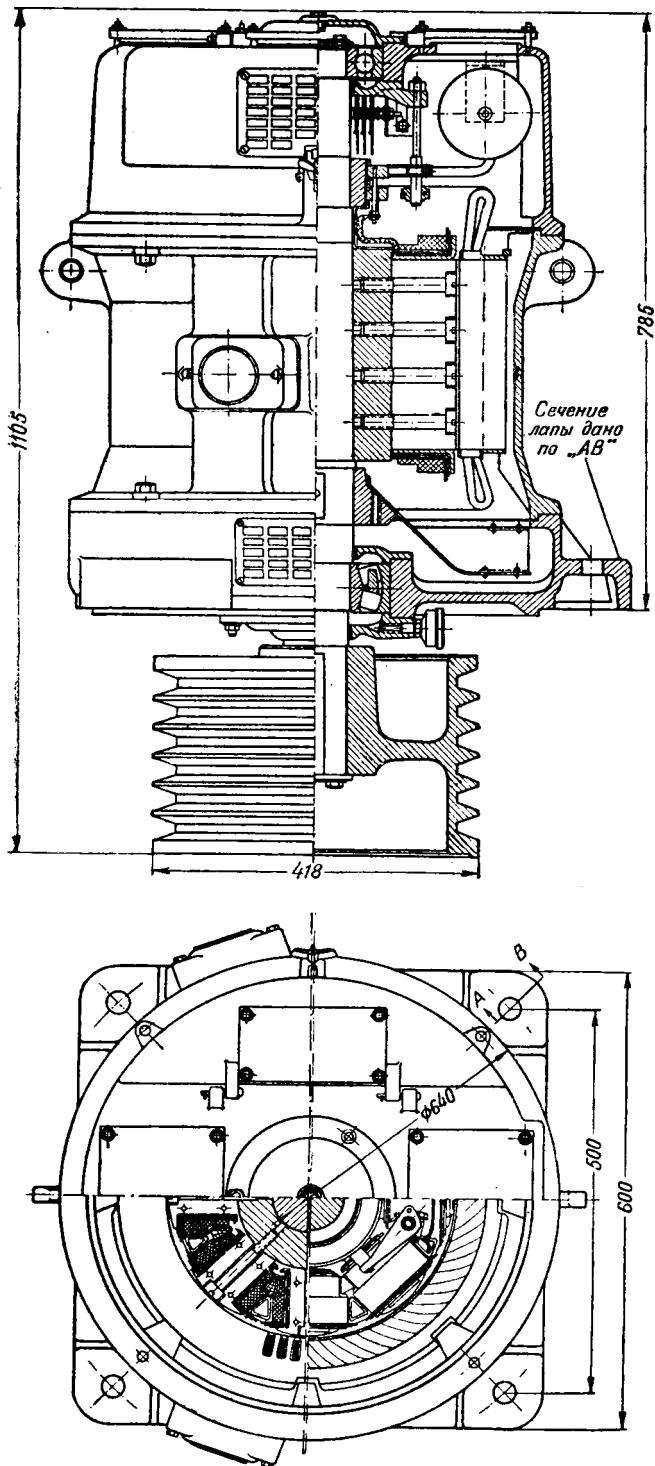


Рис. 1. Вертикальный синхронный гидрогенератор ВСГС-50/8 для сельских гидроэлектростанций.

35 kg; угловое число оборотов  $750 \cdot 2,5 = 1875$ .

Для наблюдения за работой контактных колец, щеток и селеновых столбиков в верхнем подшипниковом щите имеются два люка, закрытых крышками. Против крышек смонтированы два селеновых выпрямительных столбика, два столбика размещены внутри подшипникового щита. Таким образом, при открытых крышках можно легко осмотреть и обслужить весь вы-

6\*

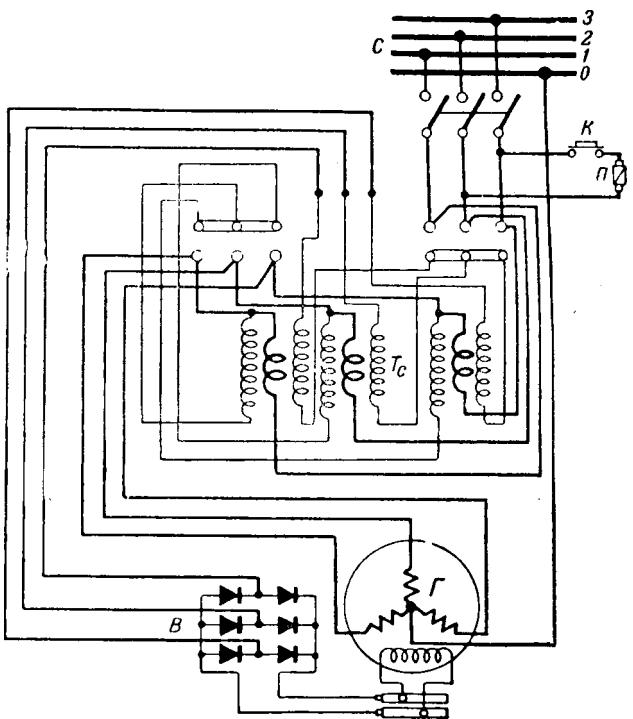


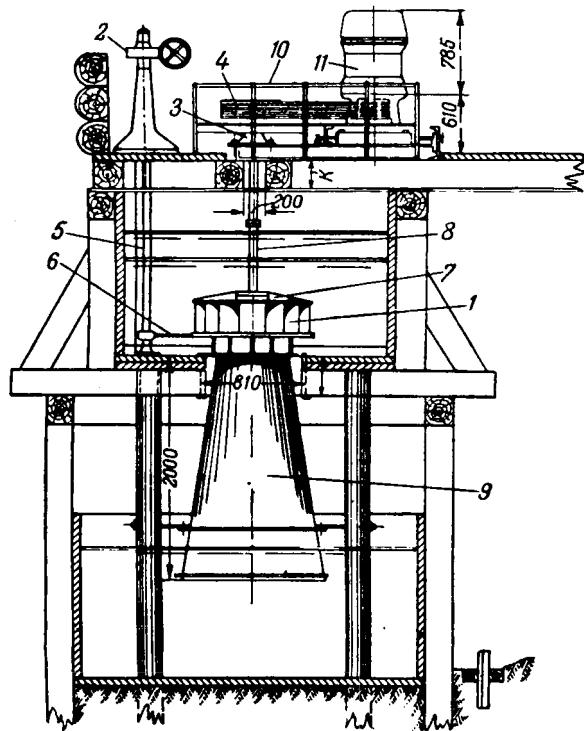
Рис. 2. Схема соединений генератора ВСГС-50/8.  
Г — генератор; В — выпрямитель; Тс — трансформатор-стабилизатор;  
С — сеть; К — пусковая кнопка; П — предохранитель.

прямитель. В нижнем подшипниковом щите помещается вентилятор, закрепленный на роторе и создающий при вращении машины поток воздуха, входящий через отверстия в верхнем щите. Воздух проходит через щели между пакетом статора и корпусом и между катушками ротора по двум параллельным путям. Нагретый воздух прогоняется вентилятором и выбрасывается наружу через отверстия в нижнем подшипниковом щите.

Вал гидрогенератора вращается на двух подшипниках качения, из которых верхний смазывается через пробку в наружном фланце, нижний при помощи масленки Штауфера. На свободном конце генератора насаживается шкив клиновидной ременной передачи. Для установки генератора имеются четыре лапы с отверстиями для болтов.

Селеновый выпрямитель гидрогенератора ВСГС-50/8 состоит из 18 квадратных элементов  $100 \cdot 100$  mm с рабочей площадью  $90 \text{ cm}^2$ . При скорости охлаждающего воздуха 2,5 m/sec может быть допущена на один столбик нагрузка в 11—12 A. При параллельном соединении всех четырех столбиков нагрузка выпрямителя без опасения чрезмерного перегрева может быть доведена до 42—45 A, что вполне удовлетворяет номинальным условиям работы гидрогенератора.

Для того чтобы напряжение генератора держалось более или менее постоянным при изменяющейся нагрузке, применяют компаундирующее устройство в виде особого компактного трехобмоточного трансформатора-стабилизатора. Схема устройства показана на рис. 2. Одна из обмоток — высоковольтная с большим числом



До перехода заводов электропромышленности на массовый выпуск таких специальных генераторов необходимо организовать выпуск вертикальных генераторов с обычными возбудителями, путем простого приспособления серийных горизонтальных генераторов для вертикальной установки. Такие генераторы в настоящее время по заказу организаций Сельэлектро изготавливается завод им. Калинина, по типу стандартных серий СГ с мощностями 15—60 кВА, 1 000 об/мин и по типу С до мощности 175 кВА. Все эти генераторы, так же как и генераторы Московского завода Сельэлектро, рассчитаны на привод от гидротурбины путем клиновидноременной передачи. Для установок с повышенным напором и большим числом оборотов возможно непосредственное соединение вертикальных гидрогенераторов с турбинами.

Для мощностей, начиная с 375 кВА и выше, передать мощность от турбины к генератору ремнем затруднительно. Необходимо поэтому организовать серийный выпуск гидрогенераторов в вертикальном исполнении с единичными мощностями от 375 кВА и выше для непосредственного соединения с гидротурбинами с числом оборотов в минуту от 130 до 500. Конструкции таких генераторов разработаны, и они частично выпускались Свердловским заводом Министерства электропромышленности (так называемая Узбекская серия). В этой серии должны выпускаться генераторы на напряжения 400—6 300 В, а в некоторых случаях и на 11 000 В.

**Аппаратура автоматизации.** Большое значение для развития рациональной, высококачественной и экономичной эксплоатации сельских электроустановок имеет автоматизация, вернее, полуавтоматизация сельских гидроэлектростанций. Развитие этого дела тормозится полным отсутствием производства автоматических регуляторов числа оборотов малых гидротурбин. Наши требования к регулятору таковы: доступность в цене и в изготовлении, простота эксплуатации и надежность работы. Пока мы таких регуляторов не имеем, а план восстановления и развития народного хозяйства ставит в области автоматизации большие задачи.

Имеется ряд предложений и конструкций электромеханических регуляторов, могущих частично заменить дорогие и малодоступные масляные регуляторы заводского типа. Наиболее подходящим является регулятор числа оборотов и напряжения типа ВИМЭ-Г конструкции А. А. Глебовича, испытанный еще до войны на нескольких действующих гидроэлектростанциях. Небольшая серия таких регуляторов будет изготовлена в 1948 г. на заводах Сельэлектро. После испытания в практических условиях будут разработаны требования к автоматической аппаратуре по регулированию числа оборотов и напряжения сельских электростанций.

**Параллельная работа электростанций и вопросы оборудования.** Необходимо поставить задачу объединения раздельно работающих сельских электростанций в небольшие местные энергосистемы, когда для этого имеются благоприят-

ные технические и экономические перспективы. Генераторы и вся выпускаемая аппаратура таких электроустановок должны быть рассчитаны на параллельную работу. Должен быть организован, в частности, массовый выпуск таких простых приборов, как нулевой вольтметр.

Сейчас мы располагаем положительным опытом параллельной работы двух сельских гидроэлектростанций (Горюхалинской и Дубровской) в Оханском районе Молотовской области. Обе гэс двухагрегатные мощностью по 120—150 кВА в агрегате. Они расположены на расстоянии 14 км одна от другой. Они питают энергией большой сельскохозяйственный район с 30 колхозами и г. Оханска. Объединение отдельных агрегатов на станциях и двух станций на общую сеть освободило значительное количество дублирующих линий и повышающих трансформаторов и дало возможность за счет несовпадения работ по времени и уменьшения коэффициента одновременности присоединить ряд новых потребителей, составляющих суммарно до 30% от общей мощности ранее присоединенных абонентов.

Не менее важная система параллельной работы, сочетающая также с режимом водотока, осуществляется в настоящее время в Ленинградской области на каскаде гэс на р. Оредже с четырьмя электростанциями и в сочетании с системой Ленэнерго.

Изучение работы этих опытных объектов позволит в скором времени сформулировать требования к оборудованию и аппаратуре сельских электростанций с точки зрения работы станций, объединенных в малых энергосистемах. В частности, будет решен вопрос о целесообразности применения на сельских гэс асинхронных генераторов как для изолированной работы, так и для совместной работы с агрегатами, оборудованными синхронными генераторами.

Необходимо уделить серьезное внимание селективной защите элементов оборудования в сельских электроустановках. Установки работают сейчас на примитивных плавких вставках. Без селективной защиты нельзя будет, в частности, решить вопрос о параллельной работе. Необходимо разработать и широко внедрить в практику сельской электрификации специальные типы первичных реле, работающих без дефицитных и дорогих трансформаторов тока. В свое время такими первичными реле оснащались масляные выключатели типа МВ-5, ныне снятые с производства.

**Распределительные щиты.** Говоря о станционном оборудовании, необходимо упомянуть о распределительных щитах. Щиты должны изготавливаться на квалифицированных заводах и мастерских комплексно со всей аппаратурой и приборами и доставляться на монтаж в разобранном или собранном виде, но полностью укомплектованными. От хорошо продуманной конструкции распределительного щита зависит компактность самого здания и удобство обслуживания электростанции. Нормальный щит обычного типа требует соответствующего прохода позади щита. Размер здания вследствие этого значи-

тельно увеличивается. Необходимо перейти для большинства гэс на щиты прислоненного типа, для которых не потребуется резервировать большой площади позади щита. Системой Сельэлектро разработаны новейшие конструкции прислонных распределительных щитов, полностью отвечающие всем требованиям техники безопасности и нормам по устройству электрических установок напряжением 380/220 В. Эти прислонные щиты не имеют открытых токоведущих частей или голой проводки на лицевой стороне. Обслуживание аппаратуры в таких щитах производится либо сбоку, либо через дверцы, открывающиеся при необходимости на передней панели щита.

Большие удобства в управлении сельскими электростанциями представляет комплектный миниатюрный щит-пульт. Такой небольшой щит-пульт устанавливается на столе дежурного или подвешивается на стене. Опытные образцы такого миниатюрного щита, с малыми измерительными приборами на купроксах, с кнопочным управлением фидерами и со световой сигнализацией изготовлены на Калининском радиоэлектромеханическом заводе Сельэлектро.

**Электроизмерительная аппаратура электростанций.** Сельские электрические станции должны быть оснащены полным комплектом электроизмерительных приборов, монтируемых на распределительных щитах. Помимо контроля напряжения и тока в главной цепи и цепи возбуждения необходимо осуществлять измерение частоты. Наряду с выпуском обычных щитовых вибрационных частотомеров промышленность должна организовать массовый выпуск недорогих стрелочных частотомеров, предназначенных для оснащения сельских электрических установок, и особенно гидроэлектрических станций.

**Оборудование подстанций.** В комплекс станционного узла сельской электростанции, и особенно гидроэлектростанции, входит повышающая подстанция. Изготавляемые промышленностью силовые трансформаторы первого габарита являются трансформаторами понижающими и по своим коэффициентам трансформации и ответвлениям не совсем удобны для работы в качестве повышающих. Необходимо организовать выпуск повышающих трансформаторов с несколько измененными коэффициентами трансформации, например, не  $6\,000/400/230 \pm 5\%$ , а  $380/6\,300 \pm 5\%$ . Трансформаторы на такие коэффициенты трансформации и с такими ответвлениями дадут возможность значительно увеличить радиус экономичной и технически целесообразной передачи электроэнергии от сельских электростанций. Трансформаторы должны быть пригодны как для внутренней, так и для наружной установки.

Отсутствие высоковольтной аппаратуры для наружных установок препятствует развитию сельских электроустановок. Желательно организовать производство и массовый выпуск комплектных распределительных устройств вместе с повышающими трансформаторами для сельских гидроэлектростанций.

Конторой типового проектирования Главсельэлектро разработаны конструкции комплектных повышающих трансформаторных подстанций для сельских электроустановок. Основным элементом этих комплектных распределений является комбинированный разъединитель-рубильник системы Покрасса. Аппарат обеспечивает безопасную эксплуатацию повышающей трансформаторной подстанции, так как гарантирует необходимую последовательность операций по включению или отключению повышающих трансформаторов с высоковольтной и низковольтной сторон. При выключении первым отключается низковольтный рубильник, а затем блокированный с ним высоковольтный разъединитель. Последовательность операции включения обратная.

**Передача и распределение электроэнергии и вопросы оборудования.** В области передачи и распределения электрической энергии большое значение имеет внедрение смешанной трехфазно-однофазной системы передачи. При таком способе передачи и распределения магистрали устраиваются трехфазными, а ответвления однофазными. Такая система весьма экономична и дает до 30% экономии в проводах за счет почти полной ликвидации главного, наиболее тяжелого, звена сельских сетей — линий низкого напряжения. На столбах высоковольтной сети устанавливаются небольшие однофазные трансформаторы с низковольтной разводкой к ближайшим потребителям по тем же столбам. Необходимо решить вопрос о наиболее подходящей конструкции однофазных трансформаторов специального сельского типа. Эти трансформаторы должны иметь пониженные потери в стали за счет некоторого повышения потерь в меди, так как по режиму работы они имеют малый среднегодовой коэффициент загрузки.

Для применения смешанной системы нужны также небольшие однофазные электродвигатели, которые должны быть введены в общесоюзный стандарт электрических машин. Для широкого развития сельской электрификации нужны электродвигатели применительно к смешанной системе распределения энергии, т. е. однофазные электродвигатели на напряжение 220 В с конденсаторным или репульсионным запуском с мощностями от 0,16 до 5 kW.

**Рациональная электрификация сельского хозяйства** требует организации массового выпуска разнообразной и специальной сетевой аппаратуры. Для напряжения до 35 кВ включительно при строительстве сельских линий электропередачи наиболее экономичными, почти во всех случаях, являются не подвесные, а штыревые изоляторы. При этих изоляторах возможно для указанного диапазона эксплуатационных напряжений применять одностоечные опоры с повышенным пролетом. Этим достигается значительная экономия леса.

При штыревых изоляторах помимо лучшего использования материала столба легко осуществить особую рациональную грозозащитную схему с верхним защитным проводом. В случае такой схемы один из проводов располагают над

двумя другими проводами, как показано на рис. 6. Верхний провод экранирует два других провода и подобно тросу защищает их от прямого поражения молнией. Штырь изолятора защитного провода надежно заземляется. Схема эта может быть применена в сетях с небольшими емкостными токами, при которых после перекрытия изолятора защитного верхнего провода возникающая дуга разрывается без применения каких-либо специальных мер. Этому требованию удовлетворяют сети, емкостный ток которых не превышает 20 А при рабочем напряжении 6—10 кВ и 5 А при напряжении 20—35 кВ.

Если на линии напряжением 35 кВ применяются подвесные изоляторы, схема с защитным проводом осуществляется путем прокладки верхнего грозозащитного провода на штыревых изоляторах подобно тому, как это показано на рис. 6, б.

Большое значение имеет организация массового выпуска облегченной аппаратуры для воздушных отключательных пунктов, состоящих из разъединителя с приводом и предохранителя. Для оборудования сельских распределительных устройств и более мощных отключательных пунктов необходимо организовать массовый выпуск разъединителей мощности на напряжение 6—10 кВ. Следует обратить внимание на особую потребность в разъединителях мощности для наружных установок, которые в массовом количестве нашими заводами не производятся.

Мелкие трансформаторы, особенно однофазные, применяемые при экономичной смешанной системе передачи электроэнергии, следует выпускать полностью укомплектованными рациональной и простой аппаратурой высокого и низкого напряжений. В этот комплект входят—разъединитель, предохранитель, разрядник, щиток низкого напряжения.

Особое внимание следует обратить на выпуск рациональной и дешевой грозозащитной аппаратуры. Разрядники как вентильные, так и ионические по пределам сопровождающего тока должны соответствовать реальным условиям установок малой и средней мощности сельскохозяйственного значения. Кроме того, необходимо испытать и выбрать наиболее рациональную конструкцию и организовать массовый выпуск разрядников для сетей и генераторов 380/220 В.

Действующий стандарт проводов в части стальных многожильных проводов необходимо расширить введением новых сечений 16 и 25  $\text{mm}^2$ . Кроме того, желательно разработать конструкции и организовать выпуск для сельских линий электропередачи различных биметаллических (сталемедных) проводов и специальных немагнитных стальных проводов.

**Трехфазные асинхронные электродвигатели.** Необходимо обратить внимание на трехфазные асинхронные электродвигатели, которые являются основным оборудованием потребитель-

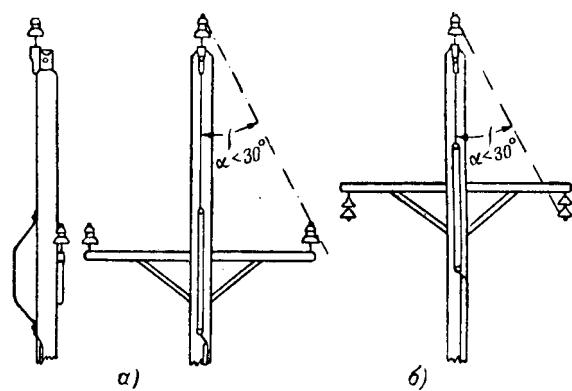


Рис. 6. Схема линий электропередачи 6, 10 и 35 кВ с защитным проводом.  
а— при штыревых изоляторах на всех фазах; б— при штыревых изоляторах на одной верхней фазе.

ских установок в производственной электрификации сельского хозяйства.

Если бы в электродвигателях и пусковых устройствах при них был предусмотрен облегченный режим пуска и уменьшенный пусковой ток, то был бы исключен значительный перерасход меди проводов.

Промышленность выпускает электродвигатели обычно на 380/220 В, соединенные нормально в звезду, тогда как линейное напряжение в сети почти всех, без исключения сельских электроустановок составляет 380 В. В треугольник такой электродвигатель пересоединить невозможно. Нужны электродвигатели, рассчитанные на напряжение 650/380 В, которые нормально были бы соединены на треугольник и работали бы при таком соединении от сети 380 В, а на момент пуска переключателем пересоединялись бы с треугольника на звезду. Этим самым был бы разрешен вопрос о токах, возникающих в момент пуска короткозамкнутого асинхронного электродвигателя. Необходимо ввести в стандарт электродвигатели всех мощностей с напряжением 650/380 В и наладить массовый выпуск таких машин, а также и переключателей со звезды на треугольник, которые значительно облегчат внедрение электроэнергии в производственные процессы сельского хозяйства.

**Внутренняя проводка и установочные материалы.** Необходимо в самый краткий срок организовать массовое производство арматуры для внутренней проводки и установочных материалов, специально пригодных для системы 380/220 В с заземленной нейтралью, которая широко применяется в сельских электрических установках.

Следует обеспечить массовый выпуск счетчиков и ограничителей.

От массового выпуска электрооборудования и материалов, пригодных для применения в сельских электроустановках, зависит дальнейшее широкое развитие сельской электрификации.

## Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока с помощью дросселей насыщения

Кандидат техн. наук М. И. КРАЙЦБЕРГ

Москва

Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока в больших пределах достигается путем изменения напряжения на зажимах машины и частично ослаблением поля. Для изменения напряжения применяют сложное и громоздкое оборудование—машинные агрегаты (система Леонарда, амплидины и др.), либо электронные установки (система «таймоторол»). Здесь рассмотрен метод регулирования скорости вращения двигателей постоянного тока, основанный на изменении напряжения на зажимах машин с помощью дросселей насыщения (реактивных катушек).

Для изменения напряжения на зажимах двигателя включается реактивная катушка с подмагничиванием 3 последовательно с якорем 1 (рис. 1). Напряжение переменного тока выпрямляется выпрямителями 2. Обмотка возбуждения имеет независимое питание.

На рис. 2 приведены характеристики дросселя. Кривые 1, 2, 3, 4 построены для различ-

ных значений тока подмагничивания. Как видно, при нагрузке  $I_1$  напряжение на дросселе изменяется в зависимости от степени подмагничивания от значения  $U_1$  до  $U_4$ . Чем больше ток подмагничивания, тем меньше напряжение  $U$  на дросселе. Напряжение на входе выпрямителя

$$U_a = \dot{U} - \dot{U}_L,$$

где  $\dot{U}$ —напряжение сети;

$\dot{U}_L$ —напряжение на дросселе;

$\dot{U}_a$ —напряжение на входе выпрямителя.

Таким образом, регулируя ток подмагничивания, можно переходить с одной характеристики на другую, осуществляя плавное изменение напряжения на зажимах двигателя. Мощность цепи управления составляет около 2—3% от регулируемой мощности.

Помимо реактивной катушки можно использовать для расширения пределов регулирования, также ослабление поля. Изменение числа оборотов вверх от номинального значения достигается ослаблением поля, а вниз—изменением тока подмагничивания дросселя. Выпрямление можно осуществить твердыми или ионными выпрямителями. Для малых и средних мощностей предпочтительны твердые выпрямители—конструктивно простые, удобные в эксплуатации и не требовательные в уходе.

Для установления характера изменения напряжения на выпрямителе и построения характеристик двигателей при неизменной величине тока подмагничивания и переменной нагрузке рассмотрим схему замещения.

Заменив реальную электрическую цепь, состоящую из реактивной катушки, выпрямителя и двигателя, эквивалентной цепью, получим схему, представленную на рис. 3, в которой  $X_L$ —индуктивное сопротивление реактивной катушки,  $R_b$ —эквивалентное сопротивление селенового выпрямителя,  $kr$ —переменная нагрузка двигателя. Активным сопротивлением реактивной катушки пренебрегаем. Как видно, в схеме замещения контур намагничивания отсутствует, так как при идеальном холостом ходе (пренебрегая потерями) противо-э. д. с. двигателя достаточна для уравновешивания напряжения

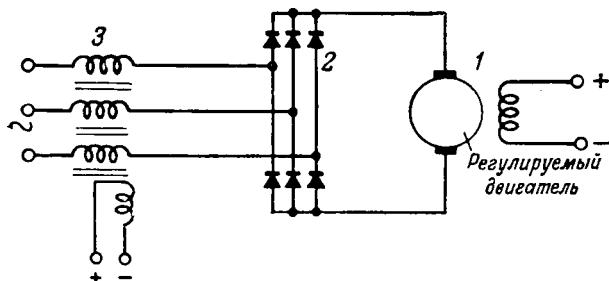


Рис. 1.

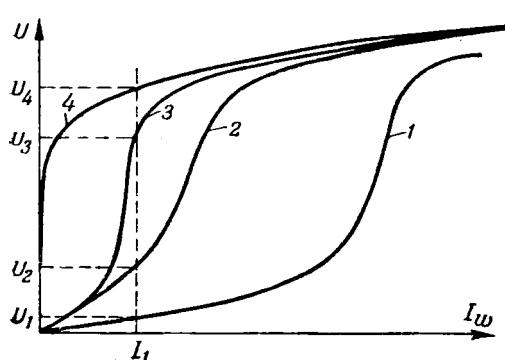


Рис. 2.

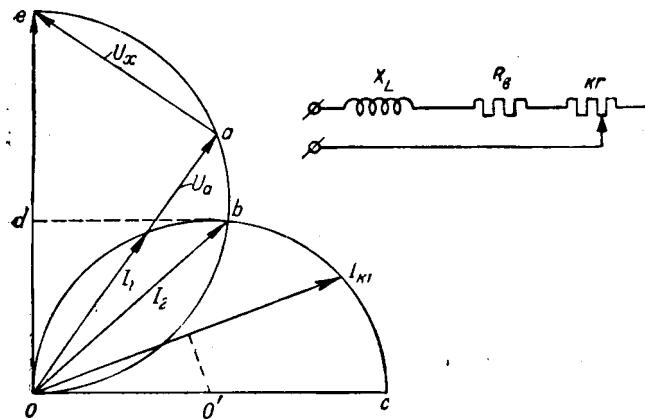


Рис. 3.

сети. Очевидно, для данной схемы имеет место круговая диаграмма (рис. 3). Полуокружность  $Oae$  представляет собой геометрическое место точек концов вектора напряжения на двигателе, полуокружность  $Obc$  соответственно тока. Диаметр окружности напряжения  $Oe$  равняется напряжению сети. Геометрическая сумма напряжений дросселя и выпрямителя при любых изменениях параметра  $kя$  равняется линейному напряжению. Диаметр токовой окружности может быть определен из условий идеального короткого замыкания, т. е. в предположении отсутствия активных потерь в дросселе, выпрямителе и двигателе.

Тогда

$$|I_{кz}| = \left| \frac{U}{X_{dp}} \right|.$$

При «идеальном» коротком замыкании ток сдвинут на  $90^\circ$  от линейного напряжения.

Из диаграммы видно, что пределы перегрузочной способности и ток короткого замыкания двигателя меньше соответствующих значений при непосредственном включении его на номинальное напряжение сети. В последнем случае ток короткого замыкания определится уравнением

$$I_{кz} = \frac{U}{R_{dp} + R_b}.$$

При включении двигателя по схеме рис. 1 ток короткого замыкания

$$I_{кz} = \frac{U}{\sqrt{(R_{dp} + R_b)^2 + X_L^2}}.$$

Помимо уменьшения тока короткого замыкания имеет место сдвиг фаз между линейным током и напряжением. Максимальная мощность, забираемая из сети и потребляемая двигателем (включая потери в выпрямителе), равна отрезку  $Od$  (рис. 3), ибо он является наибольшей из проекций вектора тока на направление напряжения.

Электромеханические характеристики двигателя претерпевают существенные изменения, так как одновременно с изменением тока происходит перераспределение напряжения между дросселем  $U_L$  и активным сопротивлением  $U_a$ . Построение характеристик двигателя можно осуществить графическим путем. Для этого нужно знать ха-

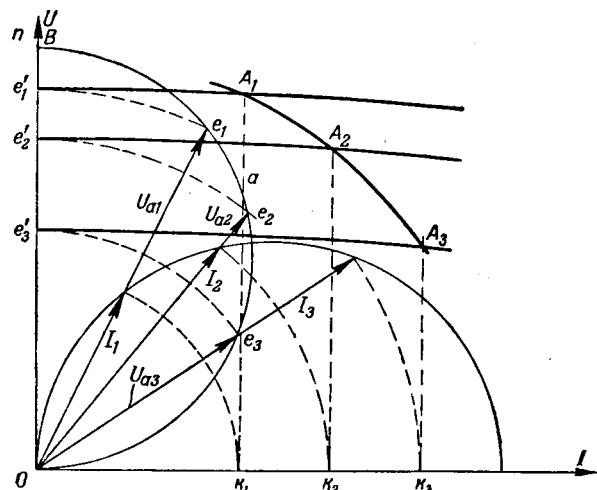


Рис. 4.

рактеристику  $n = f(I)$  двигателя при включении последовательно с якорем сопротивлении, равном сопротивлению выпрямителя.

Совместно с круговой диаграммой строим скоростную характеристику двигателя (рис. 4). Для тока  $I_1$  напряжение на двигателе определяется точкой пересечения вектора тока или его продолжения  $e_1$  с окружностью напряжения  $OaB$ . Проводим радиусом  $Oe_1$  дугу и в точку пересечения ее с осью ординат  $e'_1$  переносим скоростную характеристику двигателя путем параллельного смещения. Проводим дугу радиусом  $OI_1$  и в точке пересечения с осью обсцисс  $k_1$  восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с характеристикой двигателя  $A_1$ . Отрезок  $k_1 A_1$  — искомое число оборотов двигателя. Построив серию точек  $A_1, A_2, A_3$  для разных нагрузок и соединив их линией, получим новую скоростную характеристику двигателя, при работе в схеме с реактивной катушкой.

Преимуществом описанного метода регулирования является возможность замены машинных агрегатов статическим устройством, надежным и простым в эксплуатации, что особенно важно для регулирования скорости вращения двигателей небольшой и средней мощности (до 5...10 kW), где применение мотор-генераторных установок и ионных выпрямителей нежелательно. Пределы регулирования скорости сравнительно невелики:  $\frac{n_{\min}}{n_{\max}} = 1:3$ . В сочетании с регулированием скорости путем ослабления поля можно получить диапазон регулирования скорости вращения  $\frac{n_{\min}}{n_{\max}} = 1:25$ . Такой диапазон достаточен для многих приводов, встречающихся в промышленной практике.

Как указывалось выше, в схеме имеет место зависимость скорости вращения двигателя от нагрузки. Во многих случаях требуется стабилизация скорости вращения. Она может быть осуществлена путем автоматического управления током подмагничивания. В случае независимого возбуждения стабилизация скорости вращения может быть осуществлена схемой, в которой ток

подмагничивания реактивной катушки 3 управляется угольным регулятором напряжения. Может быть применен также и вибрационный регулятор напряжения.

Чувствительный элемент регулятора напряжения (катушка электромагнита) включен на зажимы двигателя. Величина напряжения на зажимах машины, равная примерно величине противо-э. д. с., при неизменной величине возбуждения является мерой скорости вращения. Изменяя величину сопротивления реостата в цепи катушки регулятора, можно изменять уставку реле, устанавливая, таким образом, новую ступень скорости. Поддержание скорости вращения происходит независимо от нагрузки и определяется только точностью работы регулятора. С помощью угольного регулятора достигается на зажимах двигателя автоматическое плавное изменение напряжения, подаваемого от выпрямителя.

В случае применения вибрационного регулятора напряжения происходит переход с кривой 1 на кривую 3 (рис. 2).

◆ ◆ ◆

## Новая векторная диаграмма турбогенератора

Кандидат техн. наук Н. А. ПОЛЯК

Москва

При работе турбогенератора на сборные полосы не бесконечной мощности, изменение режима сопровождается изменением также и напряжения на вводах. Если в таких условиях применять общеизвестный метод спрямления характеристики холостого хода турбогенератора, то спрямление, примененное при первоначально напряжении, оказывается неприменимым, или, вернее сказать, слишком неточным при другом напряжении; нельзя, следовательно, заменять турбогенератор воображаемым ненасыщенным. Приходится принимать во внимание действительную нелинейную характеристику холостого хода машины. Для этого предлагаются специальные построения [Л. 1, 2], обладающие, однако, существенными недостатками, состоящими в следующем: во-первых, полный отказ от наглядной векторной диаграммы и, во-вторых, введение в расчет [Л. 2] независящего от напряжения кажущегося сопротивления  $z_n$  в большинстве случаев неправильно характеризующего приемники и потому приводящего к недостаточно точным результатам.

Ниже предлагается иной метод исследования — при помощи новой векторной диаграммы, применением которого учитываются: а) нелинейность характеристики холостого хода турбогенератора и б) заданные зависимости потребления активной и реактивной мощности приемниками — от величины подведенного к ним напряжения. Этот метод основан на ряде соображений, кото-

**Выводы.** Преимуществами описанного метода регулирования скорости являются: 1) отсутствие машинных агрегатов для регулирования напряжения на зажимах управляемого двигателя; 2) осуществление регулирования требует небольшой управляющей мощности; 3) простота элементов оборудования и схемы, особенно в случае выпрямления тока селеновыми выпрямителями.

К числу недостатков можно отнести: 1) сравнительно небольшой диапазон изменения скорости вращения; 2) низкий коэффициент мощности (круговая диаграмма), причем из сети потребляется отстающий ток; 3) относительно большой вес реактивной катушки, превосходящий примерно в 1,5—1,8 раза вес трансформатора такой же мощности (однако вес катушки в несколько раз меньше веса мотор-генератора); 4) появление при насыщении сердечника катушки высших гармоник тока, которые загружают сеть.

ные в дальнейшем последовательно рассматриваются.

В одной из предыдущих работ [Л. 3] автор этой статьи установил, что синхронная реактивность турбогенератора в любом его режиме  $x_{dhi}$ , реактивность Потье  $x_p$ , синхронное реактивное сопротивление (ненасыщенное)  $x_d$  и реактивность  $x_{di}$ , определяемая делением  $e_i$  на  $i_{1k}$  (рис. 1), взаимно связаны следующим образом:

$$x_{dhi} = x_{di} \left[ 1 + \frac{x_p}{x_d} \left( \frac{x_d}{x_{di}} - 1 \right) \right]. \quad (1)$$

Здесь и дальше все величины в относительных единицах.

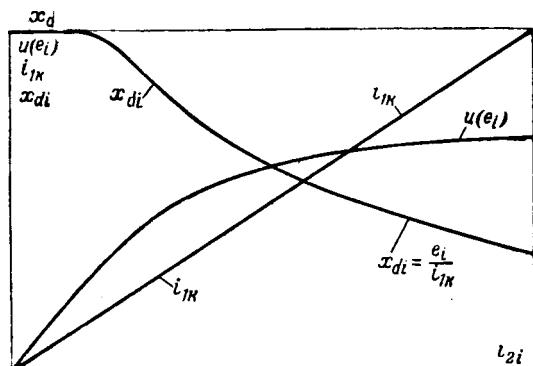


Рис. 1.

Величины  $x_p$  и  $x_d$  характеризуют турбогенератор независимо от режима; зависящей от режима является величина  $x_{di}$ . Она тем меньше, чем больше внутренняя э. д. с.  $e_i$ , действующая в рассматриваемом режиме. При некоторых средних условиях насыщения, т. е. при некоторой средней нелинейности характеристики холостого хода турбогенератора, э. д. с.  $e_i$  и соответствующий ей ток  $i_{2i}$  взаимно связаны следующим образом:

$$e_i = \sqrt{4,24 - (2,00 - i_{2i})^2} - 0,80 \text{ при } 0,5 \leq i_{2i} \leq 2,00, \quad (2)$$

$$i_{2i} = 2 - \sqrt{4,24 - (e_i + 0,80)^2} \text{ при } 0,6 \leq e_i \leq 1,25. \quad (3)$$

Этому соответствует следующая зависимость  $x_{di}$  от  $x_d$  и  $e_i$ :

$$x_{di} = \frac{x_d}{1,2} \left[ \sqrt{1,56 - (e_i - 0,2)^2} + 0,04 \right] \quad (4)$$

при  $0,6 \leq e_i \leq 1,15$ .

Чем больше отношение  $\frac{x_p}{x_d}$  или чем больше разность

$\frac{x_d}{x_{di}} - 1$ , тем больше  $x_{dhi}$  по сравнению с  $x_{di}$ .

Обратимся к цифрам и выясним количественные соотношения. У современных наших турбогенераторов [Л. 4] реактивность Потье составляет от 0,22 до 0,12, синхронная реактивность — от 2,19 до 1,14. Отношение  $\frac{x_p}{x_d}$  для разных турбогенераторов от 0,15 до 0,06. Исключив из рассмотрения турбогенераторы малой мощности с  $x_p > 0,15$ , получим значения  $\frac{x_p}{x_d}$  в пределах от 0,10 до 0,06.

Отношение  $\frac{x_d}{x_{di}}$ , входящее в выражение (1), зависит от условий работы генератора и тем больше, чем больше внутренняя э. д. с.  $e_i$  в рассматриваемом режиме. При реактивности Потье не выше 0,15, номинальном  $\cos \varphi$  турбогенератора не ниже 0,8, напряжении на выводах не выше 1,05 номинального и при полной (номинальной) активной и реактивной нагрузке внутренняя э. д. с. не превосходит 1,15 номинального напряжения. При некоторой средней в отношении нелинейности характеристики холостого хода [формулы (2) и (3)] величина  $e_i = 1,15$  соответствует [формула (4)] отношению  $\frac{x_d}{x_{di}}$  порядка 1,4. В таких условиях при  $\frac{x_p}{x_d}$  от 0,10 до 0,06 отношение  $\frac{x_{dhi}}{x_{di}}$  [формула (1)] составляет:

$$\frac{x_{dhi}}{x_{di}} = 1 + (0,10 \dots 0,06) \cdot (1,4 - 1,0) = 1,040 \dots 1,024.$$

Следовательно, в режиме с наибольшей возможной внутренней э. д. с.  $e_i = 1,15$  величина  $x_{dhi}$  отличается от величины  $x_{di}$  в среднем приблизительно на 3%. В номинальном режиме с номинальным напряжением на выводах внутренняя э. д. с. меньше и разница между  $x_{dhi}$  и  $x_{di}$  составляет лишь около 2,5%, а в режимах с пониженным напряжением на выводах разница еще меньше и при напряжении, например, 90% номинального не превосходит 2%.

При исследовании установившихся режимов работы турбогенератора с различными напряжениями на выводах наиболее существенны режимы с номинальным и с пониженными напряжениями. Для них величину  $x_{dhi}$  практически можно принять равной  $x_{di}$ . Из предыдущего следует, что неточность в оценке  $x_{dhi}$  не будет при этом превосходить около 2,5%, которыми в практических расчетах можно пренебречь.

Разделив все три вектора диаграммы *a*, рис. 2 на  $jx_{dhi}$  и приняв, что  $x_{dhi} = x_{di}$ , получим новую диаграмму *b*, состоящую не из трех векторов э. д. с. и напряже-

ния  $u$

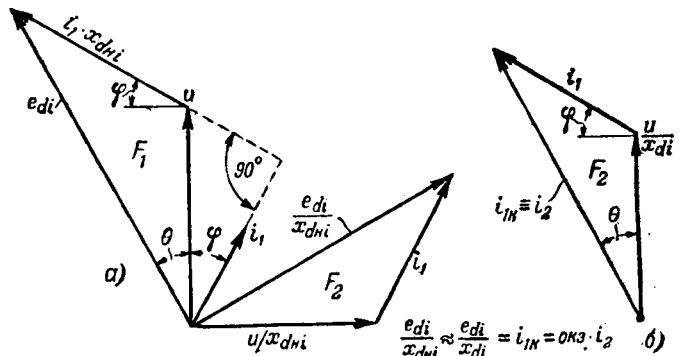


Рис. 2.

ний, а из трех векторов токов: а) тока трехполюсного короткого замыкания на выводах  $i_{1k}$  при токе возбуждения  $i_2$ , действующем в рассматриваемом режиме, б) тока статора  $i_1$  в рассматриваемом режиме и в) тока, определяемого напряжением на выводах и реактивностью  $x_{di}$ . Первый вектор пропорционален току возбуждения  $i_2$  в рассматриваемом режиме, причем коэффициент пропорциональности не зависит от режима и равен о. к. з. Второй вектор равен току статора  $i_1$ , и лишь третий вектор  $\frac{u}{x_{di}}$  не может быть определен вне связи с величиной внутренней э. д. с.  $e_i$  в рассматриваемом режиме.

Как и в элементарной векторной диаграмме ( $e_d \dots i_1 x_d \dots u$ ), в новой диаграмме ( $i_{1k} \dots i_1 \dots \frac{u}{x_{di}}$ ) отчетли-

во в каждом режиме характеризуются углы  $\theta$  и  $\varphi$ , имеющие тот же смысл, что и в элементарной диаграмме. Принципиальная разница между диаграммами, однако, в том, что с изменением  $p_A$  или  $\theta$  при неизменном возбуждении или с изменением тока возбуждения при неизменной присединенной мощности приемников меняется вектор  $\frac{u}{x_{di}}$ , а вместе с ним и напряжение на выводах. Ввиду нелинейности характеристики холостого хода турбогенератора изменение напряжения  $u$  не пропорционально изменению  $\frac{u}{x_{di}}$ .

В новой диаграмме (рис. 2, б) иное соотношение между площадью треугольника векторов и активной мощностью. В диаграмме э. д. с. и напряжений площадь  $F_1$  (рис. 2, а) пропорциональна произведению  $p_A x_{dhi}$ , а в новой диаграмме (рис. 2, б) площадь  $F_2$  пропорциональна отношению  $\frac{p_A}{x_{dhi}}$ . Первое следует из извест-

ного выражения активной мощности:  $p_A = \frac{e_{di} \cdot u}{x_{dhi}} \cdot \sin \theta$ , а второе из того, что после уменьшения всех трех сторон треугольника в  $x_{dhi}$  раз площадь его уменьшилась в квадрате этой величины. После того как  $x_{dhi}$  приравнено  $x_{di}$  и отношение  $\frac{e_{di}}{x_{dhi}}$  обращено в  $i_{1k} = 0$ . к. з.  $i_2$ , выражение активной мощности приобретает следующий вид:

$$p_A = 0 \text{. к. з. } i_2 \cdot u \cdot \sin \theta. \quad (5)$$

Прежде чем перейти к практическому применению новой векторной диаграммы, необходимо условиться о способе оценки отношения  $\frac{u}{x_{di}}$ . Для практических целей желательно поставить  $x_{di}$  и  $\frac{u}{x_{di}}$  в зависимость непосредственно от величины напряжения на выводах. Можно не принимать во внимание разницу между размером реактивности  $x_{di}$ , определенным по величине

напряжения  $u$ , и размером, определенным по величине э. д. с.  $e_i$  в том же режиме, и считать, что в каждом данном режиме действует величина  $x_{di}$ , соответствующая внутренней э. д. с.  $e_i$ , членно равной напряжению на выводах. Другим решением является обобщенная оценка зависимости э. д. с.  $e_i$  от напряжения и применение такой зависимости для определения  $x_{di}$ , о чём говорится несколько дальше:

Практическое применение предлагаемой новой векторной диаграммы рассмотрим на примере.

Предположим, что необходимо исследовать установившиеся режимы работы турбогенератора, включенного на сборные полосы, к которым в качестве приемников присоединены асинхронные двигатели и лампы накаливания. В таких условиях возможны режимы только с отпуском реактивной мощности от генератора в сеть и потому внутренняя э. д. с.  $e_i$  всегда больше напряжения на выводах. Если турбогенератор при номинальном напряжении работает в режиме, близком к номинальному, разность между величинами  $e_i$  и напряжения на выводах, имеющая место в этом режиме, практически остается неизменной и в других режимах ( $e_i - u \approx \text{const}$ ); для некоторых средних условий: при  $x_p = 0,12 \dots 0,15$  и при номинальном  $\cos \varphi$  турбогенератора 0,8 разность  $e_i - u$  можно оценить величиной 0,07, т. е. во всех режимах принимать, что  $e_i = u + 0,07$ .

Располагая векторной диаграммой (рис. 2, б) и заданными статическими характеристиками [Л. 5] приемников, питаемых непосредственно от выводов турбогенератора, поступают следующим образом. Из статических характеристик приемников определяют зависимость  $\cos \varphi_n$  или  $\tan \varphi_n$  приемников от подведенного к ним напряжения. При непосредственном присоединении к выводам генератора  $\tan \varphi_n$  приемника всегда равняется  $\tan \varphi_i$  турбогенератора.

По высоте шкалы  $\frac{u}{x_{di}}$  (рис. 3) влево под углами  $\varphi_n$ , соответствующими определенным напряжениям, а следовательно, и определенным величинам  $\frac{u}{x_{di}}$ , проводят лучи. Величины  $x_{di}$  подсчитывают по формуле (4), исходя при этом из заданного о. к. з. турбогенератора и из принятых соотношений: а)  $x_{di} = \frac{1,2}{\text{o. к. з.}}$ , — это соответствует некоторой средней в отношении нелинейности характеристике холостого хода и б)  $e_i = u + 0,07$ , о чём в качестве возможного соотношения уже говорилось выше.

Если параллельно приемникам помимо рассматриваемого турбогенератора включены другие син-

хронные машины, это должно быть принято во внимание в заданных статических характеристиках.

Располагая шкалой  $\frac{u}{x_{di}}$  с указанным пучком лучей, можно исследовать различные изменения режима, например, выяснить, как меняется напряжение и ток статора турбогенератора в зависимости от активной его загрузки при неизменном токе возбуждения. При этом имеется в виду, что изменение загрузки турбогенератора происходит в результате присоединения новых или отключения ранее присоединенных приемников электрической энергии и что зависимость  $\cos \varphi$  или  $\tan \varphi$  приемников от напряжения остается одной и той же. Статизм регулирования турбины принят равным нулю и, следовательно, число оборотов и частота — неизменны.

Для исследования режима поступают следующим образом. Из вершины вектора  $\frac{u}{x_{di}}$ , соответствующего номинальному напряжению, вдоль его луча, откладывают величину тока статора  $i_{1-1}$ , имеющего место в начальном режиме. Масштаб величины тока тот же, что и масштаб величин  $\frac{u}{x_{di}}$ . Получают вектор  $i_{1k} = 0$ . к. з.  $i_2$ , проводят им дугу, пересекающую все ранее нанесенные лучи. Точками пересечения дуги с лучами определяются возможные режимы работы при различных напряжениях на выводах. Пользуясь получившимися векторными диаграммами, определяют токи статора и активные мощности, соответствующие каждому данному напряжению. Располагая статической характеристикой потребления активной мощности приемниками, например, в виде  $\frac{p_A}{p_{A1}} = \alpha \frac{N_n}{N_{n1}} =$

$= (0,5 + 0,5 u) \frac{N_n}{N_{n1}}$ , достаточно точно характеризующей рассматриваемые в данном примере приемники, подсчитывают кратность присоединенной мощности  $\frac{N_n}{N_{n1}}$  в каждом отдельном режиме. Пример отсчетов из векторной диаграммы и подсчетов соответствующих величин приведен в таблице.

$U$	$\frac{p_A}{x_{di}}$ , mm	$x_{di}$	$p_A^*$	$\frac{p_A}{p_{A1}}$	$\alpha$	$\frac{N_n}{N_{n1}}$	$i_1$ mm	$i_1$ $i_{1-1}$
1,05	45,3	0,89	40,3	0,83	1,025	0,81	94	0,84
1,0	52,0	0,93	48,5	1,00	1,000	1,00	112	1,00
0,95	54,6	0,98	53,5	1,11	0,975	1,14	126	1,12
0,75	50,1	1,12	56,2	1,16	0,875	1,33	159	1,42

\* Величины  $p_A$  получаются умножениями  $\frac{p_A}{x_{di}}$  (графа 2) на  $x_{di}$  (графа 3).

Применив несколько различных радиусов ( $i_{1k} = p. \text{к. з. } i_2$ ), можно определить влияние размеров возбуждения на установившиеся режимы работы турбогенератора. Несколько иным построением (рис. 4) можно определить зависимость режима турбогенератора от размеров тока возбуждения при неизменной присоединенной мощности приемников.

На диаграммах рис. 5, 6, и 7 сопоставлены результаты нескольких подсчетов, выполненных различными методами. Все они относятся к турбогенератору с о. к. з., равным единице, со средней в отношении нелинейности характеристикой холостого хода, с номинальным  $\cos \varphi = 0,80$  и реактивностью Полье 0,12.

Характеристики 3 рис. 5, 6 и 7 получены описанным в настоящей статье графическим построением (рис. 3). Для сопоставления приведены характеристики 7, полученные совершенно точными расчетами, в которых  $x_{di}$  в каждом отдельном режиме определялась точ-

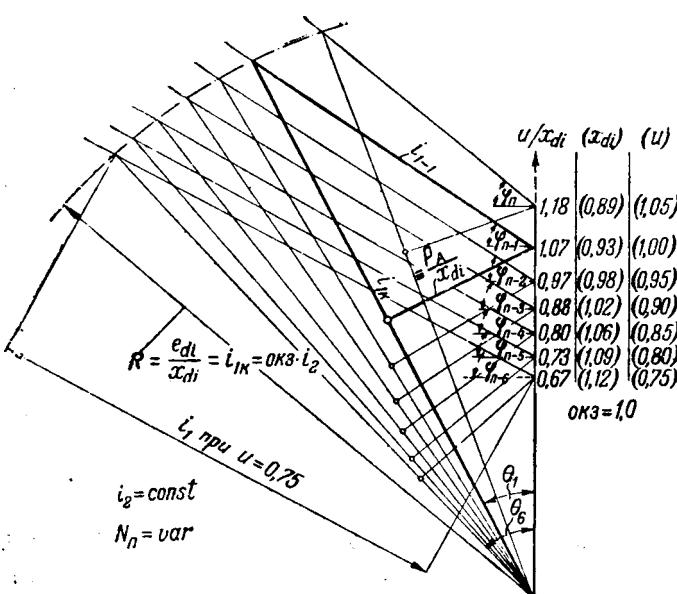


Рис. 3.

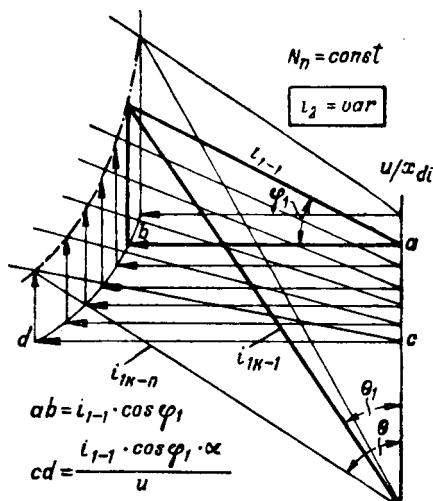


Рис. 4.

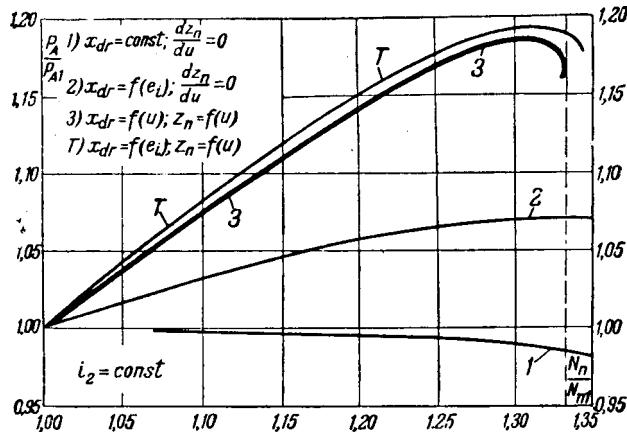


Рис. 5.

но по формуле (1). Из сопоставления видно, что расхождение между характеристиками 3 и  $T$  в большей части диапазона не превосходит одного процента и лишь при кратностях присоединенной мощности  $\frac{N_n}{N_{n1}}$  больше 1,30 расхождение несколько выше. Таким образом, предложенный нами метод построения векторной диаграммы турбогенератора ( $i_{1k} \dots i_{1-1} \dots \frac{u}{x_{di}}$ ) в сочетании со статическими характеристиками приемников для практических целей является совершенно точным.

На тех же диаграммах рис. 4, 5 и 6 приведены еще две серии характеристик: первая серия — 1 получена элементарным аналитическим расчетом в предположении прямолинейной характеристики холостого хода турбогенератора, неизменной синхронной его реактивности ( $x_{dr} = \text{const}$ ) и независимости кажущегося сопротивления приемников от напряжения ( $\frac{dz_n}{du} = 0$ ); вторая серия характеристик 2 получена совершенно точными подсчетами, такими же, как характеристики  $T$ , но кажущееся сопротивление приемников в отличие от характеристик 3, как и в серии характеристик 1, принято не зависящим от напряжения. Серия 2 соответствует характеристикам, полученным недавно описанным в литературе методом [Л. 2].

Из сопоставления характеристик 1 и 2 с теоретической ( $T$ ) следует, что как первая, так и вторая приводят к совершенно неправильным результатам. Нельзя не учитывать нелинейность характеристики холостого хода турбогенератора, из-за которой получается разница между 2 и 1, но нельзя также не принимать во внимание действи-

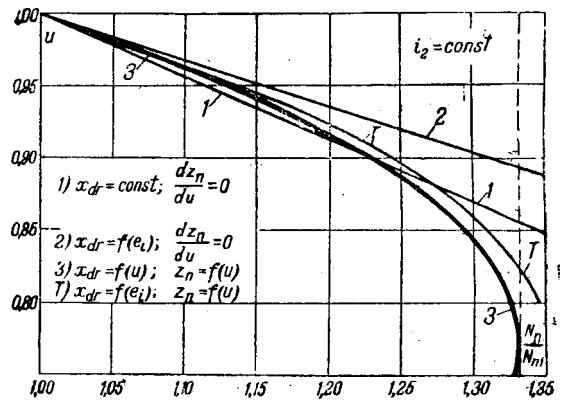


Рис. 6.

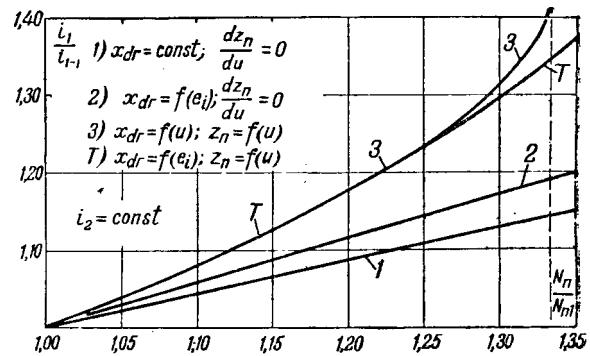


Рис. 7.

тельные статические характеристики приемников, вызывающие разницу между ( $T$ ) и 2.

Для исследования установившихся режимов турбогенератора, работающего на сборные полосы на бесконечной мощности, вместо описанного графического построения, может быть применен и аналитический метод.

Величины, входящие в диаграмму рис. 2, б, взаимно связаны следующим образом:

$$\sqrt{i_2^2 \cdot u^2 \cdot (o.k.z)^2 - p_A^2} = \frac{u^2}{x_{di}} + p_A \operatorname{tg} \varphi. \quad (6)$$

При помощи выражения (6) могут быть аналитически исследованы соотношения всех величин, характеризующих установившийся режим. Так как  $p_A \operatorname{tg} \varphi = p_R$ , то могут непосредственно выясниться и соотношения, связанные с реактивной мощностью. Выражение (6) применимо и вне связи со статическими характеристиками приемников, необходимо лишь, чтобы напряжение на выводах ( $u$ ) было заранее задано или выбрано. Тогда по двум другим величинам из трех, характеризующих режим при данном напряжении ( $i_2, p_R, p_A$ ) можно определить третью. Например, по  $i_2$  и  $p_A$  при заданном напряжении на выводах ( $u$ ) можно определить  $p_R$  и соответственно ток в обмотке статора  $i_1$ . Величину  $x_{di}$  для каждого данного напряжения на выводах определяют так же, как и при графическом решении.

#### Литература

- Г. Н. Петров. Влияние насыщения на угловые характеристики синхронной машины. Электричество, № 4, 1945.
- В. Т. Касьянов. Определение изменений напряжения синхронного генератора. Электричество, № 10, 1947.
- Н. А. Поляк. Нормальные режимы работы турбогенераторов. Госэнергоиздат, стр. 47—50, 1948.
- Е. Г. Комар и М. Л. Брицын. Турбогенераторы серии Т-2 завода «Электросила». Технический справочник Лениздат, 1945.
- Б. М. Горнштейн. Статические характеристики потребителей. Эл. станции, № 5—6, 1940.

# Влияние переходных электромагнитных процессов на динамику пуска короткозамкнутого двигателя

Кандидат техн. наук, доц. Л. И. СТОЛОВ

Казанский авиационный институт

Процесс включения короткозамкнутого асинхронного двигателя сопровождается появлением свободных токов, протекающих по обмоткам статора и ротора.

Примем приведенные активные сопротивления статорной и роторной обмоток, а также соответствующие индуктивности, одинаковыми и равными  $r$  и  $L$ ; тогда приведенные мгновенные значения свободных токов  $i_{1c}$  в статоре и  $i_{2c}$  в роторе, сопровождающих процесс включения короткозамкнутого двигателя при неподвижном роторе, могут быть найдены из уравнений

$$i_{1c} = -\frac{i_{1n}}{2} e^{-\frac{r}{L+M}t} - i_{1n} e^{-\frac{r}{L-M}t}, \quad (1)$$

$$i_{2c} = -\frac{i_{1n}}{2} e^{-\frac{r}{L+M}t} + i_{1n} e^{-\frac{r}{L-M}t}, \quad (2)$$

тогда  $i_{1n}$  — мгновенное значение принужденного намагничивающего тока в одной из фаз статора;

$i_{1n}$  — соответствующее мгновенное значение принужденного тока короткого замыкания в этой фазе;

$M$  — взаимоиндуктивность между статором и ротором;

$t$  — время.

Вторые члены правых частей уравнений (1) и (2), определяющиеся магнитными потоками рассеяния и имеющие различные знаки в статоре и роторе, затухают столь быстро, что влиянием их на динамику пуска большей частью можно пренебречь. Поэтому вначале учитываются только первые члены, определяющиеся, главным образом, магнитным потоком взаимоиндукции, которые имеют одинаковые знаки в статоре и роторе и затухают сравнительно медленно с постоянной времени  $\frac{L+M}{r}$ , почти вдвое превышающей постоянную времени одной из обмоток. Токи  $i_{1c}$  и  $i_{2c}$  обусловлены и поддерживаются затухающими свободными магнитными потоками  $\Phi_{1c}$  и  $\Phi_{2c}$ , сцепленными с этими токами и совместно дополняющими до нуля принужденный поток двигателя  $\Phi$  при  $t=0$ .

Как только ротор двигателя придет во вращение, поток  $\Phi_{2c}$ , сцепленный с роторной обмоткой, начнет увлекаться ротором, стремясь вращаться с его скоростью. При этом  $\Phi_{2c}$  будет пересекать статорную обмотку, замкнутую на коротко через сеть, и индуктировать в ней затухающий переменный ток. Этот ток в свою

очередь создаст вращающийся в сторону вращения ротора свободный поперечный поток статора, неподвижный относительно  $\Phi_{2c}$  и стремящийся затормозить его вращение. Вследствие этого поток  $\Phi_{2c}$  начнет скользить относительно ротора, снизив свою абсолютную скорость. Соответственно снизится и скорость вращения свободного поперечного потока статора и появится свободный поперечный поток ротора. В результате по статору будет протекать затухающий переменный ток угловой частоты  $p$ , а по ротору — затухающий переменный ток угловой частоты  $q$  [Л.1]. При этом в статоре будет создаваться поперечный поток  $\Phi''_{1cn}$ , а в роторе — поперечный поток  $\Phi''_{2cn}$ . Потоки  $\Phi_{2c}$ ,  $\Phi''_{1cn}$  и  $\Phi''_{2cn}$  — неподвижны друг относительно друга. Как указано ниже, при  $t=0$  потоки  $\Phi''_{1cn}$  и  $\Phi''_{2cn}$  направлены в воздушном зазоре встречно и взаимно компенсируются; при  $t>0$  потоки  $\Phi''_{1cn}$  и  $\Phi''_{2cn}$  совместно оказывают лишь размагничивающее действие на  $\Phi_{2c}$ , ускоряя его затухание.

Аналогично предыдущему, как только ротор придет во вращение, поток  $\Phi_{1c}$ , сцепленный со статорной обмоткой, обусловит протекание по статору затухающего переменного тока угловой частоты  $q$ , а по ротору — затухающего переменного тока угловой частоты  $p$ . В статоре будет создаваться поперечный поток  $\Phi'_{1cn}$ , в роторе — поперечный поток  $\Phi'_{2cn}$ . Потоки  $\Phi_{1c}$ ,  $\Phi'_{1cn}$  и  $\Phi'_{2cn}$  неподвижны друг относительно друга. Как указано ниже, при  $t=0$   $\Phi'_{1cn}$  и  $\Phi'_{2cn}$  направлены в воздушном зазоре встречно и взаимно компенсируются; при  $t>0$  потоки  $\Phi'_{1cn}$  и  $\Phi'_{2cn}$  совместно оказывают лишь размагничивающее действие на  $\Phi_{1c}$ , ускоряя его затухание.

Если электрическая угловая скорость вращения ротора не превзошла критического значения  $\omega_k = \frac{2r}{\tau L} \sqrt{1-\tau}$ , где полный коэффициент рассеяния  $\tau = \frac{2(L-M)}{M}$ , то потоки  $\Phi_{1c}$  и  $\Phi_{2c}$  располагаются коаксиально и, не расщепляясь, вращаются с одинаковой угловой скоростью  $p=q=\frac{\omega}{2}$ . Тогда соответственно можно рассматривать общие свободные поперечные потоки статора  $\Phi_{1cn} = \Phi'_{1cn} + \Phi''_{1cn}$  и ротора  $\Phi_{2cn} = \Phi'_{2cn} + \Phi''_{2cn}$ , вращающиеся с той же угловой скоростью  $\frac{\omega}{2}$ . При этом в роторе будут иметь место: система принужденных токов  $i_2$ , обусловленная вращением результирующего принужденного потока  $\Phi$  относительно ротора, система свободных токов  $i_{2c}$ , обусловленная затуханием нерасщепленного свободного потока  $\Phi_c = \Phi_{1c} + \Phi_{2c}$ , и система свободных поперечных токов  $i_{2cn}$ , обусловленная вращением потока  $\Phi_c$  относительно ротора. С этими системами токов взаимодействуют: принужденный поток  $\Phi$ , обусловленный совместным действием статорных и роторных принужденных токов, и свободный поток  $\Phi_c = \Phi_{1c} + \Phi_{2c}$ .

На рис. 1 приведена диаграмма потоков и приведенных э. д. с. и токов в системе координат, вращающейся против часовой стрелки вместе с  $\Phi_c$ . Векторы попереч-

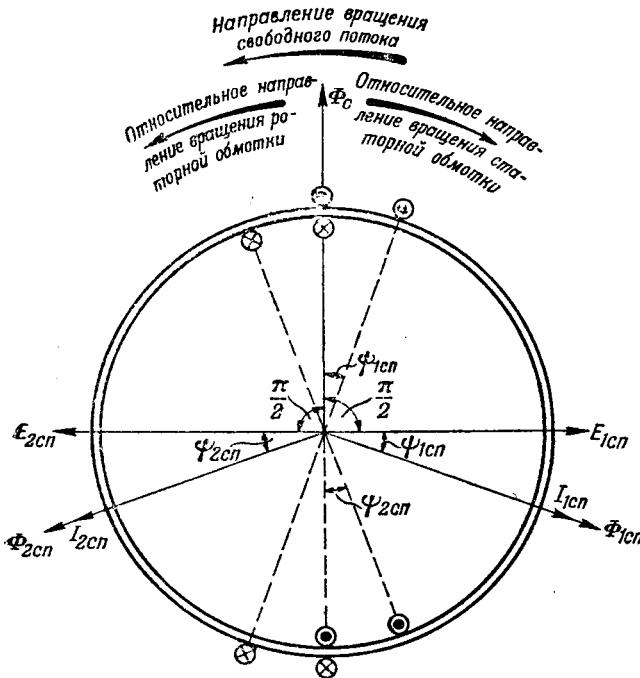


Рис. 1.

ных токов статора  $I_{1cn}$  и ротора  $I_{2cn}$  и векторы соответствующих потоков  $\Phi_{1cn}$  и  $\Phi_{2cn}$  сдвинуты в направлении относительного движения соответствующих обмоток, определяя соответствующие э. д. с.  $E_{1cn}$  и  $E_{2cn}$  на углы  $\psi_{1cn}$  и  $\psi_{2cn}$ . Так как направления относительного движения статора и ротора по отношению к  $\Phi_c$  противоположны, то  $E_{1cn}$  и  $E_{2cn}$  имеют противоположные направления. Как видно из рис. 1, при  $t=0$ , когда токи  $I_{1cn}$  и  $I_{2cn}$  встречаются лишь активные сопротивления, соответствующие потоки  $\Phi_{1cn}$  и  $\Phi_{2cn}$  взаимно компенсируются, и результирующий поток  $\Phi_c$  лишь дополняет поток  $\Phi$  до нуля. Компенсация потоков, обусловленных токами  $I_{1cn}$  и  $I_{2cn}$ , не будет распространяться на соответствующие потоки рассеяния, замыкающиеся, главным образом, вокруг лобовых частей обмоток, однако эти потоки не окажут влияния на величину переходного момента при пуске привода. При  $t > 0$  можно считать, что  $\psi_{1cn} = \psi_{2cn}$ . Тогда влияние потоков  $\Phi_{1cn}$  и  $\Phi_{2cn}$  на переходные электромагнитные процессы проявится лишь в том, что эти потоки, не обуславливая появления самостоятельных переходных моментов, совместно будут размагничивать  $\Phi_c$ , уменьшая продолжительность его затухания по сравнению с условиями, когда  $\omega = 0$ . В результате  $\Phi_c$  будет затухать с постоянной времени  $T$ , обратная величина которой [Л. 1]

$$\frac{1}{T} = \frac{r}{\tau L} - \frac{1}{2} \sqrt{\omega_k^2 - \omega^2}. \quad (3)$$

Из рассмотрения уравнения (3) можно установить, что в процессе пуска имеет место резкое уменьшение  $T$  от  $T_1 = \frac{L+M}{r}$  при  $\omega=0$ , до  $T_2 = \frac{2(L-M)}{r}$  при  $\omega=\omega_k$ .

Если считать, что при  $t=0$   $\cos \phi = 0,4$  и что  $\tau = 0,1$ , то  $\omega_k = 124 \text{ sec}^{-1}$ ,  $T_1 = 0,3 \text{ sec}$  и  $T_2 = 0,015 \text{ sec}$ . Отсюда очевидно, что при  $\omega > \omega_k$  (когда поток  $\Phi_c$  расщепляется на компоненты, врачающиеся с различными скоростями) можно пренебречь влиянием переходных электромагнитных процессов на динамику пуска в связи с резким уменьшением  $T$ .

Число взаимодействий между системами токов  $i_2$ ,  $i_{2cn}$  и  $i_{1cn}$  и потоками  $\Phi$  и  $\Phi_c$  равно шести.

Момент взаимодействия системы токов  $i_2$  с потоком  $\Phi$  определяет механическую характеристику двигателя  $M_1 = f(\omega)$ . Переходный момент взаимодействия  $M_2$  системы токов  $i_2$  с потоком  $\Phi_c$  можно определить, исходя из следующего. Систему токов  $i_2$  можно рассматривать, как вращающуюся с угловой синхронной скоростью  $\omega_c$  систему

му эквивалентных постоянных токов, величины которых синусоидально меняются по окружности ротора, амплитуда в  $\sqrt{2}$  превышает эффективное значение  $I_2$  роторного принужденного тока, а положение в пространстве определяется отставанием амплитуды этой системы токов от оси потока  $\Phi$  на угол  $\phi_2$  между векторами принужденных роторных э. д. с. и тока. Тогда после ряда преобразований можно получить:

$$M_2 = - \frac{M_{10}}{\cos \phi_{20}} \frac{I_2}{I_{20}} e^{-\frac{t}{T}} \cos \left[ \psi_2 - \left( \omega_c - \frac{\omega}{2} \right) t \right]. \quad (4)$$

Часто представляется возможным принять  $\frac{I_2}{I_{20}} = 1$  и

$\cos \phi_2 = \cos \phi_{20}$ . Взаимодействие системы токов  $i_{2cn}$  с потоком  $\Phi_c$  влечет за собой возникновение тормозного переходного момента  $M_3$ . Зависимость  $M_3$  от  $\omega$  по своей форме определяется зеркальным изображением относительно оси ординат характеристики  $M_1 = f(\omega)$ , так как возникновение системы токов  $i_{2cn}$  обусловлено относительным движением потока  $\Phi_c$  по отношению к ротору, причем при  $t=0$  соответствующая скорость равна нулю. Однако, параметры уравнения  $M_1 = f(\omega)$  должны быть при этом приняты с учетом того, что при  $\omega < \omega_k$  эта относительная скорость равна  $\frac{\omega}{2}$  и что отношение максимальных ординат  $M_1$  к  $M_3$  составляет около 4. Тогда после ряда преобразований можно получить:

$$M_3 = - \frac{M_{1m}}{\frac{\omega}{\omega_c s_m} + \frac{4 \omega_c s_m}{\omega}} e^{-\frac{2t}{T}}. \quad (5)$$

Если продолжительность пуска привода  $t_n > 0,5 \text{ sec.}$ , то большей частью можно считать, что средняя за время  $t_n$  величина  $M_3$  не превышает  $0,05 \dots 0,10$  от  $M_{1m}$ . Переходный момент  $M_4$ , определяемый взаимодействием системы токов  $i_{2cn}$  с потоком  $\Phi$ , может быть найден с помощью рассуждений, аналогичных тем, которые проводились при определении момента  $M_3$ . Тогда

$$M_4 = \frac{M_{1m}}{\left( \frac{\omega}{\omega_c s_m} + \frac{4 \omega_c s_m}{\omega} \right) \cos \psi_{2cn}} \times \times \frac{\Phi}{\Phi_0} e^{-\frac{t}{T}} \cos \left[ \psi_{2cn} - \left( \omega_c - \frac{\omega}{2} \right) t \right]. \quad (6)$$

Часто представляется возможным (в диапазоне изменений  $\omega$  от 0 до  $\omega_k$ ) принимать  $\cos \psi_{2cn} = 1$ .

Взаимодействие системы токов  $i_{2c}$ , дополняющих при  $t=0$  до нуля половину намагничивающего тока двигателя, с потоками  $\Phi$  и  $\Phi_c$  весьма малы по сравнению с рассмотренными выше и в дальнейшем не учитываются.

Перейдем к рассмотрению переходных моментов, обусловленных вторыми членами правых частей уравнений (1) и (2).

Взаимодействие быстрозатухающего свободного роторного тока, определяемого полями рассеяния и дополняющего до нуля начальное значение принужденного роторного тока, с потоком  $\Phi_c$  может быть определено уравнением

$$M_5 = M_{10} e^{-\frac{t}{T'}}, \quad (7)$$

а с потоком  $\Phi$

$$M_6 = - \frac{M_{10}}{\cos \phi_{20}} e^{-\frac{t}{T'}} \cos (\phi_{20} + \omega_c t), \quad (8)$$

где  $T'$  — постоянная времени потоков рассеяния. При этом учитывалось, что при  $t=0$  значение  $M_5$  равно  $M_{10}$  и значение  $M_6$  равно  $M_{10}$ . Произведенные подсчеты показывают, что в связи с весьма быстрым затуханием свободного роторного тока, определяемого полями рассеяния, изменение положения ротора, затухание  $\Phi_c$  и изменение величин  $T'$  и  $\cos \phi_2$  против их начальных значений при  $t=0$  в выражениях для  $M_5$  и  $M_6$  могут не учитываться, что и имелось в виду при составлении (7) и (8).

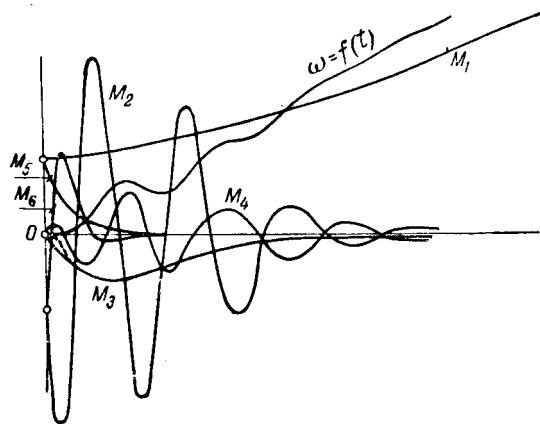


Рис. 2.

При  $t=0$  значение  $T'$  в  $\frac{L+M}{L-M}$  раз меньше соответствующего значения  $T$ . По истечении первого полупериода моменты, определяемые (7) и (8), почти полностью затухают.

Исследуем влияние переходных моментов на динамику пускового процесса. Пользуясь методами численного интегрирования, можно из уравнения

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{4g}{GD^2} \sum_{n=1}^{n=6} M_n$$

найти<sup>1</sup> зависимость  $\omega$  от  $t$ . Однако, ввиду громоздкости этого метода можно исходить из следующего. Как показывают подсчеты, несмотря на значительную величину амплитуды момента  $M_2$ , он вследствие большой частоты пульсаций оказывает незначительное влияние на характер кривой  $\omega = f(t)$ . Учитывая это обстоятельство, наличие

прямой зависимости между  $\omega$  и  $\frac{1}{T}$ , а также структуру уравнений (3) и (4), можно с некоторым приближением вводить в уравнения (3) и (4) и аналогично в (5) и (6) величину  $\omega = f(t)$ , определенную обычными способами, исходя лишь из рассмотрения механических характеристик двигателя  $M_1 = f(\omega)$  и исполнительного механизма. В некоторых случаях можно принимать  $\omega = \omega_c \frac{t}{t_n}$ . На рис. 2

приведены примерные зависимости переходных моментов от  $t$ , построенные в соответствии с указанным для  $\cos \phi_2 = 0,4$ ,  $\tau = 0,1$ ,  $t_n = 0,2$  сек. Пользуясь методами последовательного приближения, можно в случае необходимости внести уточнения в начальные участки кривых  $M_3$  (пунктир на рис. 2) и  $M_4$ , что, в частности, и учтено при построении  $\omega = f(t)$  на рис. 2. Для других участков и для остальных кривых моментов отклонения большей частью не выходят за пределы точности построения.

<sup>1</sup> При пуске под нагрузкой необходимо также учитывать статический момент  $M_c$  исполнительного механизма.

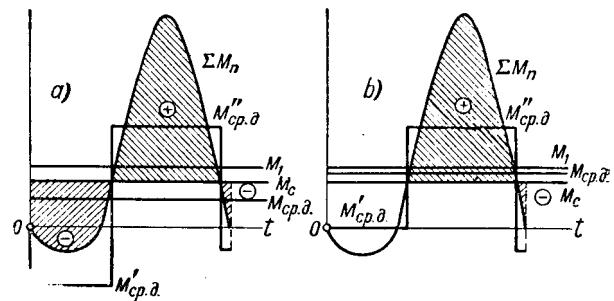


Рис. 3.

Следует отметить, что наличие и величины отрицательных значений динамического момента  $M_\delta$  в начальной стадии первого полупериода зависят от  $\frac{r_1}{r_2}$ , от величины и положения потока остаточного магнетизма, от  $\cos \phi_2$  и от наличия положительного активного компонента статического момента исполнительного механизма.

Исследуем влияние пульсации переходных моментов на динамику пуска.

На рис. 3 приведены кривые  $M_1 = f(t) = \text{const}$ ,  $\Sigma M_n = f(t)$  и механическая характеристика исполнительного механизма  $M_c = f(t) = \text{const}$ , а также средние за начальный период значения пускового динамического момента  $M_{cp\delta}$  для случаев, когда  $M_c$  активен (3a) и реактивен (3b).

**Выводы.** При пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя появляются пульсирующие переходные моменты  $M_2$  и  $M_4$  и тормозной переходный момент  $M_3$ , определяемые уравнениями (4), (5) и (6). В связи с резким уменьшением потока  $\Phi_c$  за счет размагничивающего действия геометрической суммы потоков  $\Phi_{1cn}$  и  $\Phi_{2cn}$  переходные моменты оказывают влияние на динамику пускового процесса лишь в пределах от  $\omega = 0$  до  $\omega = \omega_k$ . Начальное значение момента  $M_3$  равно нулю. Среднее значение его на протяжении  $t_n$  составляет не более, чем 0,05...0,1 от максимальной ординаты кривой  $M_1 = f(\omega)$ . Наличие момента  $M_2$ , не отражаясь на  $t_n$ , облегчает условия преодоления двигателем увеличенного момента трения покоя исполнительного механизма. Влияние переходных моментов  $M_5$  и  $M_6$ , определяемых рассеянием, на динамику пускового процесса весьма незначительно.

#### Литература

1. Бирман С. Сверхтоки в установках высокого напряжения.

2. Wahl, Kilgore. El. Eng., Nov. 1940.

# Продолжительность нарастания магнитного потока в цепях со сталью

Кандидат техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

При решении многих задач из области нестационарных процессов часто возникает необходимость в определении продолжительности нарастания магнитного потока или возбуждения в цепях, содержащих сталь. Обычно для этой цели пользуются графоаналитическим способом, предложенным Р. Рюденбергом [Л. 1]. Иногда для решения этой же задачи применяется способ, основанный на спрямлении по отдельным участкам кривой намагничивания [Л. 2]. Такой способ расчета не является в полной мере аналитическим, и его правильнее было бы назвать также графоаналитическим, поскольку здесь требуется известная графическая обработка заданной кривой намагничивания (выбор участков на кривой, определение ординат и абсцисс в точках пересечения прямых). Кроме того, в этом расчете используются относительные величины (тока возбуждения, потока), в качестве базы которых выбраны номинальные величины.

При решении рассматриваемой задачи более целесообразно относить величины тока возбуждения и потока к их максимальным или «потолочным» значениям. Это позволит, с одной стороны, основываться на более реальных физических величинах, чем номинальные, которые являются для данной магнитной цепи условными непостоянными величинами. С другой стороны, это упростит применяемые в расчете коэффициенты.

Если исходить из указанных предпосылок, то можно пользоваться следующим графоаналитическим способом определения продолжительности возбуждения, по нашему мнению, более удобным, чем способ Рюденберга. Основное дифференциальное уравнение для контура возбуждения

$$U = w \frac{d\Phi}{dt} + RI \quad (1)$$

приводим к виду

$$dt = \frac{w d\Phi}{U - RI} = \frac{w \Phi_m}{U} \cdot \frac{\frac{d\Phi}{\Phi_m}}{1 - \frac{I}{I_m}} = T \frac{d\varphi}{1 - i}, \quad (2)$$

откуда

$$\frac{t}{T} = \tau = \int \frac{d\varphi}{1 - i}. \quad (3)$$

Здесь индекс  $m$  относится к максимальным, предельным значениям, причем  $I_m = \frac{U}{R}$ . Кроме того, введены относительные величины

$$i = \frac{I}{I_m}, \quad \varphi = \frac{\Phi}{\Phi_m}, \quad \tau = \frac{t}{T},$$

где  $T$  обозначает постоянную времени насыщенного контура, равную, как известно,

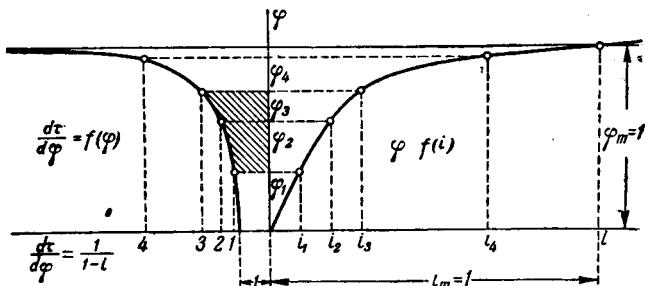
$$T = \frac{w \Phi_m}{U} \text{ sec.} \quad (4)$$

Эта постоянная в отличие от постоянной для ненасыщенного магнитного контура зависит от величины прило-

женного напряжения  $U$  и от величины максимального потока в стали  $\Phi_m$ . Чтобы найти относительное время процесса  $\tau$  или интеграл (3) графоаналитическим путем, преобразовываем равенство (2) к виду

$$\frac{d\tau}{d\varphi} = \frac{1}{1 - i} = \frac{1}{1 - f(\varphi)}, \quad (5)$$

где  $f(\varphi)$  означает графически заданную зависимость потока  $\varphi$  от  $i$  или, вернее, обратную зависимость тока  $i$  от потока  $\varphi$ .



Эту зависимость выражаем по масштабу относительных единиц (рис. 1) и ось абсцисс продолжим влево, нанеся на нее масштаб для отношений  $(\varphi)$ . После этого строим кривую в левом квадранте по равенству (5) в координатах  $(\varphi \cdot \frac{d\tau}{d\varphi})$ , т. е. проводя для нескольких значений ор-

динат  $\varphi$  соответствующие им абсциссы  $\frac{1}{1-i}$ , где  $i$  отсчитывается в правом квадранте соответственно величине  $\varphi$ . Очевидно, что начальное значение (при отсутствии остаточного магнетизма) для ординаты  $\varphi = 0$

$$\left( \frac{d\tau}{d\varphi} \right)_{\varphi=0} = \left( \frac{1}{1-i} \right)_{\varphi=0} = 1.$$

Интересующая нас величина времени  $\tau$ , как интеграл (3), получается, очевидно, как площадь, ограниченная построенной кривой и осью ординат  $\varphi$ .

Изложенный способ нагляден, а также дает возможность находить продолжительности возбуждения в любых пределах, т. е. для нарастания потока не только от нуля до  $\varphi_m = 1$ , но и в промежуточных пределах, например, от  $\varphi_1$  до  $\varphi_2$ , что значительно осложняет подсчет при замене кривой намагничивания отрезками прямых. Кроме того, здесь можно пользоваться одной и той же кривой или одними и теми же результатами, когда вычисляется продолжительность возбуждения для одной и той же машины, но в разных условиях использования, например, при изменении номинального тока возбуждения, номинального напряжения или числа витков. В этом случае подлежит пропорциональному пересчету лишь постоянная времени  $T$ .

## Литература

- Ф. А. Горяинов. Время возбуждения регулекса-Электричество, № 12, 1946.
- Р. Рюденберг. Явления неустановившегося режима в электрических установках. ГИЗ, 1930.



# К теории асинхронного двигателя с дуговым или плоским статором

Доктор техн. наук, проф. Г. И. ШТУРМАН

Харьковский электротехнический институт

При практическом применении асинхронных двигателей с дуговыми или плоскими статорами неизбежно сталкиваются с вопросами оценки специфических свойств этого необычного исполнения электрических машин. Для решения подобного рода задач необходимо иметь достаточно обоснованные представления об электромагнитных процессах, определяющих явления «краевого эффекта». Последние, как известно, влекут за собой образование в машине дополнительных потерь и общее снижение ее технико-экономических показателей. Однако, эти отрицательные факторы требуют сопоставления с возможностями сращивания рассматриваемых типов асинхронных двигателей с производственными механизмами. Агрегаты в целом при отсутствии промежуточных кинематических звеньев могут оказаться обладающими относительно высокими показателями. Общая конструктивная компактность механизмов, простота их изготовления, снижение первоначальной стоимости при высокой эксплуатационной надежности могут дать достаточно оснований для применения в конкретных случаях тех или иных модификаций индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом.

Результаты проводившихся до сего времени исследований привели к появлению различных взглядов на характер и величину дополнительных потерь в асинхронных двигателях с дуговыми или плоскими статорами. В одной из работ автора было указано, что [Л. 1] причины снижения технико-экономических показателей приписывались: 1) процессам выхода контуров вторичной цепи из сферы воздействия активной зоны машины [Л. 2]; 2) процессам входа контуров вторичной цепи в область активной зоны [Л. 3]; 3) возникновению дополнительных полей, обусловленных магнитным шунтированием воздушного зазора машины [Л. 4].

Кроме того, существовало мнение, что размыкание магнитной цепи отражается только на искажении симметрии намагничивающих токов отдельных фаз [Л. 5].

Обобщенное рассмотрение указанных вопросов привело к формулировке основных положений теории индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом [Л. 1, 6]. Решение ряда конкретных задач позволило получить для определенных условий количественную оценку последствий размыкания магнитной цепи нормальной асинхронной машины. При этих условиях установлены аналитические соотношения, характеризующие процессы индуктирования дополнительных э. д. с. во вторичных контурах, возникновения в них дополнительных токов и соответствующих изменений в образовании электромагнитных усилий и потерь на нагрев

[Л. 7, 8]. Решение перечисленных задач ограничивалось рассмотрением явлений, локализующихся в активной зоне машины. Однако, полученные результаты позволяют перейти к принципиальной оценке некоторых процессов, возникающих вне области расположения первичных цепей. Наиболее интересным в этом отношении является характер распределения токов во вторичных контурах машины, вышедших из активной зоны.

Термином «концевые потери» определяются в дальнейшем потери на нагрев той части вторичных цепей, которая в любой момент времени расположена вне области развернутого в дугу или плоскость статора, т. е. вне активной зоны.

Электромагнитные процессы рассматривались ранее [Л. 6, 7] в условиях отсутствия насыщения и наличия во вторичных цепях замкнутых и равномерно распределенных контуров и отсутствия магнитной проводимости среды, окружающей стальные части машины. При этом «концевые потери» в режимах короткого замыкания, т. е. при неподвижных вторичных контурах [Л. 7], оказались зависящими от явлений шунтирования воздушного зазора машины. При отсутствии конструктивных предпосылок к подобного рода «шунтированию» токи во вторичных контурах, расположенных у краев активной зоны, равны нулю. В равной мере отсутствуют токи, а следовательно, и концевые потери, во вторичных цепях, расположенных вне активной зоны.

Иной результат дало решение комплексной задачи, связанной с одновременным учетом своеобразия магнитной системы и переходных процессов во вторичных цепях [Л. 7]. При этом контуры, движущиеся с постоянной скоростью ( $v = \text{const}$ ), полагались обладающими сопротивлениями  $r$  и индуктивностью  $L$ . Распределение токовых нагрузок в области воздушного зазора в силу наличия индуктивности  $L$  характеризовалось нулевыми значениями у входа в сферу воздействия статора.

В этих условиях «концевые потери» возможны только во вторичных контурах, покидающих в процессе своего движения активную зону машины. Предпосылка об отсутствии магнитной проводимости среды, окружающей стальные ча-

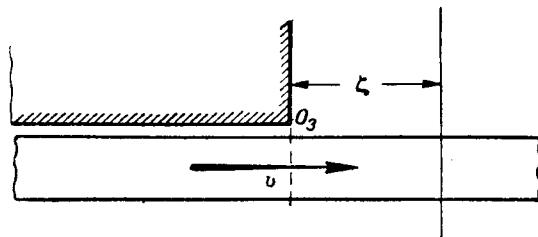


Рис. 1.

сти машины, исключает явления взаимоиндукции между рассматриваемыми контурами и другими электрическими цепями. Тогда процесс исчезновения тока во времени для каждого из замкнутых контуров определяется известным законом убывания по экспоненциальней кривой. Общая для всех экспонент постоянная  $T$  задана отношением  $\frac{L}{r}^1$ .

Учет характера перемещения контуров с убывающими токами должен привести к общей закономерности пространственного и временного распределения токовых нагрузок во вторичных цепях, расположенных вне активной зоны машины.

Можно показать, что изменение во времени ( $t$ ) токовых нагрузок для сбегающего края активной зоны характеризуется синусоидальной кривой

$$i_{\kappa} = I_{\kappa} \sin(\omega t - \varphi_{\kappa}), \quad (1)$$

где  $\omega$  соответствует круговой частоте первичной цепи. При постоянстве скорости перемещения подвижной части машины расстояние  $\zeta$  в осях координат  $O_3$  (рис. 1) однозначно определяет время, прошедшее с момента выхода соответствующего контура из активной зоны:

$$t_1 = \frac{\zeta}{v}. \quad (2)$$

Тогда искомая зависимость токовых нагрузок от времени может быть представлена выражением

$$i_{2\kappa} = \varphi(\zeta, t) = I_{\kappa} e^{-\frac{\zeta}{vT}} \sin \left[ \omega \left( t - \frac{\zeta}{v} \right) - \varphi_{\kappa} \right]. \quad (3)$$

Среднеквадратичное значение для каждой точки в неподвижной системе координат  $\zeta$  равно:

$$i_{2\kappa}^2 = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} i_{2\kappa}^2 dt = \frac{I_{\kappa}^2}{2} e^{-\frac{2\zeta}{vT}}. \quad (4)$$

В рассматриваемом случае при бесконечно большой длине подвижной части машины и  $v = \text{const}$  „концевые потери“ определяются соотношением:

$$W_{\kappa} = \int_0^{\infty} i_{2\kappa}^2 r d\zeta = \frac{I_{\kappa}^2 r T}{2} \frac{v}{2} = \frac{I_{\kappa}^2 x}{4} \frac{\tau}{\pi} (1-s) [\text{W/cm}]. \quad (5)$$

<sup>1</sup> Имеется в виду конструктивное оформление вторичных цепей, при котором индуктивность рассеяния не претерпевает существенных изменений при выходе соответствующих контуров из активной зоны. В противном случае подлежит учету процесс резкого изменения величины  $L$ .

Таким образом, „концевые потери“ оказались, естественно, независящими от омических сопротивлений  $r$ . Величина этого вида дополнительных потерь в машинах с разомкнутым магнитопроводом характеризуется реактивным сопротивлением рассеяния вторичных цепей  $x = \omega L$ . Выражение (5) может быть получено и непосредственно из величины энергии полей рассеяния каждого из вторичных контуров, покидающих активную зону машины.

Следует отметить, что дополнительные потери на нагрев во вторичных цепях, расположенных в области воздействия статора, оказывались обычно зависящими от общей длины активной зоны  $2p\tau$  [Л. 7 и 8]. В то же время «концевые потери» (5) при прочих равных условиях могут быть существенно снижены за счет изменения полюсного деления  $\tau$ . Рассмотренный случай бесконечно большой длины подвижной части машины может практически соответствовать определенным значениям оборотов безредукторного привода. Диапазон скоростей зависит от постоянной времени  $T$  и отношения длины дугового статора к окружности ротора. При наличии же нескольких статоров при одном роторе или относительно больших  $v$  токи в контурах, покинувших активную зону, могут и не исчезнуть к моменту повторного входа этих же контуров в область воздушного зазора. В этом случае, естественно, теряет силу одно из условий определения вторичных токов активной зоны, заключавшееся в равенстве нулю токовых нагрузок у входного конца. Задача определения величины вторичных токов под набегающим краем статора может быть разрешена в результате совместного рассмотрения процессов во вторичных цепях, находящихся внутри и вне активной зоны машины.

Аналогичное положение должно встречаться также и в анализе режимов индукционных двигателей с развернутыми в плоскость статорами при поступательно-возвратных перемещениях подвижной части машины.

Во всех подобных случаях соотношения типа (3) должны приводить к необходимым уточнениям расчетных величин.

#### Литература

- Г. И. Штурман. Сборник научно-технических статей ХЭТИ, № 7, 1947.
- Тромбетта J. AIEE, апрель 1922.
- П. А. Фридкин. Электричество, № 7-8, 1937 и др.
- Б. Д. Садовский. Вестник электропромышленности, № 8, 1940.
- П. С. Япольский. Электричество, № 11, 1925; Eng., август 1926.
- Г. И. Штурман. Электричество, № 10, 1946.
- Г. И. Штурман и Р. Л. Аронов. Электричество, № 2, 1947.



# Емкость и сопротивление растеканию тока в случае сферических и цилиндрических электродов в однородной среде

Кандидат техн. наук А. П. БЕЛЯКОВ

Научно-исследовательский институт Министерства электропромышленности СССР

В лабораторной и эксплоатационной практике применяются различные сочетания из сферических и цилиндрических электродов, отличающиеся друг от друга количеством, относительным расположением и положением в среде. Учитывая связь между соотношениями, характеризующими работу электродов в электростатическом и электростационарном полях [Л. 1, 2], легко произвести обобщение расчетных формул для определения емкости и сопротивлений растеканию электродов в однородной среде путем введения коэффициента расположения  $P$ .

Величина емкости между электродами в электростатическом поле может быть выражена формулой

$$C = \frac{\epsilon}{9 \cdot 10^9 \cdot P} F, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды;  $P$  — коэффициент расположения в  $\text{см}^{-1}$ .

Сопротивление растеканию тока между электродами в электростационарном поле может быть определено из соотношения

$$R = \frac{\rho}{4\pi} \cdot P \Omega, \quad (2)$$

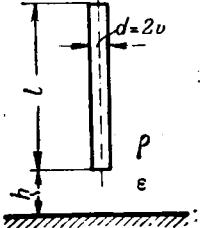
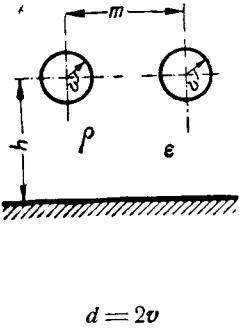
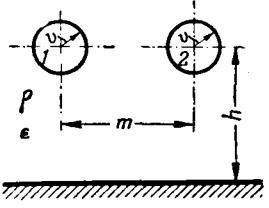
где

$\rho$  — удельное объемное сопротивление среды между электродами в  $\Omega \cdot \text{см}$ ;

$P$ , как и ранее, — коэффициент расположения в  $\text{см}^{-1}$ .

Коэффициенты расположения  $P$  к расчету емкости ( $C = \frac{\epsilon}{9 \cdot 10^9 \cdot P}$  Фарад) и сопротивления растеканию тока ( $R = \frac{\rho}{4\pi} \cdot P \Omega$ ) некоторых разновидностей сферических и цилиндрических электродов, расположенных в однородной среде

№ по пор.	Наименование	Рисунок	Коэффициент расположения $P$	Условия применимости формул
1	Два сферических электрода разных радиусов и полярностей около хорошо проводящей плоскости		$a) P = \left[ \frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} - \frac{1}{2t_1} - \frac{1}{2t_2} - \frac{2}{\sqrt{m^2 + (t_2 - t_1)^2}} + \frac{2}{\sqrt{m^2 + (t_1 + t_2)^2}} \right]$	$m > 2(v_1 + v_2);$ $t_1 > 2v_1;$ $t_2 > 2v_2$
2	Два сферических электрода разных радиусов одинаковой полярности около хорошо проводящей плоскости		$b) P = \left[ \frac{R_2 - T_2 - B(M - \Pi)}{1 - B} \right],$ <p>где</p> $B = \frac{M - \Pi - R_2 + T_2}{R_1 - T_1 - M + \Pi}; \quad M = \frac{1}{\sqrt{m^2 + (t_2 - t_1)^2}};$ $\Pi = \frac{1}{\sqrt{m^2 + (t_1 + t_2)^2}}; \quad R_1 = \frac{1}{v_1}; \quad R_2 = \frac{1}{v_2};$ $T_1 = \frac{1}{2t_1}; \quad T_2 = \frac{1}{2t_2}$	Cм. позицию 1

№ п/п	Наименование	Рисунок	Коэффициент расположения $P$	Условия применимости формул
3	Цилиндрический электрод около хорошо проводящей плоскости, при расположении электрода относительно плоскости под прямым углом		a) $P = \left[ \frac{1}{l} \ln \left\{ \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{l}{d} \right)^2} + \frac{l}{d} \right] \times \frac{[V(l+4h)^2 + d^2 - l]}{[V(l+4h)^2 + d^2 + l]} \right\} \right]$ b) $P = \left[ \frac{2}{l} \ln \left\{ \sqrt{\left( \frac{2h}{v} \right)^2 + \frac{2lh}{v^2} + 1} \right\} \right]$ c) $P = \left[ \frac{2}{l} \ln \left( \frac{l}{v} \right) \right]$	$l > d$ $\frac{l}{d} \gg 1$ $\frac{l}{h} \gg 1$ $\frac{l}{d} \gg 1; h = \infty$
4	Два параллельных цилиндрических электрода одинаковых радиусов одной полярности около хорошо проводящей плоскости		a) $P = \left[ \frac{1}{l} (\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4) \right],$ где $\gamma_1 = \operatorname{Arsh} \left( \frac{l}{d} \right)$ ; $\gamma_2 = \operatorname{Arsh} \left( \frac{l}{2m} \right)$ ; $\gamma_3 = \operatorname{Arsh} \left( \frac{l}{4h} \right)$ ; $\gamma_4 = \operatorname{Arsh} \left( \frac{l}{2\sqrt{m^2 + 4h^2}} \right)$ b) $P = \left[ \frac{1}{l} \ln \left\{ \frac{2h}{v} \sqrt{1 + \left( \frac{2h}{m} \right)^2} \right\} \right]$	$l > d$ $m > 2d$ $h > 2d$ $\frac{l}{d} \gg 1; \frac{l}{2m} \gg 1$ $\frac{l}{4h} \gg 1$ $\frac{l}{2\sqrt{m^2 + 4h^2}} \gg 1$ $m > 2d; h > 2d$
5	Два параллельных цилиндрических электрода одинаковых радиусов разных полярностей около хорошо проводящей плоскости		a) $P = \left[ \frac{4}{l} (\gamma_1 + \gamma_4 - \gamma_2 - \gamma_3) \right]$ значения $\gamma$ см. позицию 4 b) $P \approx \left[ \frac{4}{l} \ln \left\{ \frac{m}{v \sqrt{1 + \left( \frac{m}{2h} \right)^2}} \right\} \right]$ c) $P = \left[ \frac{4}{l} \ln \frac{m}{v} \right]$	$l > d; m > 2d; h > 2d$ $\frac{l}{d} \gg 1; \frac{l}{2m} \gg 1$ $\frac{l}{4h} \gg 1$ $\frac{l}{2\sqrt{m^2 + 4h^2}} \gg 1$ Кроме того $m \ll 2h$

П р и м е ч а н и я: 1. Размеры в см; 2.  $\ln e = 1$ ;  $\ln x = 2,302 \lg x$ ; 3.  $\operatorname{Arsh} x = \ln (x + \sqrt{x^2 + 1})$ .

ности расположены около хорошо проводящей плоскости, то эти электроды служат источниками, а емкость и сопротивление определяются между ними с учетом влияния близости плоскости. Во всех теоретических работах по выводу соотношений для расчета емкости или сопротивлений между электродами наиболее сложными являются случаи очень малых расстояний между электродами. Условия применимости формул указаны в таблице. Однако, бесспорно, что в случае соприкосновения двух металлических электродов разной полярности емкость между ними должна стать равной бесконечности и со-

ответственно сопротивление между электродами должно стать равным нулю (при идеальном контакте и при электродах бесконечной проводимости).

В большинстве случаев в таблице указаны приближенные расчетные формулы, так как вид точных соотношений довольно сложный.

#### Литература

1. А. А. Петровский. Специальный курс электричества. Госэнергоиздат, 1932.
2. К. А. Круг. Основы электротехники. Т. I. Госэнергоиздат, 1946.

# Мостовая схема в качестве счетно-решающего устройства

Кандидат техн. наук Е. И. ДМИТРИЕВ

Институт машиноведения Академии наук СССР

Известно, что в диагонали неуравновешенного моста при  $U = \text{const}$  (рис. 1) протекает ток  $I_g$ , величина которого определяется уравнением

$$I_g = U \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{R_g (R_1 + R_2) (R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_5 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}. \quad (1)$$

Если мост уравновешен, то  $I_g = 0$  и  $R_2 R_3 = R_1 R_4$  или

$$R_4 = R_2 \frac{R_3}{R_1}. \quad (2)$$

Заменяя обычные сопротивления функциональными<sup>1</sup>

$R_1 = R_0 f(x)$ ,  $R_2 = R_0 \varphi(x)$ ,  $R_3 = R_0 \psi(x)$  и  $R_4 = R_0 \sigma(x)$ , получим

$$\sigma(x) = \frac{\varphi(x) \cdot \psi(x)}{f(x)} \quad (3)$$

Сопротивление каждой ветви моста можно составить из нескольких последовательно соединенных сопротивлений, тогда (3) принимает вид:

$$\sigma(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i(x) \sum_{k=1}^m \psi_k(x)}{\sum_{l=1}^p f_l(x)} \quad (4)$$

Применяя различные способы включения и отсчетов сопротивлений, а также заменяя сопротивления проводимостями и т. д., можно получить вместо уравнений (3) и (4) большое разнообразие функциональных зависимостей, решаемых с помощью мостовой схемы [Л. 2].

Дальнейшее расширение области применения мостовой схемы производится путем многократного уравновешивания моста при введении в его плечи сопротивлений, выбираемых определенным образом по величине и включаемых в схему по определенному порядку (в определенной последовательности).

Рассмотрим применение мостовой схемы для вычисления полинома вида:

$$y_{\text{вых}} = \varphi_a(x) \cdot \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]^n + \varphi_b(x) \cdot \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]^{n-1} + \dots + \varphi_n(x) \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right] + \varphi_{n+1}(x). \quad (5)$$

Вычисление данного полинома производится серией измерений сопротивлений, включаемых в

определенной последовательности в схему моста, а именно:

1. Сопротивления  $R_1$  и  $R_3$  в схеме рис. 1 заменяют функциональными сопротивлениями  $f_1(x)$  и  $f_3(x)$ , которые в схеме рис. 2 остаются неизменными до конца работы. Сопротивление  $R_2$  заменяют функциональным сопротивлением  $\varphi_a(x)$ .

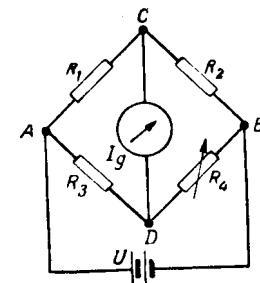


Рис. 1.

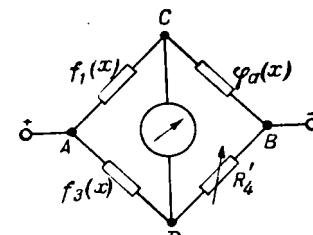


Рис. 2.

При  $I_g = 0$

$$R'_4 = \varphi_a(x) \cdot \frac{f_3(x)}{f_1(x)}. \quad (5a)$$

2. В плечо CB вместо  $\varphi_a(x)$  включают сопротивление равное  $[\varphi_b(x) + R'_4]$  и уравновешивают мост сопротивлением  $R''_4$  (рис. 3). При  $I_g = 0$

$$R''_4 = [R'_4 + \varphi_b(x)] \cdot \frac{f_3(x)}{f_1(x)}$$

или

$$R''_4 = \varphi_a(x) \cdot \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]^2 + \varphi_b(x) \frac{f_3(x)}{f_1(x)}. \quad (5b)$$

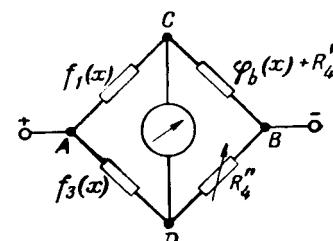


Рис. 3.

3. Включают в ветвь  $CB$  вместо  $[\varphi_b(x) + R'_4]$  сопротивление  $[\varphi_c(x) + R''_4]$  и уравновешивают мост сопротивлением  $R'''_4$  (рис. 4), тогда

$$R'''_4 = [R''_4 + \varphi_c(x)] \cdot \frac{f_3(x)}{f_1(x)}$$

или

$$R'''_4 = \varphi_a(x) \cdot \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]^3 + \varphi_b(x) \cdot \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]^2 + \varphi_c(x) \cdot \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right] \quad (5\text{в})$$

и т. д.

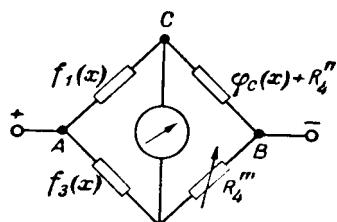


Рис. 4.

После  $n$ -го уравновешивания моста (рис. 5) получим:

$$R^{(n)}_4 = [R^{(n-1)}_4 + \varphi_n(x)] \cdot \frac{f_1(x)}{f_1(x)}$$

или

$$R^{(n)}_4 = \varphi_a(x) \cdot \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]^n + \varphi_b(x) \cdot \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]^{n-1} + \dots + \varphi_n(x) \cdot \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]. \quad (5\text{г})$$

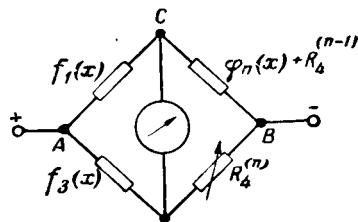


Рис. 5.

Включая последовательно с  $R^{(n)}_4$  сопротивление  $\varphi_{n+1}(x)$  и измеряя его обычным способом в мостовой схеме, получают результат «вычисления» полинома (5)

$$y_{\text{вых}} = R^{(n)}_4 + \varphi_{n+1}(x). \quad (6)$$

Процесс «вычисления» указанного полинома может быть выполнен достаточно быстро, если воспользоваться рационально подготовленной схемой, принципиальное изображение которой показано на рис. 6.

Аналогично предыдущему производится вычисление полиномов частного вида от общего, представленного (5):

1. При  $f_1(x) = 1$

$$y_{\text{вых}} = \varphi_a(x) [f_3(x)]^n + \varphi_b(x) [f_3(x)]^{n-1} + \dots + \varphi_n(x) [f_3(x)] + \varphi_{n+1}(x). \quad (7)$$

2. При  $f_3(x) = 1$

$$y_{\text{вых}} = \frac{\varphi_a(x)}{[f_1(x)]^n} + \frac{\varphi_b(x)}{[f_1(x)]^{n-1}} + \dots + \frac{\varphi_n(x)}{[f_1(x)]} + \varphi_{n+1}(x). \quad (8)$$

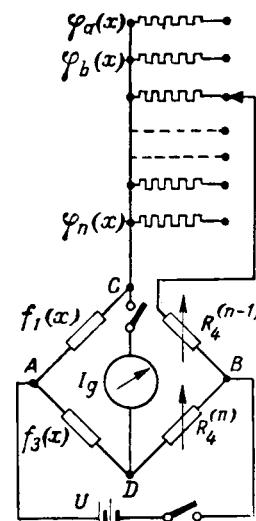


Рис. 6.

3. При  $\varphi_a(x) = \varphi_b(x) = \dots = \varphi(x)$

$$y_{\text{вых}} = \varphi(x) \cdot \left\{ \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]^n + \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]^{n-1} + \dots + \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right] + 1 \right\}. \quad (9)$$

4. При  $\varphi_a(x) = \varphi_b(x) = \dots = \varphi(x)$ , и если  $f_1(x) = 1$ , то

$$y_{\text{вых}} = \varphi(x) \cdot \{ [f_3(x)]^n + [f_3(x)]^{n-1} + \dots + [f_3(x)] + 1 \}. \quad (10)$$

Если  $\varphi(x) = 1$ , то может быть вычислен полином простейшего вида:

$$y_{\text{вых}} = [f_3(x)]^n + [f_3(x)]^{n-1} + \dots + [f_3(x)] + 1. \quad (10')$$

5. При  $\varphi_a(x) = \varphi_b(x) = \dots = \varphi(x)$ , и если  $f_3(x) = 1$ , то

$$y_{\text{вых}} = \varphi(x) \cdot \left\{ \frac{1}{[f_1(x)]^n} + \frac{1}{[f_1(x)]^{n-1}} + \dots + \frac{1}{[f_1(x)]} + 1 \right\}. \quad (11)$$

6. Если  $\varphi_a(x) > 0$ , а  $\varphi_b(x) = \varphi_c(x) = \dots = \varphi_{n+1}(x) = 0$ , то

$$y_{\text{вых}} = \varphi_a(x) \cdot \left[ \frac{f_3(x)}{f_1(x)} \right]^n. \quad (12)$$

Определение действительных корней алгебраического уравнения любой степени с помощью мостовой схемы может быть получено следующим образом [Л. 1]. Допустим, что требуется решить уравнение вида:

$$x^3 + a_2 x^2 - a_1 x + a_0 = 0, \quad (13)$$

где коэффициенты  $a_2$ ,  $a_1$ ,  $a_0$  понимаются в арифметическом смысле.

Переписываем это уравнение так, чтобы все члены его имели положительные знаки:

$$x^3 + a_2 x^2 + a_0 = a_1 x. \quad (14)$$

Для решения этого уравнения необходимо иметь четыре элемента проводимостей, три из которых включены параллельно между собой в ветвь  $R_2$  моста и образуют проводимость, равную

$$\frac{1}{R_2} = x^3 + a_2 x^2 + a_0, \quad (15)$$

а четвертую проводимость

$$\frac{1}{R_4} = a_1 x \quad (16)$$

включают в ветвь  $R_4$  моста. В ветвях  $R_1$  и  $R_3$  устанавливают одинаковые и постоянные проводимости.

Все скользящие движки с указателями величин проводимостей должны быть связаны между собой механически и перемещаются одновременно и плавно до тех пор, пока не наступит равновесие моста, при котором отсчитывается корень уравнения. Если уравнение имеет три различных положительных корня, то получают три различных установки указателя  $x$ , при которых наступает равновесие моста.

Для определения отрицательных корней уравнения следует произвести подстановку  $y = -x$ ; тогда вместо (13) получится:

$$-y^3 + a_2 y^2 + a_1 y + a_0 = 0, \quad (17)$$

которое аналогично предыдущему переписывают в виде:

$$y^3 = a_2 y^2 a_1 y + a_0 \quad (18)$$

и решают только что описанным способом.

Таким образом, для решения уравнений с действительными корнями необходимо иметь соответствующий набор функциональных сопротивлений (и проводимостей), достаточно точно изготовленных и соответствующим образом включенных в схему моста.

#### Литература

1. K. W. W. Ein elektrische Vorrichtung zum Lösung von Gleichungen — Elektrotechn. Zeitschrift, т. 29, стр. 739, 1910.

2. Christian Strobel. Elektrische Darstellung mathematischer Funktionen. Archiv für Elektrotechn., т. 6, стр. 334, 1940.

◆ ◆ ◆

## Трехфазные фазометры

Доктор техн. наук, проф. А. Д. НЕСТЕРЕНКО

Киевский политехнический институт

Коэффициент мощности трехфазной цепи определяется отношением:

$$k_{\varphi} = \frac{\Sigma P_n}{\Sigma U_n I_n} = \frac{P_a + P_b + P_c}{U_a I_a + U_b I_b + U_c I_c}, \quad (1)$$

где  $P$ ,  $U$  и  $I$  — соответственно активная мощность, напряжение и ток в фазах  $a$ ,  $b$  и  $c$ .

Приборов для непосредственного измерения  $k_{\varphi}$  в случае сложной асимметрии до сих пор предложено не было. Не прибегают к определению этой величины и путем вычисления по данным измерения отдельных составляющих, входящих в (1), ввиду большого количества этих составляющих. Методы практического определе-

ния коэффициента мощности основаны на предположении возможности выражения полной мощности трехфазной системы через геометрическую сумму активной мощности  $P$  и реактивной мощности  $Q$ , т. е. замены уравнения (1) следующим:

$$k'_{\varphi} = \frac{\Sigma P}{\sqrt{(\Sigma P)^2 + (\Sigma Q)^2}}$$

или

$$k'_{\varphi} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{\Sigma Q}{\Sigma P} \right)^2}} \quad (2)$$

Замена выражения (1) выражением (2) вносит незначительную погрешность лишь при неболь-

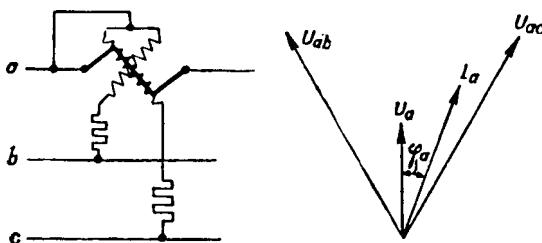


Рис. 1.

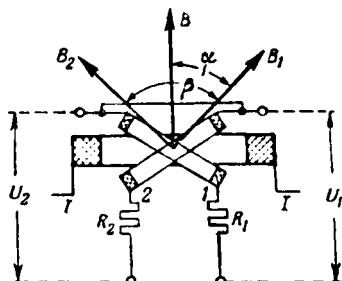


Рис. 4.

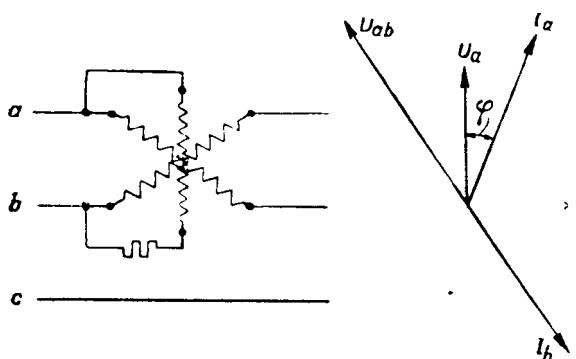


Рис. 2.

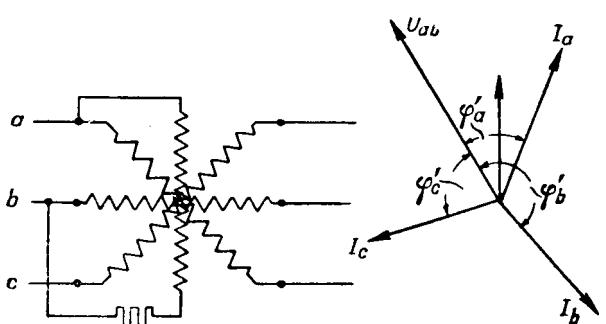


Рис. 3.

ших значениях асимметрии трехфазной цепи. Так как в нормальных условиях эксплуатации больших асимметрий не наблюдается, то эта замена допустима. Поскольку измерение коэффициента мощности за исключением специальных случаев обычно производится в нормальных условиях, можно считать, что точность определения  $k_\phi$  зависит только от точности измерения отношения  $Q$  к  $P$ .

Отношение  $\frac{Q}{P}$  определяется либо вычислением

по даннымдельного измерения реактивной и активной мощности при помощи соответствующих ваттметров, либо измерением при помощи фазометра, который поэтому может быть непосредственно отградуирован в единицах коэффициента мощности.

В настоящей работе мы дадим краткий обзор фазометров, применяющихся для измерения коэффициента мощности в цепи трехфазного тока. Все трехфазные фазометры могут быть разделены на следующие три группы: а) фазометры, дающие правильные показания при полной сим-

метрии трехфазной цепи; б) фазометры, дающие правильные показания при простой асимметрии трехфазной цепи; в) фазометры, показания которых верны при сложной асимметрии трехфазной цепи;

Кроме того, по устройству механизма различаются: а) фазометры, основанные на взаимодействии вращающегося магнитного поля с пульсирующим и б) фазометры, основанные на взаимодействии двух вращающихся магнитных полей.

Измерение  $k_\phi$  при полной симметрии может быть выполнено при помощи однофазного фазометра, включенного в одну из фаз трехфазной цепи. Наличие в трехфазной цепи сдвигов между токами или напряжениями отдельных фаз дало возможность значительно упростить схемы приборов и избавиться от сложных фазосдвигивающих устройств. Такие трехфазные фазометры имеют искусственную схему включения, требуют определенного порядка включения и пригодны для измерения коэффициента мощности только в цепи с полной симметрией. К этой группе приборов и относятся получившие наибольшее распространение трехфазные фазометры.

Типичные схемы таких фазометров приведены на рис. 1—3. На рис. 1 дана одна из схем с использованием фазовых сдвигов между напряжениями (подобно данной схеме могут быть созданы и другие с любой комбинацией фазных и линейных напряжений), а на рис. 2 и 3 — фазных соотношений между токами. По принципу работы механизма все эти приборы не отличаются друг от друга и основаны на взаимодействии вращающегося поля с пульсирующим. Приравнивая моменты вращения, действующие на подвижную часть прибора при равновесии, нетрудно найти основное соотношение между углом отклонения прибора и остальными величинами (сбозначения — на рис. 4), которое в общем виде может быть представлено так:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{k_1 B_1 \cdot \cos(B_1 B)}{k_2 B_2 \cdot \cos(B_2 B) \sin \beta} + \operatorname{ctg} \beta, \quad (3)$$

где  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B$  — индукция магнитного поля первой и второй скрепленной катушки и катушки последовательной цепи. Полагая равенство всех параметров цепей подвижных катушек и отсутствие сдвига фаз в этих цепях, получим для схемы рис. 1

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{U_{ab} \cdot \cos(U_{ab} I)}{U_{ac} \cdot \cos(U_{ac} I) \cdot \sin \beta} + \operatorname{ctg} \beta. \quad (4)$$

Подобным же образом для схемы рис. 2

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{I_a \cos(I_a U_{ab})}{I_b \cos(I_b U_{ab}) \sin \beta} + \operatorname{ctg} \beta. \quad (5)$$

Видно, что угол отклонения будет зависеть только от сдвига фаз в цепи и не будет зависеть от соотношения

между напряжением и током в отдельных фазах лишь при полной симметрии трехфазной цепи. В этом случае для схемы рис. 1 уравнение (4) получает вид:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos(\varphi + 30^\circ)}{\cos(\varphi - 30^\circ) \sin \beta} + \operatorname{ctg} \beta; \quad (6)$$

для случая кругового поля ( $\beta = 120^\circ$ )

$$\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg}(60^\circ + \varphi).$$

Для схемы рис. 2 при симметрии токов

$$\operatorname{ctg} \alpha = -\frac{\cos(30^\circ + \varphi)}{\cos(30^\circ - \varphi)} \frac{1}{\sin \beta} + \operatorname{ctg} \beta; \quad (7)$$

при круговом поле ( $\beta = 60^\circ$ )

$$\operatorname{ctg} \alpha = -\operatorname{ctg}(60^\circ + \varphi).$$

Для схемы рис. 3 из условия равновесия моментов, действующих на подвижную часть, имеем:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\sqrt{3} I_a \cos \varphi_a'}{I_b \cos \varphi_b' - I_c \cos \varphi_c'}; \quad (8)$$

при полной симметрии трехфазной цепи

$$\operatorname{ctg} \alpha = \operatorname{ctg}(30^\circ + \varphi). \quad (9)$$

Несколько отличный по принципу действия фазометр был предложен Пунга, а затем Джиффордом. В то время как приведенные на рис. 1—3 схемы основаны на взаимодействии вращающегося поля с пульсирующим, в фазометре Пунга—Джиффорда взаимодействуют два вращающихся магнитных поля. Схема включения этого прибора представлена на рис. 5 (катушки параллельной цепи могут быть включены также на линейные напряжения, соответственно на  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ ). Фазометр имеет три катушки, скрепленные под углом  $120^\circ$  друг относительно друга как в неподвижной, так и в подвижной части прибора. Определив моменты взаимодействия подвижных катушек с неподвижными и приравняв их сумму нулю, нетрудно найти, что при равновесии системы:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c - 0,5 [U_a I_b \cos(U_a I_b) + U_a I_c \cos(U_a I_c) + U_b I_a \cos(U_b I_a) + U_b I_c \cos(U_b I_c) + U_c I_a \cos(U_c I_a) + U_c I_b \cos(U_c I_b)]}{0,866 [U_a I_c \cos(U_a I_c) + U_b I_a \cos(U_b I_a) + U_c I_b \cos(U_c I_b) + U_a I_b \cos(U_a I_b) - U_b I_c \cos(U_b I_c) - U_c I_a \cos(U_c I_a)]}. \quad (10)$$

Полагая для упрощения записи  $U_n I_m \cos(U_n I_m) = P_{nm}$ , после ряда преобразований получим:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{\sqrt{3}(P_{aa} + P_{bb} + P_{cc}) + \sqrt{3}(P_{a0} + P_{b0} + P_{c0}) + 2\sqrt{3}(P_{ab} + P_{bc} + P_{ca})}{3(P_{aa} + P_{bb} + P_{cc}) + P_{a0} + P_{b0} + P_{c0}}. \quad (11)$$

При отсутствии нулевого провода

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{\sqrt{3}}{3} - \frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{P_{ab} + P_{bc} + P_{ca}}{P_{aa} + P_{bb} + P_{cc}}. \quad (12)$$

При симметрии напряжений, принимая во внимание, что  $P_{ab} = U_a I_b \cos(120^\circ + \varphi_a)$ ;  $P_{bc} = U_b I_c \cos(120^\circ + \varphi_b)$ ;  $P_{ca} = U_c I_a \cos(120^\circ + \varphi_c)$ , а также, что  $U_a = U_b = U_c$ , получим:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sum U_n I_n \sin \varphi_n}{\sum U_n I_n \cos \varphi_n} = \frac{\sum Q}{\sum P} = \operatorname{tg} \varphi_k, \quad (13)$$

где  $\varphi_k = \arccos k \varphi$ .

Таким образом, фазометр, предложенный Пунга—Джиффордом, пригоден для случая простой асимметрии трехфазной цепи, что в большинстве случаев практики дает удовлетворительное решение вопроса, так как асимметрия напряжения обычно невелика и ею можно пренебречь.

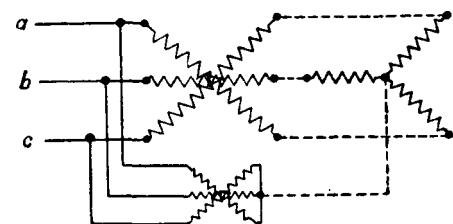


Рис. 5.

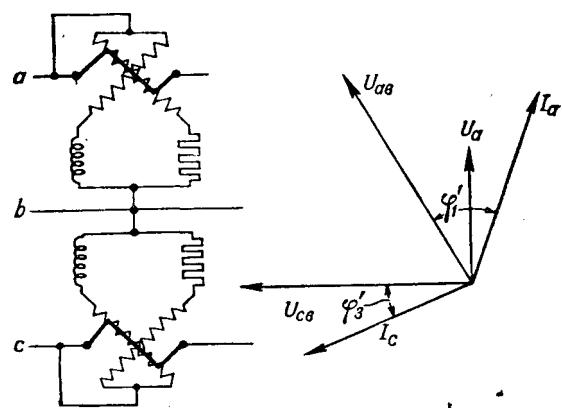


Рис. 6.

Более полное решение вопроса дают фазометры, представляющие собой два или три однофазных фазометра, укрепленных на одной оси. Такое решение впервые было дано Кафка для измерения коэффициента мощности в трехпроводной цепи. Этот прибор состоит из двух одинаковых фазометров, подвижные части которых укреплены на общей оси. В трехфазную цепь прибор включается подобно двухэлементному ваттметру (рис. 6). Если обе системы скрещенных катушек подвижной части прибора расположены относительно неподвижных идентично, то при равновесии для каждого элемента действительно равенство:

для первого

$$U_{ab} I_a \sin \alpha \cos \varphi_1 = U_{ab} I_a \sin(\beta - \alpha) \cos(\gamma - \varphi_1); \quad (a)$$

для второго

$$U_{cb} I_c \sin \alpha \cos \varphi_3 = U_{cb} I_c \sin(\beta - \alpha) \cos(\gamma - \varphi_3), \quad (b)$$

где  $\beta$  — пространственный угол между катушками одной системы;

$\gamma$  — сдвиг фаз между токами цепей этих катушек.

Сложив почленно правые и левые части равенств (a) и (b), после соответствующих преобразований получим:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{(U_{ab} I_a \cos \varphi_1 + U_{cb} I_c \cos \varphi_3) \cos \beta}{[\cos \gamma (U_{ab} I_a \cos \varphi_1 + U_{cb} I_c \cos \varphi_3) + \sin \gamma (U_{ab} I_a \sin \varphi_1 + U_{cb} I_c \sin \varphi_3)]} + \operatorname{ctg} \beta. \quad (14)$$

Двучлены в круглых скобках знаменателя представляют собой активную и реактивную мощность трехфазной цепи, т. е.

$$U_{ab}I_a \cos \varphi_1' + U_{cb}I_c \cos \varphi_3' = P; \quad (в)$$

$$U_{ab}I_a \sin \varphi_1' + U_{cb}I_c \sin \varphi_3' = Q; \quad (г)$$

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{P(1 + \cos \beta \cdot \cos \gamma) + Q \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma}{(P \cos \gamma + Q \sin \gamma) \sin \beta}. \quad (15)$$

Если  $\beta + \gamma = 180^\circ$ , то

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{P \sin \gamma - Q \cos \gamma}{P \cos \gamma + Q \sin \gamma}. \quad (16)$$

Подставляя в последнее равенство  $P = P_0 \cos \varphi_k$ ,  $Q = P_0 \sin \varphi_k$ , также вместо  $\sin \gamma$  и  $\cos \gamma$  соответственно  $\cos(90^\circ - \gamma)$  и  $\sin(90^\circ - \gamma)$ , получим:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\cos \varphi_k \cos(90^\circ - \gamma) - \sin \varphi_k \sin(90^\circ - \gamma)}{\cos \varphi_k \sin(90^\circ - \gamma) + \sin \varphi_k \cos(90^\circ - \gamma)} = \\ = \operatorname{ctg}(90^\circ - \gamma + \varphi_k), \quad (17)$$

где попрежнему  $\varphi_k = \arccos k'_\varphi$ .

Так как равенства (в) и (г) действительны только для трехпроводной цепи, то фазометр этого типа будет давать истинные показания только в трехпроводной цепи.

Фазометр для четырехпроводной трехфазной цепи может быть осуществлен по схеме трехэлементного прибора. Такой фазометр должен представлять собой три однофазных фазометра, подвижные катушки которых укреплены на одной оси идентично относительно соответствующих неподвижных катушек.

Составляя условия равновесия и произведя соответствующие преобразования, получим, как и для случая

двухэлементного прибора, уравнение (15), а при  $\beta + \gamma = 180^\circ$  — (17). Следовательно, показания прибора, построенного по данному принципу, будут верны при любой асимметрии не только в трехпроводной, но и четырехпроводной трехфазной цепи.

**Выводы.** Из всех рассмотренных выше фазометров только последние две схемы, представляющие соответствующее включение нормальных однофазных фазометров, дают истинные показания, не зависящие от асимметрии трехфазной системы; фазометр Пунга-Джиффорда, основанный на взаимодействии двух вращающихся полей, дает верные показания при простой асимметрии; наконец, фазометры с искусственными схемами включения пригодны лишь для случая полной симметрии.

Эти выводы относятся только к точности определения  $k'_\varphi$ , выражаемому равенством (2). При значительных асимметриях, когда равенство (1) не может быть заменено равенством (2), показания схемы рис. 6 и схемы фазометра для трехфазной четырехпроводной цепи также будут соответственно отличаться от истинных. Однако, если принять во внимание крайнюю неточность в определении выражения (1) на основании отсчетов по 7—9 приборам, в особенности при колебаниях нагрузки, можно считать, что эти схемы удовлетворяют всем требованиям практики.



## К статье В. М. Синькова „Об экономических основах распределения нагрузки между электростанциями“

(ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, № 12, 1947)

Доктор техн. наук, проф. В. В. БОЛОТОВ

Энергетический институт Академии наук СССР им.  
Кржижановского и Ленинградский политехнический  
институт им. Калинина

Минимум расхода топлива при эксплоатации электрических станций электроэнергетической системы, безотносительно к ценности этого топлива, не может, конечно, служить критерием для обоснования степени загрузки электрических станций, работающих на разном или равнозначенном топливе. В. М. Синьков поэтому имел основание поставить на обсуждение вопрос о нахождении новых принципов распределения нагрузки между такими электрическими станциями. Однако, с выводами его согласиться нельзя вследствие наличия ряда ошибочных положений.

Топливный баланс электроэнергетической системы определяется прежде всего тем, на какое топливо рассчитаны котельные агрегаты электрических станций, поскольку в современном оборудовании даже переход на другую марку того же рода топлива связан с серьезными техническими трудностями, почти всегда требующими в той или иной степени реконструкции топочных устройств. Структура же котельного хозяйства системы создается в результате реализации утвержденных планов капитального строительства с учетом результатов соответствующих технических и экономических научно-исследовательских и проектных разработок. Таким образом, осуществленный план капитального строительства является основным фактором, определяющим структуру топливного баланса энергосистемы. При не слишком высоком коэффициенте суммарной электрической нагрузки энергосистемы (большом числе часов пользования максимума) имеются возможности варьировать структуру топливного баланса, притом в тем более широких пределах, чем ниже коэффициент нагрузки системы.

В энергосистеме, включающей многие типы электрических станций, вполне естественным требованием является максимально возможное использование более экономичных энергоресурсов. Поэтому максимальная (в пределе до полной) загрузка по располагаемым энергоресурсам различных электрических станций должна производиться в следующей очередности: 1) электрические станции, использующие возобновляемые энергоресурсы — водную энергию и энергию ветра; 2) электрические станции, использующие вторичные энергоресурсы, в том числе паровые электрические станции, в пределах их загрузки по теплофикационному циклу; 3) тепловые электрические станции, работающие без использования тепла отработавшего пара или газа (конденсационный режим). Лишь в отношении последней группы может ити речь о зависимости их загрузки от рода используемого топлива.

При работе всех электрических станций, участвующих в этой группе, на одном роде топлива (точнее, полученного из одного источника) критерием направления его на ту или иную электростанцию или, что то же, критерием распределения нагрузки между этими электрическими станциями можно принять стоимость топлива франко-станция (точнее, быть может, франко-бункер парового котла). Это предлагает В. М. Синьков и это было предложено мной в 1940 г. Практически, однако, учет разли-

чия в стоимости топлива может повлиять на распределение нагрузки между электрическими станциями лишь в случае большой разницы в стоимости доставки топлива. Для крупных электростанций, работающих на дальнепривозном топливе и расположенных друг от друга на относительно небольшом расстоянии (100—200 км), нельзя ожидать заметной разницы в стоимости провоза топлива. При использовании местного низкокалорийного топлива вероятность наличия условий, требующих применения этой методики, гораздо больше, если при этом несколько электростанций снабжаются топливом из одного источника. Применение ее не должно представить никаких трудностей.

Нужно сделать все же два замечания.

Чем больше в этом случае расстояние между электрическими станциями, тем в большей степени необходимо считаться при распределении нагрузки с потерями энергии в системе передачи и распределения электрической энергии. При этом нельзя уже пользоваться для сравнения величиной относительного прироста денежных затрат (в моей терминологии «частичной удельной стоимости энергии») на таких станциях, но нужно их относить к выбранной точке сравнения в электрической системе, учитывая и потери при передаче. Методика учета потерь дана в свое время инж. Горнштейном, а также мной (см. цитированную ниже книгу).

Чаще приходится встречаться со случаем, когда электрические станции работают на топливе, получаемом из различных источников, причем стоимость топлива явно не может служить критерием целесообразности его преимущественного использования. Так, стоимость мегакалории местного топлива, которое в соответствии с твердыми установками топливной политики должно использоваться в первую очередь, оказывается часто значительно выше стоимости более высококалорийного, заведомо более ценного, привозного топлива.

Совершенно очевидно, что степень загрузки каждой электрической станции в процессе ее эксплоатации, в первую очередь определяющая степень использования соответствующего вида топлива, не может быть поставлена в зависимости только от экономичности ее работы и тем менее может произвольно задаваться диспетчером. Потребление топлива должно быть для местного топлива согласовано с планом его добычи, для привозного с общим балансом его добычи и потребления. Поэтому совершенно неизбежно и обязательно потребление каждого вида топлива должно точно фиксироваться годовым планом эксплоатации системы в соответствии, с одной стороны, с потребностями энергосистемы и планом топливодобычи, с другой стороны, с основными положениями топливной политики и пятилетними планами.

Установление цифр плана практически не требует детальных расчетов с подробным экономическим обоснованием распределения нагрузки между агрегатами. Эта задача станет тем не менее перед диспетчерами системы, поскольку заданное планом количество располагаемого топлива, даже в разрезе одного дня, еще не определяет режима работы — графиков нагрузки каждой из работающих в энергосистеме электрических станций. Свобода задания режима при этом тем больше, чем более пико-

вый характер имеет суточный график суммарной электрической нагрузки энергосистемы.

Однако, методика решения задачи, предлагаемая В. М. Синьковым (случай 2-й), в этом случае не может быть применена. С одной стороны, как видно из предыдущего, расходование различных видов топлива принципиально не может быть подчинено одной лишь задаче получения наименьшей общей стоимости вырабатываемой энергии (а к этому в конечном счете сводится предложенный метод), даже если принять возможным, что «приведенная» стоимость топлива, полученная при помощи предлагаемых коэффициентов, может действительно полно и правильно характеризовать действительную ценность стоимости его для народного хозяйства.

Использование топлива, являющегося в условиях данной системы экономически наиболее выгодным, практически всегда ограничено возможными размерами его добычи (малые запасы, недостаточное развитие добычи и т. д.). Поэтому выполнение плана топливоиспользования должно быть обеспечено в первую очередь. С другой стороны, совершенно недостаточно, предлагая методику решения, основанную на введении условного коэффициента, дать этому коэффициенту название. Для решения задачи совершенно необходимо не только более определено характеризовать содержание нового понятия, но и дать принципиальную методику установления величины этого коэффициента.

В конечном счете предлагаемый В. М. Синьковым коэффициент лишь по названию отличается от коэффициента дефицитности, им решительно забракованного лишь потому, что он слишком примитивно понимает этот термин. Содержание его значительно глубже, как показано в работах В. В. Новожилова (от части и в неопубликованных моих работах), и в такой более широкой трактовке понятие дефицитности сохранится еще очень долгое время. В то же время для решения задачи выбора экономичного режима совместной работы электростанций, использующих различные энергоресурсы, не нужен ни коэффициент народнохозяйственной ценности, ни коэффициент дефицитности.

Теоретическое решение задачи дано мной в вышедшей недавно книге «Теоретические основы выбора экономичного режима сложной электроэнергетической системы». Решение дано для случая совместной работы электростанций, использующих любые энергоресурсы, хотя бы и совершенно несопоставимые (например, топливо и гидроэнергию), но в заданном планом количестве.

Теоретический анализ показывает, что требование равенства «относительных приростов расхода первичного энергоресурса» (в моей терминологии «частичных удельных расходов») на работающих совместно агрегатах заменяется требованием постоянства их соотношения. Это не требует никаких искусственных приемов с введением условных коэффициентов и в то же время позволяет непосредственно применить для решения задач по выбору экономичного режима эксплоатации всю ту методику, которая разработана для электростанций, работающих на одинаковом и равнозначенном топливе.

### Проф. П. Г. ГРУДИНСКИЙ

Технический совет Министерства электростанций СССР

В. М. Синьков пытается дать метод распределения нагрузки между станциями, который не впадал бы «в противоречие с требованиями рационально составленного плана выработки электроэнергии станциями системы», для чего он предлагает умножать цену каждого топлива, выраженную в относительных единицах, на «коэффициент народнохозяйственной ценности», после чего применять принцип распределения нагрузки по методу минимума денежных затрат, которому, по словам автора, «иностранные авторы зачастую отдают предпочтение».

Этот магический коэффициент должен, по мнению автора статьи, учесть ряд факторов и в первую очередь возможность использования данного топлива на неэнергетических предприятиях, а затем запасы топлива в стране или в районе. Кто должен дать такой коэффициент, какие соотношения должны быть положены в основу его определения, автор не указывает и не решается даже на-

метить. Он только решительно заявляет, что «коэффициент народнохозяйственной ценности» ничего общего не имеет с применявшимся ранее в экономических расчетах коэффициентом «дефицитности меди» потому, что последний будто бы не учитывал тех факторов, которые должен учитывать предложенный новый коэффициент.

Позволим себе решительно заявить о несогласии с последним утверждением В. М. Синькова. Лица, предложившие ранее коэффициент дефицитности меди при расчете линий, тоже пытались при его помощи оценить необходимость применения меди для других целей и запасы ее в стране. Природа обоих коэффициентов одинакова. Вероятно, и В. М. Синьков чувствует шаткость своей позиции, потому что дальше он пускается в рассуждения о неудачности самого термина «дефицитности». К сожалению, термин, предложенный В. М. Синьковым, еще более неудачен: по его определению, местное топливо, на котором вырабатывается большая часть энергии в стране и которое обходится дороже привозного, имеет меньшее народнохозяйственное значение. Можно признать меньшую калорийность местного топлива, большую область применения некоторых видов дальнепривозного, но не стоит сравнивать их народнохозяйственное значение, так как выразить это соотношение одним числом, коэффициентом, невозможно. Ни одно учреждение, ни один руководитель не даст и не утвердит такие коэффициенты, так же как и не установит коэффициент дефицитности меди. Не сделают они этого по тем же соображениям, что и раньше: для установления их численных значений не предложено каких-либо количественных соотношений. Пока таких соотношений нет, надежда автора статьи, что кто-то даст коэффициенты из общих, по существу, эмпирических соображений, является фантазией, отзывающей маниловщиной в технике. Эмпирическими коэффициентами нельзя решить задачу, имеющую такую формулировку: скечь все топливо, добывшее вблизи станции, максимально использовать другие, имеющиеся в распоряжении, запасы местного топлива при наименьшем удельном его расходе и в наименьшем количестве скечь дальнепривозное топливо. Возможно, что такая задача имеет математическое решение, но в статье автора даже нет намеков на какой-либо подход к нему. Нет также правильной постановки вопроса потому, что при правильной формулировке не должно быть упоминания о народнохозяйственной ценности того или иного вида топлива.

Мы не разделяем надежды автора, что его статья может помочь привлечь внимание к экономическим основам распределения нагрузки между электростанциями. В настоящее время это и не нужно: внимание уже достаточно привлечено многочисленными работами В. М. Горнштейна, В. В. Болотова, В. В. Андреева и др. Предложение же В. М. Синькова могло бы увлечь некоторых на неправильный путь, если бы не было печального опыта с «коэффициентом дефицитности меди».

**Доктор техн. наук, проф. Н. Н. ЩЕДРИН**  
Ташкент

Критические соображения, высказываемые В. М. Синьковым по поводу неувязки системы планирования энергетического использования топлива и методов распределения производства энергии между отдельными станциями, а также о несовершенстве этих методов, во многом справедливы и уже раньше нашли отражение в литературе. Однако, сомнительна практическая ценность предложенного В. М. Синьковым способа устранения недостатков применяемых ныне экономических критерии распределения нагрузки и регулирования режима параллельной работы станций. Введение «коэффициентов народнохозяйственной ценности» равносильно установлению особой шкалы цен на топливо, используемое в энергетике, причем эти цены лишены всякого смысла в применении к тем отраслям промышленности, которые используют топливо, как сырье для своей специальной продукции. Ясно, что упомянутые коэффициенты не могут служить основой планирования, а они сами могут являться весьма сложной функцией планирования.

Как известно, планирование топливного потребления основывается не только на энергетических и экономиче-

ских соображениях, и, с другой стороны, оно не может точно учитывать все индивидуальные особенности энергетических характеристик составных элементов энергосистем. Поэтому едва ли даже весьма кропотливым подбором «коэффициентов народнохозяйственной ценности» будет устранена возможность неувязки между плановыми заданиями и энерго-экономическими эксплоатационными расчетами. Наряду с этим следует отметить, что (цитируем книги В. В. Болотова): «если жестко фиксировать количество используемой первичной энергии для всех ее видов, то... показателем экономичности является максимум полезно произведенной энергии». При такой постановке планирования и экономической задачи устраивается, по крайней мере в принципе, указанное противоречие между плановыми заданиями и экономикой эксплоатации.

Необходимо отметить следующее: отступление от принципа экономии энергии, органически связанное с предложением В. М. Синькова, означало бы увеличение общего расхода топлива, хотя и при сокращении расхода высоких его сортов.

Предложение В. М. Синькова, по нашему мнению, не имеет никаких существенных преимуществ по сравнению с существующей, более простой, практикой планирования потребления топлива и практикой экономической оценки режимов параллельной работы станций.

**Доктор техн. наук, проф. П. С. ЖДАНОВ**

Московский энергетический институт им. Молотова

Предложение В. М. Синькова использовать в качестве критерия экономичности распределения нагрузки минимум денежных затрат в условиях, когда стоимость является исчерпывающим показателем ценности топлива, не является новым. Введение предлагаемых автором статьи коэффициентов народнохозяйственной ценности топлива, различных для отдельных систем, обладает тем недостатком, что значения этих коэффициентов вряд ли смогут быть установлены достаточно достоверно. При использовании различных видов топлива расход отдельных видов топлива (не всех) обычно оказывается заданным для определенных промежутков времени. Из этого и приходится исходить при экономическом распределении нагрузки.

**Кандидат техн. наук В. М. СИНЬКОВ**

Уральский индустриальный институт им. Кирова

По вопросам технико-экономического выбора параметров или режима работы энергетических установок всегда существовали самые различные точки зрения и до сих пор не установлены абсолютные критерии для нахождения неоспоримого решения. Экономические основы распределения активной нагрузки между электростанциями в системе являются одним из таких вопросов. Это и побудило меня поставить вопрос на обсуждение, рассматривая свое предложение лишь как «попытку наметить один из возможных путей решения задачи. Несмотря на ряд возражений, считаю, что метод коэффициентов народнохозяйственной ценности может дать наиболее правильное и практически удобное решение вопроса. Не следует беспокоиться о том, что это будет некоторое условное решение, найденное «из общих, по существу, эмпирических соображений» (П. Г. Грудинский). Такие условности встречаются на каждом шагу, например: экономические плотности тока (Электричество, № 6, 1946, статья П. Г. Грудинского), тарифы на электроэнергию и др. Этими условиями все пользуются, если они способствуют повышению эффективности народного хозяйства, и никто не считает их «маниловщиной в технике».

Если исходить из заданного баланса топливоиспользования, то могут быть найдены и другие пути решения задачи.

Очень жаль, что П. Г. Грудинский возражает против того, чего вообще нет в статье. Он пишет, что автор статьи «предлагает умножать цену каждого топлива, выра-

женную в относительных единицах», на «коэффициент народнохозяйственной ценности», после чего применять принцип распределения нагрузки по методу минимума денежных затрат». Между тем, в статье ясно сказано, что на коэффициенты приведения умножаются относительные приrostы расхода тепла, и распределение производится по минимуму затрат тепловой энергии (с учетом коэффициента приведения).

Нельзя согласиться с постановкой вопроса, сформулированного П. Г. Грудинским: «сжечь все топливо, добытое вблизи станции, и т. д.». Действительно, техническая политика Советского Союза в области топливоиспользования направлена на максимальное использование запасов местного низкосортного топлива. Однако, полностью отвлечься от вопросов стоимости его, как если бы речь шла о даром топливе, — значит впадать в противоречие с финансовой политикой и задачей укрепления рубля.

В замечаниях В. В. Болотова о статье приводится основной вывод — относительные приrostы двух станций должны находиться в постоянном отношении  $\lambda_f$ , определяемом заданным для одной из станций количеством расходуемой первичной энергии  $w_{a2}$ . К сожалению, В. В. Болотов не указывает способа определения коэффициента  $\lambda_f$ . Кроме того, вывод дан лишь для случая двух станций. На стр. 148 упомянутой выше книги В. В. Болотова мы находим, что с повышением  $w_{a2}$  величина  $\lambda_f$  должна уменьшаться, а несколько ниже отмечается, что в случае сложного графика суммарной нагрузки отыскание  $\lambda_f$  представляет большие трудности и может быть выполнено лишь методом подбора.

Введенное предложенной В. В. Болотовым системы приведенных удельных расходов позволяет применить к многоагрегатным станциям метод, найденный для одно-

агрегатных станций. Однако, переход от  $\frac{d_1}{d_2} = \lambda_f$  к  $\frac{d_{1_{2k}}}{d_{2_{2k}}} = \lambda$

позволяет выбрать сочетания элементов станций (что вряд ли имеет практическую ценность, так как для решения вопроса требуются дополнительные расчеты, учитывающие потери при пусках и остановках агрегатов), но не дает возможности выбрать коэффициенты  $\lambda_f$ , так

как соотношение  $\frac{d_{1_{2k}}}{d_{2_{2k}}}$  не зависит от заданного планом

расхода первичной энергии одной из станций. Таким образом, практическое использование рекомендуемого В. В. Болотовым метода еще более затруднено (практически невозможно), чем применение метода коэффициентов народнохозяйственной ценности. В заключение можно отметить следующее:

Выполнение плана выработки энергии, как и плана топливоиспользования, не может быть обеспечено применением методов «экономического» распределения нагрузки по минимуму затрат тепла. Задача может быть решена введением «приведенных» значений относительных приростов расходов тепла. Коэффициенты приведения могут быть определяемы различными способами; в частности, может быть использована система директивно заданных коэффициентов народнохозяйственной ценности; в основу определения коэффициентов приведения может быть положен заданный (также директивно) баланс топливоиспользования, составленный, конечно, с учетом народнохозяйственной ценности различных видов топлива.

#### О Т Р Е Д А К Ц И И

Редакция считает правильной и полезной критику, которой подверглась в проведенной дискуссии статья В. М. Синькова. В результате дискуссии определено выявилась необоснованность как предлагаемых В. М. Синьковым, так и других аналогичных, критерев экономичности распределения нагрузки между электростанциями энергосистемы.

# К 50-летию со дня смерти В. Н. Чиколева

## Расчет распределения силы света прожектора по методу В. Н. Чиколева и развитие этого метода

Кандидат техн. наук И. Д. АРТАМОНОВ

Военно-инженерная академия им. Куйбышева

В 1887 г. В. Н. Чиколев сделал первую попытку охарактеризовать светотехнические свойства пучка прожектора при помощи кривых распределения силы света в этом пучке, представляющих собой зависимость силы света от малых угловых интервалов, расположенных по отношению к оси пучка вправо и влево (горизонтальная кривая) или вверх и вниз (вертикальная кривая). Через пять лет после этого В. Н. Чиколев изложил свой метод расчета теоретических кривых распределения силы света прожектора в работе «Осветительная способность прожекторов в электрического света». Этот труд русского ученого Владимира Николаевича Чиколева был первой в мире капитальной работой по теории прожекторов [Л. 1].

В течение 20 лет, до появления дуги повышенной яркости, названное исследование В. Н. Чиколева с исчерпывающей полнотой отвечало на все теоретические вопросы, которые могли возникнуть при сравнительных испытаниях, расчетах и проектировании прожекторов до их изготовления. Наряду с изложением вопроса о распределении силы света прожектора в книге В. Н. Чиколева был проведен тщательный анализ осветительной способности прожекторов, обладающих полученными расчетными кривыми. При этом были вычислены освещенности, создаваемые ими на различных расстояниях и при различных условиях прозрачности воздуха, установлено влияние параметров прожекторов на величину этих освещенностей, и впервые решен ряд задач, связанных с видимостью объектов, освещенных прожектором. В этой работе еще до А. Блонделя указано, что видимость объекта, освещенного прожектором, при прочих равных условиях пропорциональна освещенности изображения объекта на сетчатой оболочке глаза наблюдателя и линейным размером этого изображения.

Для расчета кривых распределения силы света прожектора В. Н. Чиколевым был впервые применен основной принцип, на котором построена

Принятые теперь способы расчета распределения силы света в пучке прожектора основаны на фундаментальных принципах теории прожекторов, впервые изложенных В. Н. Чиколевым. На основе этой теории в статье производится исследование некоторых свойств элементарных изображений такого источника света, как дуга повышенной яркости, и рекомендуется новый способ расчета кривых распределения силы света современных дуговых прожекторов.

вся современная теория прожекторов. Сущность этого принципа заключается в том, что исследование светотехнических свойств пучка прожектора начинается с исследования отдельных элементарных изображений ис-

точника света малыми элементами поверхности оптической системы прожектора. В указанной выше работе было произведено тщательное вычисление угловых размеров эллиптических элементарных изображений дискового источника света равномерной яркости (кратер дуги постоянного тока между электродами из чистых углеродистых материалов). При этом предполагалось, что отдельные малые кольцевые зоны отражателя дают такие же элементарные изображения, как если бы их давали кольцевые зоны математически точного параболоида. Заметим, что понятие об aberrации параболоидных отражателей было введено позднее.

В этой же работе В. Н. Чиколева указан принцип формирования светового пучка прожектора путем все более полного наложения друг на друга элементарных изображений источника света по мере удаления их от прожектора и совмещения на достаточно большом (строго говоря, на бесконечном) удалении. На этом именно основании кривая распределения силы света прожектора получалась суммированием ординат кривых зависимости силы света от отдельных малых кольцевых зон отражателя.

Для трех сравниваемых прожекторов с различными параметрами отражателей и с дуговыми лампами на различную силу тока, но с одинаковой яркостью кратера, были получены три кривые распределения силы света, представленные здесь на рис. 1. Эти характеристики показывали, что световой пучок прожектора с источником света равномерной яркости неизбежно имеет плоскую полку, т. е. постоянную силу света на большом, но конечном, расстоянии от прожектора. Кроме того характеристики, показывали, что общая угловая ширина луча больше у того прожектора, который имеет отражатель с корот-

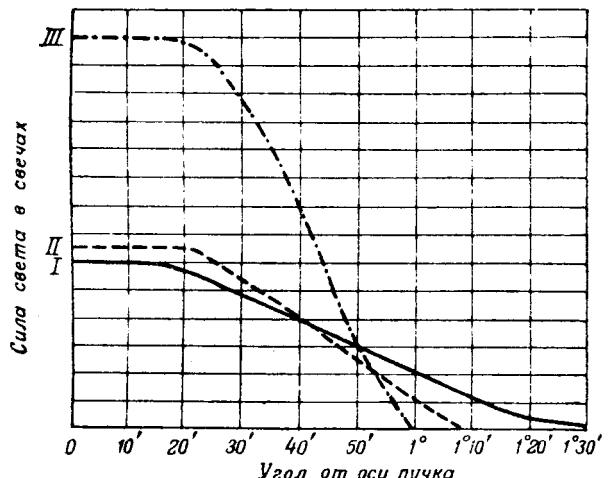


Рис. 1. Кривые распределения силы света трех прожекторов, полученные расчетным путем по методу В. Н. Чиколева.

У прожекторов I и II источник света имеет радиус  $r = 8$  мм, у прожектора III источник света имеет радиус  $r = 16$  мм.

Проекторы I  $D = 40$  см;  $f = 30$  см;

II  $D = 100$  см;  $f = 40$  см;

III  $D = 150$  см;  $f = 65$  см.

$D$  — диаметр светового отверстия прожектора;  $f$  — фокусное расстояние отражателя.

ким фокусным расстоянием или источник света больших размеров, что сила света на оси пучка будет больше у прожектора, имеющего большую площадь светового отверстия, и что кривые при источниках света одной и той же формы подобны друг другу.

В 1922—1926 гг. в журнале «General Electric Review» появилась серия статей Ф. Бенфорда [Л. 2], в которых автор широко использовал описанный принцип анализа свойств элементарных изображений для получения кривых распределения силы света параболических прожекторов со сферическими и дисковыми источниками света, а также с источниками света в виде дуг повышенной яркости. Однако, никакой ссылки на то, что впервые эти исследования были проведены В. Н. Чиколевым, Бенфорд не приводит. Нет ссылки на метод сетки В. Н. Чиколева и в статье Д. Хамшера [Л. 3]. Это тем более странно, что еще в 1921 г. труд В. Н. Чиколева был переведен на немецкий язык и вышел за границей в Остwaldовской серии «Классики точного знания», а А. Зоннефельд в своей книге посвящает работе В. Н. Чиколева обширный реферат<sup>1</sup>.

Положенный В. Н. Чиколевым в основу теории прожекторов принцип анализа свойств элементарных изображений дает возможность развивать и углублять эту теорию и в настоящее время применительно к задачам, возникающим в современной практике. Классический труд В. Н. Чиколева по теории прожектора подготавливается к печати Госэнергоиздатом.

В самом деле, сперируя с элементарными изображениями источника света малыми элементами поверхности параболического отражателя или другой оптической системы, можно весьма

удобно проследить за всеми явлениями изменения структуры пучка прожектора при удалении от него как вдоль по оптической оси отражателя, так и по направлению, составляющему некоторый угол с этой осью. Пользуясь этим принципом, легко проследить изменения светотехнических свойств пучка при расфокусировке прожектора как осевой, так и внеосевой. Применяя принцип анализа свойств элементарных изображений, можно учесть не только неоднородные свойства различных участков поверхности отражателя или другой оптической системы (различные aberrации, коэффициенты отражения и т. д.), но и любую неравномерность яркости источника света и его несимметрию относительно оси зеркала, а также выяснить их влияние на конечную светотехническую характеристику прожектора.

Ценность принципа В. Н. Чиколева легко доказать на примере исследования методики расчета теоретического распределения силы света современного прожектора с дугой повышенной яркости и с aberrационным параболическим отражателем. Распространенный в настоящее время метод расчета кривых силы света этих прожекторов не свободен от недостатков. Известно, что при расчете по этому методу учитывается: неравномерная яркость источника света, в направлении различных зон, различная угловая aberrация этих зон и различная чувствительность элементарных изображений от элементов этих зон к осевой дефокусировке. Кривые при этом могут быть получены для любого, интересующего нас удаления от прожектора.

Отражатель прожектора разделяется на ряд концентрических кольцевых зон, чаще всего делением полного угла светового отверстия отражателя на ряд частей с интервалом в  $10^\circ$ . Для каждой такой кольцевой зоны выполняются следующие расчеты и графические построения.

Вначале определяется вид кривой распределения силы света в элементарном пучке, отраженном от элемента рассматриваемой зоны. Для этой цели используется кривая распределения яркости по поверхности кратера анода дуги повышенной яркости, полученная по методике Ф. Бенфорда, допускающей следующие ошибки. Всем элементам поверхности данной зоны конечных размеров в отношении коэффициента отражения приписываются одни и те же свойства. Считается, что кратер анода усматривается из всех элементов поверхности данной зоны в одном и том же виде, т. с. в виде круглого диска с одинаково распределенной по его поверхности яркостью, что обусловлено грубым усреднением яркости отдельных зон кратера при измерении их при помощи шарового фотометра с диском анализатором Ф. Бенфорда. На самом деле, если взять хотя бы четыре элемента на поверхности зоны площадью в  $1 \text{ см}^2$ , расположенные по двум взаимно перпендикулярным диаметрам светового отверстия отражателя, нетрудно на основании рис. 2 убедиться, что кратер анода этой дуги будет усматриваться из всех этих элементов в различных видах и кривые распределения

<sup>1</sup> В наших изданиях [Л. 4, 5, 6] также не приводились ссылки на приоритет В. Н. Чиколева.

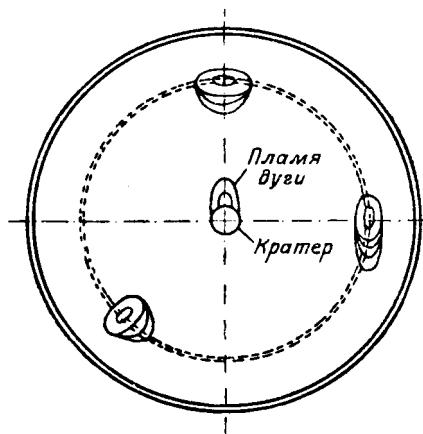


Рис. 2. Элементарные изображения кратера анода дуги повышенной яркости элементами малой кольцевой зоны отражателя.

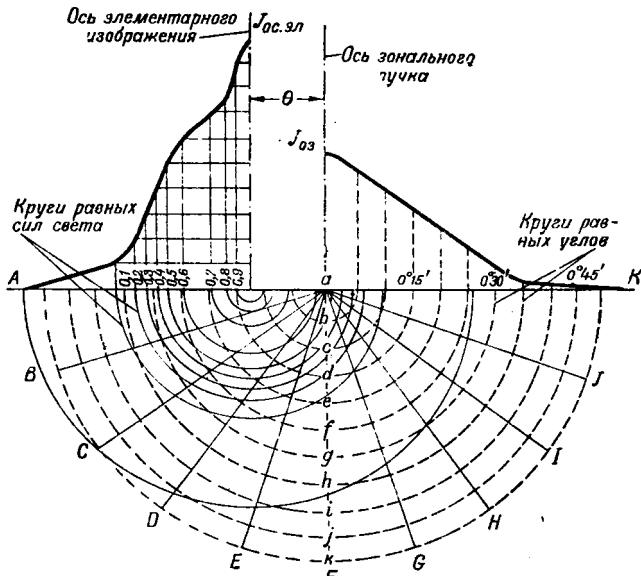


Рис. 3. Построение кривой распределения силы света в зональном пучке по Ф. Бенфорду.

силы света в элементарных пучках от четырех элементов, одинаковой площади, будут далеко не одинаковы.

Далее, построив кривую силы света в элементарном пучке и выполнив построение полуокружностей равных сил света, как показано на рис. 3, обычно приступают к определению углового удаления оси элементарного изображения от оси светового пучка прожектора, учитывая расстояние, для которого получают кривую распределения силы света в пучке прожектора, аберрационную дефективность зоны и возможную расфокусировку источника света. Поскольку на графике рис. 3 представлена кривая распределения силы света лишь в одном элементарном пучке, то мы вынуждены и далее присыпывать всем элементам данной зоны одни и те же свойства, в результате чего допущенная вначале ошибка усугубляется. В самом деле, на практике очень часто отдельные участки или элементы одной и той же зоны отражателя имеют различные угловые аберрации, в чем нам неодно-

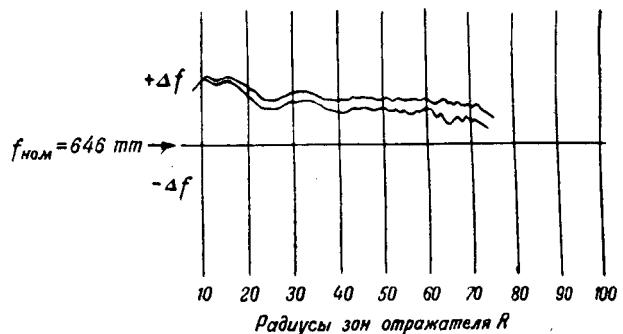


Рис. 4. Аберрограмма 150 см параболического отражателя, полученная на аберрографе Б. Г. Леонова (две кривые для двух радиусов отражателя).

кратно приходилось убеждаться при получении аберрограммы на аберрографе Б. Г. Леонова. Так, например, на рис. 4 приведены две кривые аберраций, полученные для двух взаимно перпендикулярных радиусов отражателя, и эти кривые, хотя и выглядят подобными, но показывают явно различные значения аберраций для двух элементов, взятых на любой зоне отражателя. Присыпывать всем элементам зоны одни и те же свойства при внеосевой расфокусировке источника света тем более неправильно, что смещения осей элементарных изображений, даваемых различными элементами одной и той же зоны, в этом случае будет совершенно различными. Поэтому метод Бенфорда для расчета кривых силы света оказывается при наличии внеосевой расфокусировки совершенно непригодным.

При построении кривой распределение силы света от данной зоны отражателя мы обычно ищем удаление оси элементарного изображения от оси пучка прожектора, т. е. угол  $\Theta$ , и считаем, что  $\Theta$  является суммой трех слагаемых:  $\beta_L$  — угловой величины радиуса зоны, выимого с заданного нам расстояния, для которого строится кривая;  $\Delta\phi$  — угловой аберрации зоны и  $\beta'$  — углового отклонения осей элементарных изображений от параллельности с оптической осью зеркала, или с осью пучка прожектора, вследствие расфокусировки источника. Конечно, при суммировании этих величин необходимо всегда учитывать знаки  $\Delta\phi$  и  $\beta'$  и полагать  $\beta_L$  всегда положительной величиной, так как при отсутствии аберрации и расфокусировки  $\Theta = \beta_L$ , причем при  $L \rightarrow \infty$ ;  $\beta_L \rightarrow 0$ . Нетрудно установить, что при отрицательной угловой аберрации ( $-\Delta\phi$ ), что соответствует и отрицательной продольной аберрации (при фокусном расстоянии данной зоны меньшем действительного фокусного расстояния данного отражателя) необходимо  $\Theta$  уменьшить на величину  $\Delta\phi$ , а при ( $+\Delta\phi$ ) собственно увеличить на  $\Delta\phi$ . Таким образом, величину  $\Delta\phi$  всегда следует брать при суммировании с ее знаком. Что же касается величин  $\beta'$ , то при приближении источника света к отражателю (продольная расфокусировка  $-\Delta\beta'$ ) оси элементарных изображений удаляются от оси зеркала, а при положительной они приближаются, следовательно, при суммировании величину  $\beta'$  следует брать с противоположным знаком. Таким образом, общее выражение для  $\Theta$  получим:

$$\Theta = \beta_L + \Delta\phi - \beta' [\text{min}], \quad (1)$$

в котором  $\beta_L$  всегда положительно, а  $\Delta\phi$  и  $\beta'$  следует брать с их знаками.

Различные удаления осей двух элементарных изображений при наличии всех упомянутых выше причин от параллельности с оптической осью зеркала поясняются рис. 5.

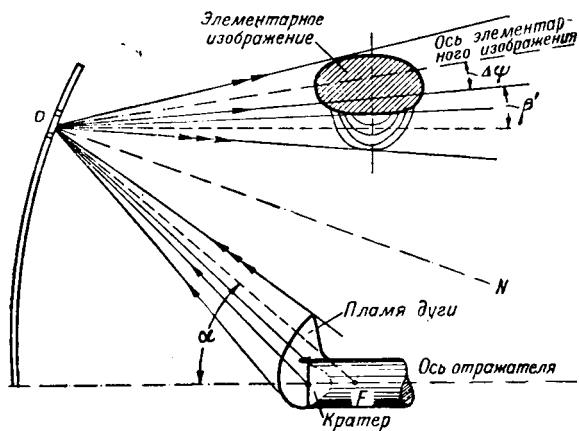


Рис. 5. Удаление оси элементарного изображения источника света от оси отражателя вследствие aberrации и расфокусировки.

Известно, далее, что если рассматриваемый элемент имеет площадь проекции на световое отверстие прожектора, равную  $Q = 1 \text{ см}^2$ , то сила света (в свечах) в элементарном пучке вычисляется по формуле

$$I_{\text{эл}} = \eta B_r [\text{св}], \quad (2)$$

где  $\eta$  — к. п. д., свойственный данному элементу оптической системы;

$B_r$  — яркость рассматриваемой зоны кратера, имеющей радиус  $r$ , в направлении данного элемента.

При этих условиях считается, что зона конечных размеров представляет собой в проекции на световое отверстие кольцо с площадью, равной

$$Q = 4\pi f^2 \left( \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_2}{2} - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha_1}{2} \right) [\text{см}^2], \quad (3)$$

где  $f$  — фокусное расстояние данной зоны;

$\alpha_2$  и  $\alpha_1$  — углы, ограничивающие световое отверстие данной зоны.

Тогда осевая сила света зоны будет определяться уравнением

$$I_{\text{оз}} = k_0 I_{\text{эл}} Q, \quad (4)$$

где  $k_0$  — коэффициент, характеризующий уменьшение силы света под влиянием того, что ось каждого элементарного изображения не совпадает с осью зонального пучка. Величина  $k_0$  при известном  $\theta$  определяется на рис. 3 графически. При распространенном методе построения всем элементам поверхности данной зоны приписывается одно и то же значение  $k_0$ , так как для всех их величины  $\beta_L$ ,  $\Delta\phi$ ,  $\beta$ , считаются одинаковыми. Следовательно, и здесь при усреднении величин снова допускается ошибка.

Для того чтобы определить силу света в световом пучке от данной зоны под некоторыми углами  $\beta$  от оси зоны, построим полукруги равных углов (рис. 3, внизу слева), проведем девять радиусов и найдем десять величин  $k_1$  определяя, при каких значениях относительных величин сил света происходит пересечение радиусов с данным полукругом равных углов. Этот процесс достаточно длителен, труден вследствие густоты линий в нижней части рис. 3 и не гарантирует достаточной точности определения величин  $k_1$ .

Таким образом, мы видим наличие ряда недостатков в методике Бенфорда и невозможность применения ее для решения некоторых задач по расчету кривых распределения силы света в зональном, а также и в прожекторном пучке.

Усовершенствовать эту методику возможно лишь применением принципа элементарных изображений источника света, предложенного почти 60 лет назад Владимиром Николаевичем Чиколевым. При этом следует отказаться от представления, что все элементарные изображения от элементов данной зоны являются одинаковыми и

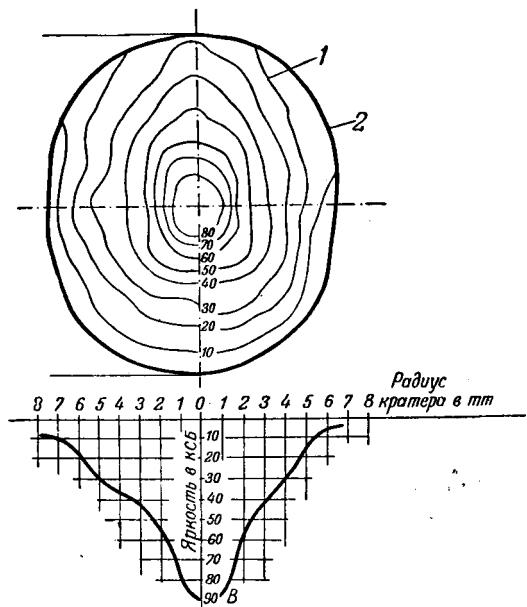


Рис. 6. Яркостная характеристика кратера под углом  $\alpha$ . 1 — кривые равной яркости; 2 — увеличенное изображение кратера под углом  $\alpha$ .

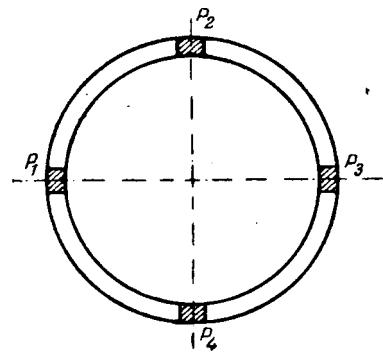


Рис. 7.

что все малые площадки на зоне обладают одними и теми же свойствами. Тогда при расчете можно получить более точные результаты и, кроме того, усовершенствованная при помощи принципа В. Н. Чиколева методика окажется применимой к решению и некоторых новых задач.

Пусть получено сильно увеличенное изображение кратера анода дуги повышенной яркости на некотором экране, при условии, что ось анода образует в горизонтальной плоскости угол  $\alpha$  с нормалью к поверхности экрана. Пусть далее произведено измерение освещенности в нескольких точках этого изображения и вычислены яркости соответствующих участков поверхности кратера. На основании этих измерений и вычислений получены кривые равной яркости на поверхности кратера (рис. 6), представленные в верху, а снизу вычерчена кривая изменения яркости по горизонтальному диаметру этого изображения. Возьмем теперь кольцевую зону на поверхности отражателя, положение середины которой определяется тем же углом  $\alpha$  (рис. 2). Тогда, очевидно, из элементов  $P_1$  и  $P_3$  (см. также рис. 2), расположенных на горизонтальном диаметре зоны, кратер будет усматриваться именно в таком виде, как представлено на рис. 6.

Что же касается элементов  $P_2$  и  $P_4$ , то для получения элементарных изображений, даваемых этими элементами, следовало бы получить увеличенное изображение кратера при условии, чтобы ось анода образовала с нормалью к экрану тот же угол  $\alpha$ , но в вертикальной плоскости.

Таким образом, для каждой зоны желательно иметь хотя бы две характеристики кратера, подобные представленной на рис. 6 и снятые под углом  $\alpha$  в горизонтальной

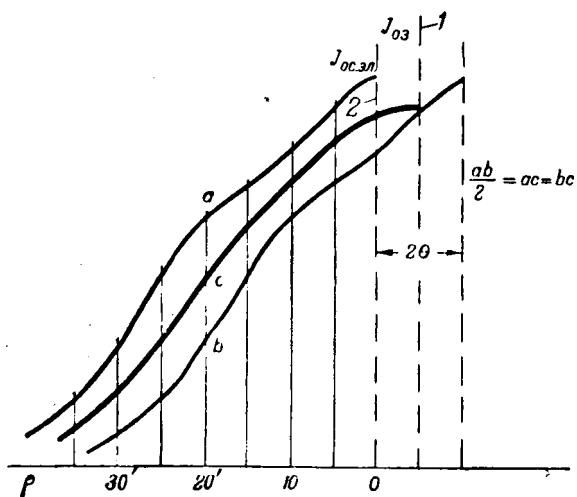


Рис. 8. Кривая распределения силы света от двух элементов  $P_1$  и  $P_3$  может быть получена суммированием ординат кривых силы света элементарных пучков.

1 — ось зонального пучка; 2 — ось элементарного изображения от элемента  $P_8$ ; 3 — ось элементарного изображения от элемента  $P_1$ .

и вертикальной плоскостях. Для получения двух кривых распределения силы света прожектора в горизонтальной и вертикальной плоскостях необходимо иметь 12 таких характеристик кратера (для шести зон и по две для каждой зоны).

На основании двух кривых яркости кратера, одна из которых представлена на рис. 6 внизу, получим кривую распределения силы света в горизонтальной плоскости в пучке от двух элементов зоны  $P_1$  и  $P_3$ . Для этого достаточно на рис. 8 справа построить кривую для элемента  $P_3$ , затем отложить влево от оси этого элементарного изображения найденную для него величину  $\theta_3$ , построить ось зонального пучка и от нее снова отложить величину  $\theta_1$  и построить кривые яркости для элемента  $P_1$ . Кривая распределения силы света в горизонтальной плоскости в пучке от этих двух элементов  $P_1$  и  $P_3$  найдется суммированием ординат двух кривых.

Аналогично может быть получена кривая силы света в пучке от двух элементов  $P_3$  и  $P_4$ . Заметим, что все другие элементы зоны, расположенные в промежутках между  $P_1$  и  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$  и т. д., будут давать пучки с промежуточными харacterистиками Конечно, это является некоторым приближением, так как элементы зоны, расположенные в промежутках, могут иметь свой  $\theta$ , однако свойства всех элементов зоны будут учены в большей степени, чем при использовании методики Бенфорда.

Кривая распределения силы света в горизонтальной плоскости в пучке, отраженном от всей зоны, получается суммированием ординат двух кривых: одной для элементов  $P_1$  и  $P_3$  и другой для элементов  $P_2$  и  $P_4$ . Осевая сила света в зональном пучке может быть вычислена по формуле

$$I_{o3} = I'_{s1} Q_{CB}, \quad (5)$$

где  $I'_{\vartheta}$  — средняя осевая сила света из четырех значений для элементов  $P_1 - P_2$  и  $P_3 - P_4$ :

$$I'_{\text{ext}} = \frac{I'_1 + I'_2 + I'_3 + I'_4}{4} .$$

Теперь сравним результат с данными, которые были бы получены при построении по методу, указанному на рис. 3. Величина  $k_0$  в уравнении (4) на основании рис. 3 равна

$$\theta = \frac{I'_{\theta,1}}{I_{0,1}}. \quad (6)$$

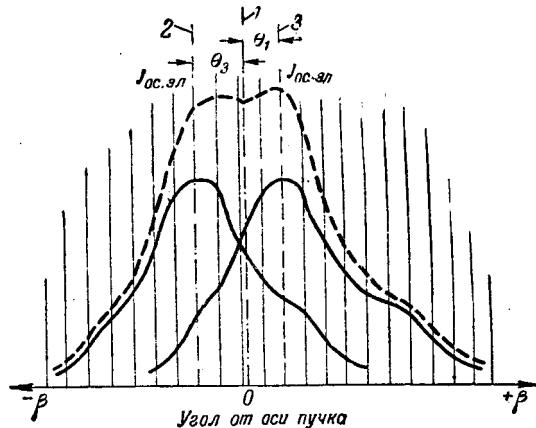


Рис. 9. Построение кривой распределения силы света в зональном пучке по двум кривым силы света в элементарных пучках с одинаковыми свойствами.

1 — ось светового пучка от зоны; 2 — ось элементарных изображений.

Следовательно, уравнения (4) и (5) совершенно одинаковы. Сила света под углом  $\beta$  к оси зонального светового пучка при построении по методу Бенфорда определяется как

$$I_{\beta 3} = \frac{1}{n} I_{0\beta A} Q \sum_{i=1}^{i=n} k_i \cdot \text{CB.} \quad (7)$$

Но, обращаясь к рис. 3, можно видеть, что

$$k_i = \frac{I_{\vartheta \pi i}}{I_{0\pi i}}, \quad (8)$$

поэтому

$$I_{\beta 3} = \frac{1}{n} Q \sum_{i=1}^{i=n} I_{\beta, i} c_B, \quad (9)$$

а это уравнение полностью отвечает примененной на рис. 8 методике суммирования сил света от четырех элементарных изображений и методике вычисления осевой силы света в зональном пучке по формуле (5).

На основании изложенного легко установить, что построение кривой распределения силы света в зональном пучке при условии, когда все элементы поверхности колецевой зоны отражателя обладают одними и теми же свойствами и когда предполагается, что кратер дуги  $\gamma$  сматривается из всех этих элементов в одном и том же виде, значительно упрощается по сравнению с построением, выполненным на рис. 3. В самом деле, если  $\theta$  и  $\gamma$ , для всех элементов одинаковы, и кривые распределения силы света в каждом элементарном пучке одни и те же, то можно построить две эти кривые (как бы для двух элементов), как это показано на рис. 9. Для получения зональной кривой достаточно найти ординаты, равные  $\frac{I'_{\text{зл}} + I''_{\text{зл}}}{2}$ ,

затем определить величину осевой силы света по формуле (4) и, таким образом, будет получена кривая зависимости распределения силы света в световом пучке от данной зоны.

данной зоны.

Рассмотренная здесь методика расчета кривой силы света прожектора, позволяет решать обратные задачи такого характера. Например, требуется найти яркостные характеристики источника света по кривой распределения силы света прожектора, заданной, исходя из некоторых соображений, или полученной путем фотометрических измерений. Эта задача решается следующим образом.

Если известно, на каком расстоянии фотометрировался прожектор, и имеются необходимые данные об отражателе, то последний разделяется на шесть зон и для каждой зоны определяется величина  $\theta$ . Если же расстояние фотометрирования, вообще говоря, велико, то величина  $\theta$  принимается равной угловой aberrации, установленной стандартом для данного типа отражателей. После

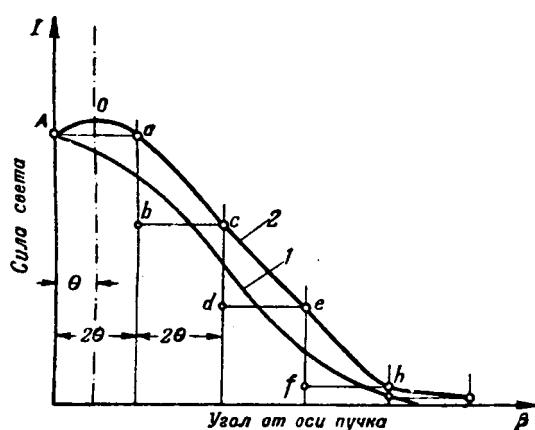


Рис. 10. Построение яркостной характеристики кратера анода по кривой распределения силы света в зональном пучке.

1 — данная зональная кривая силы света; 2 — искомая кривая яркости.

того как величины  $\theta$  найдены, все ординаты заданной кривой силы света прожектора делятся на шесть частей в отношении

$$\frac{I_{3z}}{I_{3\text{pr}}} = \frac{Q_z}{Q_{\text{pr}}} \cdot \frac{\theta_{cp}}{\theta_z}, \quad (10)$$

где  $I_{3z}$  и  $I_{3\text{pr}}$  — соответственно сила света в зональном пучке под углом  $\theta$  к его оси и сила света в световом пучке прожектора под тем же углом;

$Q_z$  и  $Q_{\text{pr}}$  — площадь светового отверстия зоны и всего прожектора:

$$\theta_p = \frac{\theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_6}{6};$$

$\theta_z$  — угловое удаление оси элементарного изображения от оси пучка данной зоны.

На основании такого деления ординат кривой распределения силы света прожектора могут быть получены приближенные значения ординат зональных кривых сил света и построена любая из этих кривых или все шесть кривых.

Пользуясь каждой из этих кривых, можно получить кривую силы света в элементарном пучке от данной зоны. Для этого поступают следующим образом.

От точки  $A$  зональной кривой силы света рис. 10 по перпендикуляру к оси ординат откладываем  $2\theta_z$  и получаем точку  $a$ . Из точки  $a$  опускаем перпендикуляр к оси абсцисс и по нему от точки  $a$  откладываем вниз двойное расстояние между точкой  $a$  и зональной кривой силы света, в результате получаем точку  $b$ . От этой точки  $b$  откладываем по перпендикуляру к оси ординат

отрезок  $2\theta_z$  и получаем точку  $c$ . От точки  $c$  вниз по перпендикуляру к оси абсцисс откладываем двойное расстояние между точкой  $c$  и кривой и т. д. и т. д. Ясно, что точки  $a, c, e$  принадлежат интересующей на кривой распределения силы света в элементарном пучке, по которой легко определить яркостную характеристику источника света, установленного в данный прожектор. Точку  $o$  максимальной яркости определим, руководствуясь тем, что при известной осевой силе света в световом пучке от данной зоны известна и максимальная яркость в направлении данной зоны.

Таким образом, применяемая в настоящее время методика расчета и построения теоретических кривых распределения силы света прожекторов может быть усовершенствована на основе использования классического наследства В. Н. Чиколева и в первую очередь более полного учета свойств элементарных изображений источника света, предложенный В. Н. Чиколевым, положен в основу современной теории прожекторов и применен Бенфордом для исследования свойств прожекторов с источниками света различной формы.

Работа В. Н. Чиколева по теории прожекторов не утратила своего значения. Все последующие этапы развития этой теории связаны с применением к новым задачам метода, указанного В. Н. Чиколевым. И мы с гордостью отмечаем, что наш замечательный соотечественник В. Н. Чиколев является основоположником теории прожекторов.

#### Литература

1. В. Н. Чиколев, В. А. Тюри и Р. Э. Классо и др. Осветительная способность прожекторов электрического света (издано по распоряжению Главного артиллерийского управления), ч. I и ч. II. СПБ, 1892.
2. Ф. Бенфорд. Теория прожектора (перевод с английского) ОНТИ, 1935.
3. D. Hamsher. Screen Line Test of Paraboloid Reflectors. Journal of the Optical Society of America, p. 291—295, May, 1946.
4. И. Б. Левитин. Параболические прожекторы. ОНТИ, 1936.
5. Н. А. Каракин. Прожекторы (теория и расчет). Госэнергоиздат, 1944.
6. И. Д. Артамонов. Корабельные прожекторные установки (теория, материальная часть, эксплуатация). Военное издательство Министерства Вооруженных сил СССР, 1947.



## Из воспоминаний В. В. Запольской о В. Н. Чиколеве

Владимир Николаевич Чиколев родился в 1845 г. в Смоленской губ., в сельце Песках Гжатского уезда. Он очень рано осыпался и с 7 лет со своими братьями Алексеем и Александром находился на попечении своего дяди, брата матери, Петра Дмитриевича Нелюбова. Дядя отвез его в Москву и отдал в Александровский сиротский кадетский корпус, где он в течение всего курса проявлял большие способности,шел одним из первых учеников, усердно занимаясь физикой, особенно электричеством.

Уже в корпусе отец отличался очень самостоятельными и остроумными суждениями, которые привлекли внимание преподавателя физики, разрешившего ему посещать физический кабинет для занятий любимыми предметами — физикой и электричеством — во всяком время.

В 1863 г. отец вышел из корпуса и поступил вольнослушателем на физико-математический факультет Московского университета. Отец в это время жестоко нуждался и жил на случайные заработки. Он научился стенографии и начал стенографировать и печатать на гектографе для студентов лекции профессоров. Это немножко улучшило его положение.

Каким образом отцу удалось в 22 года попасть в ассистенты к профессору Петровско-Разумовской академии Цветкову, я не знаю. Как будто бы он получил туда приглашение по окончании университета. Отец решил готовиться к экзамену на магистра и в 1868 г. уехал для занятий в Смоленскую губ. к родственникам. Там он познакомился с Альбертиной Францевной Эйсмонд, которая, оставшись сиротой, воспитывалась вместе с сестрой и братом у тетки. Общая сиротская доля сблизила отца с этой девушкой и они в 1869 г. поженились. Отец, попрежнему стремившийся пополнять свои знания, уехал с матерью в Москву, где работал в разных лабораториях, главным образом в лаборатории Технического общества.

В 1872 г. открылась Политехническая выставка, в устройстве физического отдела которой отец принимал самое деятельное участие; он демонстрировал свой электродвигатель и гальваническую батарею. На выставке его отдел обращал на себя всеобщее внимание. После выставки он работал по устройству Политехнического музея, существующего и до сих пор. В этом музее хранятся описания многих изобретений Владимира Николаевича. При музее отец читал популярные лекции по физике и электротехнике. В то время он впервые задумал и свою лампу. Первый ее экземпляр он строил по предложению П. Н. Яблочкива в его оптической мастерской и подал Яблочкиву первые мысли, приведшие к изобретению его «свечи». С этих пор они всегда были в дружбе, прерванной на короткое время, лишь после того, как Владимир Николаевич предсказал недолговечность этой «свечи». После неудачной попытки распространить «свечи» в Петербурге П. Н. Яблочкин уехал в Париж, где отец во время своей командировки вновь посетил его, дружба их возобновилась и продолжалась уже до самой смерти Павла Николаевича. Окончательно лампа отца была создана в 1874 г., хотя и потом он вносил в нее разные изменения и усовершенствования. Различные жизненные неудачи, а главным образом, недостаток материальных средств, вызвали у отца тяжелую нервную болезнь, как тогда называли «нервную

Воспоминания о выдающемся русском электротехнике В. Н. Чиколеве его покойной дочери В. В. Запольской. Публикуются по хранящейся в редакции рукописи в несколько сокращенном виде.

горячку». Он брался за разные дела, но все они оканчивались неудачей. Когда он заболел, мать моя, Альбертина Францевна, вынуждена была поступить в какой-то магазин

кассирующей. Положение отца было тяжелым, но в конце концов, после почти 6-месячной болезни, он поправился. Ему посоветовали поехать в Петербург. В тот период отец был молод, красив, интересно и понятно для всех говорил на совершенно новую, животрепещущую тему об электричестве и его применении. Его лекции в Петербурге имели успех и посещались широкой публикой. После первой же лекции он был приглашен на службу в Артиллерийское ведомство. По своей скромности отец спросил для себя такой мизерный оклад (100 руб. в месяц), что само начальство увеличил его в полтора раза. Мать моя не сидела без дела и прирабатывала, по возможности, в Артиллерийском журнале переводами, компиляциями и пр.

Отец уже совершенно оправился от болезни и принялся за дело со свойственной ему необычайной энергией. Ему приходилось организовывать все дело электротехники в артиллерию с самых азов. Во время этого периода его деятельности вспыхнула русско-турецкая война и он был командирован в действующую армию для освещения ночной переправы через Дунай. Однако, по дороге, в Кишиневе, его сняли с поезда, так как он заболел тифом. В действующей армии его ожидали, и

главнокомандующий, узнав, что он по дороге заболел, издал приказ об особом о нем попечении.

В период с 1878 по 1879 гг., по настоянию и инициативе отца, был создан VI электротехнический отдел Русского технического общества и открыта первая в мире электрическая выставка, главным распорядителем которой был Владимир Николаевич. В 1880 г. по инициативе Владимира Николаевича был основан журнал «Электричество», первый фонд для издания которого (кажется 2 000 руб.) был собран лекциями Чиколева. Он же был и его редактором, работавшим безвозмездно. Вся редакция помещалась в нашей квартире и состояла из отца и моей матери, также безвозмездно работавшей секретарем. Даже я, будучи маленькой девочкой, работала «экспедитором», т. е. клеила адреса и упаковывала связки журналов. У моего отца была замечательная способность заинтересовывать окружающих своим делом и приспособлять их к нему. Так, моя мать была его помощницей во всех его делах и принимала моральное участие во всех его изобретениях, а когда я кончила учиться, то из меня он сделал деятельного себе помощника и секретаря. Кроме того, при отце всегда был какой-нибудь начинающий мастер или отличившийся способностями солдат, которых он практически обучал электротехнике, таким образом, давал в руки ремесло и, как говорили тогда, «выводил в люди». В этой связи вспоминают, например, Михаила Павлова, который вначале помогал отцу, а потом долго служил электротехником на Охтенском пороховом заводе. Вспоминая о жизни отца, я не имею в виду и не имею возможности писать о сущности его научной деятельности, с которой, естественно, я была знакома недостаточно.

В 1881 г. в Париже состоялся Всемирный конгресс электриков, на который был командирован представителем



от России В. Н. Чиколев. Во время Венской электротехнической выставки отец был приглашен в качестве известного популярного лектора для чтения лекций; от чтения лекций он по болезни должен был отказаться, хотя выставку эту же посетил. В тот период Сименс предлагал отцу возглавить Лондонское отделение фирмы Сименс с очень большим окладом, но отец отказался от этого материально выгодного предложения, не желая уходить с государственной службы в своем отечестве. Впоследствии Сименс много раз предлагал отцу приехать в Берлин, но отец решительно отклонял эти предложения.

В последнюю его командировку за границу, в 1897 г., фирма Шуккерт в Нюрнберге предлагала отцу 30 000 марок (15 000 руб.) в год, готовую квартиру с отоплением и освещением и проч. Отец и в этот раз отказался, не желая расставаться с родиной и переходить на частную и тем более иностранную службу.

В 1883 г. отец спроектировал новый прожектор, который при испытании не уступал манженовскому, а в некоторых отношениях превосходил его. Русское военное ведомство отнеслось без внимания к этой конструкции отца. Так неправильно ценили в дореволюционное время в России талантливых людей, оставляя часто без должного внимания их открытия и усовершенствования.

Во время войны 1914—1918 гг. возник вопрос о том, где найти данные об этом прожекторе, спроектированном В. Н. Чиколевым и очень необходимом для русской армии. Я обратилась с письмом к председателю Артиллерийского комитета с просьбой аудиенции по этому вопросу, в чем мне, однако, было отказано.

В 1892 г. отец изложил теорию прожекторов в сотрудничестве с Тюриным, который делал по его указанию математические вычисления. Тогда же он предложил проверять правильность шлифовки параболических зеркал фотографированием. Заводы соответственно с этим усовершенствовали технологию, перестроили шлифовальные станки и изменили методы шлифовки. С тех пор и до сего дня зеркала прожекторов проверяются этим способом.

В 1895 г. отец производил опыты применения фотографии к измерению скорости полета снарядов. Не смогу перечислить всех мелких и крупных изобретений и усовершенствований, сделанных В. Н. Чиколевым в течение двадцатилетней его службы, так как они относились к артиллерии и часто к ее секретной области, о которой мы с матерью, конечно, не знали.

Техническое общество, для которого он так много сделал, не ценило его, и, когда там открылась вакансия заведующего электрическим устройством, которую хотел бы занять мой отец, Общество пригласило кого-то другого. В конце жизни Владимир Николаевич получил от VI отдела Технического общества еще одно глубокое огорчение. Дело было так: в то время вся техническая молодежь увлекалась переменным током, а отец твердо стоял за постоянный ток. Отдавая должное переменному току во многих случаях, будущее отец все же считал за постоянным током. Отца сочли отсталым, только потому, что он не разделял этого общего увлечения. И вот при выборах действительных членов VI отдела, одним из создателей которого был отец, его забаллотировали. Отец оскорбился и вовсе вышел из членов Технического общества.

В 1882 г. в Петербурге было учреждено Акционерное общество для эксплоатации электрической лампы, сконструированной отцом. Обществу было поручено устройство освещения Невского проспекта.

Освещение Невского проспекта было не первым опытом электрического освещения в Петербурге. Отец всячески старался популяризовать электричество и электрическое освещение, и когда даже в печати раздавались голоса против применения электричества, со ссылкой на сложность установок или на опасность проводки электрического освещения, отец всегда опровергал все это и в печати, и на своих лекциях, и для доказательства необоснованности этих утверждений выхлопотал разрешение городского управления устроить пробное освещение Дворцового моста. Второй подобный же опыт был произведен на площади Александринского театра, причем вся установка была сделана в один день, и в назначенный заранее час площадь была освещена.

Более длительно существовало освещение «свечами» Яблочкива постройки Литейного моста и затем — освещение этого моста в первые годы после его открытия. «Свеча» Яблочкива была в дальнейшем заменена дифференциальными лампами Чиколева. Этими лампами Петербург освещался не один десяток лет, до тех пор, пока не был осуществлен переход на лампы накаливания.

Вскоре после появления ламп накаливания, мой отец провел электрическое освещение в своей квартире, поставив для этого в соседнем сарае газовый двигатель и динамомашину. Здесь он впервые применил распределительный щит с контрольными приборами. Для популяризации электрического освещения он предлагал всем желающим осматривать его установку. Это была тогда первая и единственная в Петербурге квартира, освещенная электричеством. Я не помню, было ли оно уже в это время в Зимнем дворце или еще нет.

По инициативе отца и его трудами при Орудийном заводе была устроена электротехническая мастерская и лаборатория, снабженная всеми новейшими современными приборами. По его же инициативе при Главном артиллерийском управлении были устроены офицерские электротехнические курсы, на которых он читал лекции.

В 1890 г. отцом была построена электрическая лодка «электроход», приводимая в движение аккумуляторами и долго служившая для тяги баржей с порохом с Охтенского порохового завода на Медвежий стан в пороховые погреба.

Серьезно заболел отец в 1896 г., вскоре после крушения дрезины при выезде из батареи на Главном артиллерийском полигоне. Рукоятка сошедшей с рельсов дрезины сильно ударила отца в бок и вызвала воспаление желчных протоков. Он прихвривал всю осень, а с начала января 1897 г. окончательно слег. В последний день своей жизни он начал заговоряться, до тех пор голова его была совершенно свежа. Непосредственной причиной его смерти (в 1898 г.) было заражение крови от гнойного воспаления желчных протоков.

Похоронили отца на Никольском кладбище Александро-Невской лавры, причем рабочие Орудийного завода, любившие В. Н. Чиколева за доброту и простоту обращения и считавшие его своей славой и гордостью (я сама слышала это от них), на руках несли гроб от квартиры до церкви и потом до могилы. В далекие годы при посещении его могилы мне не раз случалось встречать на ней помнивших его пожилых рабочих Орудийного завода.

Владимир Николаевич был человеком редкой нравственной чистоты и порядочности, кроткого и терпеливого характера. Такую репутацию имел он в широких кругах. Обладая сам необыкновенной энергией и трудоспособностью, отец умел заставить работать и окружающих. Он любил окружать себя молодежью, которую ему всегда удавалось заинтересовать. Он принимал непосредственное участие во всех наших летних развлечениях, считая, что зима для работы, а летом можно заняться и удовольствиями. Он устраивал спектакли, живые картины с разными осветительными эффектами, гонки на лодках и придумывал много других развлечений и игр. Молодежь толпой сопровождала его на всех прогулках, слушая его рассказы и объяснения явлений природы в доступном изложении.

Семейная жизнь моих родителей была исключительно счастливой. Они всю жизнь глубоко любили и ценили друг друга. Материально отцу моему очень не везло в жизни. Ни одно из его изобретений — даже лампа — не принесло ему никакой выгоды. Так отец мой прожил всю жизнь бедным человеком.

Отца приглашали читать лекции по электротехнике в б. Михайловском артиллерийском училище и в Артиллерийской академии, но, страдая астмой, он не мог много и долго говорить и должен был отказаться.

Он любил собирать у себя своих друзей ученых и профессоров. В такие дни он хлопотал об устройстве «электрического чая», к которому подавалось, по возможности, все в виде электрических приборов и приспособлений, например, торт в виде большого коммутатора на несколько направлений, вафельное печенье в виде аккумуляторов и т. п. Из бывавших у него помню Д. А. Лачинова (боль-

шого друга нашей семьи), проф. Н. Г. Егорова и некоторых других. Владимир Николаевич был приятным, веселым и остроумным собеседником на самые разнообразные темы, когда бывал здоров и в духе.

На моей памяти он уже никогда не бывал ни в театрах, ни в концертах из боязни простуды, но музыку любил и охотно слушал ее дома. Когда собирались у меня молодежь, он перед сном выходил в гостиную, садился где-нибудь в уголке и наблюдал за нашим весельем.

Отец имел две медали — серебряную и золотую за Политехническую выставку, две медали от Технического общества за многолетние труды по применению электричества к практическим целям, бронзовые медали за Всемирный конгресс электриков в Париже в 1881 г. и за Парижскую выставку того же года.

После отца осталось 28 печатных трудов, не считая статей, появлявшихся в периодической печати.

Большинство трудов В. Н. Чиколова было издано Артиллерийским журналом и вообще артиллерийским ведомством. Некоторые книги были изданы известным издателем научных книг Ф. Павленковым и только последние книги, написанные в девяностых годах, отец издавал "сам.



Из более крупных его работ книга «Применение электрического освещения для военных целей» имела широкое распространение. Работы «О поверке прожекторов электрического света фотографированием» и «Осветительная способность прожекторов электрического света» были переведены на иностранные языки и произвели переворот в изготовлении зеркал для прожекторов. Составленный и изданный им «Справочник для электротехников» был настольной книгой многих инженеров и техников того времени.

Известен его рассказ «Не быть, но и не выдумка», где В. Н. Чиколов фантазирует на тему об «Институте экспериментального электричества». В этом «электрическом рассказе» он сделал много предсказаний, теперь уже осуществившихся, между прочим и предсказание беспроводной телеграфии. В этой книге имеются и автобиографические заметки, и вообще в ней он высказывает и как человек, и как самый горячий приверженец широкого применения электричества. В ней обрисовывается его общий нравственный облик.

Он сам себя называл «дедушкой русской электротехники».

## В комиссии по истории физико-математических наук АН СССР

31 марта с. г. в Ленинграде состоялось заседание Комиссии Академии наук СССР по истории физико-математических наук.

Член-корр. АН СССР М. А. Шателен сделал на этом заседании Комиссии доклад «Из истории изобретения трансформаторов». В интересном истори-

ческом обзоре, посвященном изобретению трансформатора, М. А. Шателен охарактеризовал работы русских ученых и инженеров и отметил их приоритет в области изобретения и развития трансформаторов.

Доклад М. А. Шателена будет опубликован в одном из ближайших номеров журнала «Электричество».



## Новые турбогенераторы на тепловых электростанциях США

В журнале Power за 1946 и 1947 гг. приведены технические данные большого числа новых тепловых электростанций и гидроэлектростанций США и Канады, вступивших в эксплуатацию с сентября 1941 г. по июль 1946 г. [Л. 1], а также сооруженных или заказанных со сроком вступления в эксплуатацию с сентября 1946 г. по 1950 г. [Л. 2]. То, что в американском журнале систематически приводятся данные новых энергетических установок совместно для США и Канады без каких-либо оговорок на этот счет, показывает, насколько далеко пошло сращивание экономики США и Канады. В указанных статьях даются технические характеристики тепломеханического и гидромеханического оборудования, а также генераторов значительного числа типичных новых установок. На основании этих данных можно сделать некоторые выводы, касающиеся практики применения генераторов на тепловых электростанциях США. В табл. 1 сведены данные 82 генераторов на общую мощность 2 880 000 kW типичных паротурбинных установок, вступивших в эксплуатацию с сентября 1941 г. по июль 1946 г., а в табл. 2—85 генераторов на общую мощность 3 715 000 kW аналогичных установок, сооруженных или заказанных со сроком вступления в эксплуатацию с сентября 1946 г. по 1950 г. В таблицы включены генераторы мощностью 10 000 kW и выше.

Эти сводки дают возможность судить о распределении генераторов по мощностям, числу оборотов в минуту и способу охлаждения (воздушное и водородное). Мощности генераторов в киловаттах соответствуют номинальным мощностям турбоагрегатов. До утверждения в 1945 г. рекомендованных стандартов AIEE на турбогенераторы мощностью более 10 000 kW [Л. 3], мощности турбин выбирались обычно на 25% больше номинальной мощности турбоагрегата. Под мощностью турбины понималась гарантированная длительная отдаваемая мощность на выводах генератора при условии, что турбина находится в чистом состоянии и работает при обусловленных давлениях и температуре пара перед впускным вентилем и давлении отработавшего пара, с полным отбором из всех точек отбора. По названным выше стандартам превышение мощности турбины над номинальной мощностью турбоагрегата принято равным 10%.

Хотя материалы журнала Power охватывают только часть новых установок, и неизвестно, по какому признаку редакция отбирала типичные установки, все же некоторые интересные выводы как из каждой таблицы, так и из сопоставления данных одной таблицы, относящейся к 1941—1946 гг., и другой таблицы, относящейся к 1946—1950 гг., могут быть сделаны.

Прежде всего следует отметить укрупнение генераторов. Средняя мощность генераторов для табл. 1—35 000 kW, а для табл. 2—43 500 kW.

Указанный в табл. 1 один генератор мощностью 100 000 kW, установлен на электрической станции Glen Lyn (Западная Вирджиния) [Л. 4]. Он выполнен с водородным охлаждением на 1 800 об/мин, для напряжения 13,8 kV. При избыточном давлении водорода 0,035 kg/cm<sup>2</sup> генератор имеет мощность 111 000 kVA при  $\cos \varphi = 0,9$ , а при 1,06 kg/cm<sup>2</sup>—128 000 kVA при  $\cos \varphi = 0,87$ . Генератор был заказан в 1941 г. и включен в работу в 1944 г.

Указанный в той же таблице генератор мощностью 147 000 kW установлен на электрической станции Fisk в Чикаго [Л. 5]. Он выполнен с воздушным охлаждением на 1 800 об/мин для напряжения 12,6 kV и  $\cos \varphi = 0,85$  и включен в работу в 1943 г.

Значительно больше число генераторов мощностью 100 000 kW и выше в табл. 2. Три генератора по 100 000 kW с водородным охлаждением на 3 600 об/мин заказаны для электрической станции Sewaren в штате Нью-Джерси (два генератора со сроком вступления в эксплуатацию в 1948 г. и один в 1949 г.) и один такой же генератор заказан для электрической станции Essex в Ньюарке (штат Нью-Джерси) со сроком вступления в эксплуатацию в 1947 г. Один генератор мощностью 100 000 kW с водородным охлаждением на 1 800 об/мин заказан для станции Tidd в Бриллианте (штат Охайо) со сроком вступления в эксплуатацию в 1948 г.

Один генератор мощностью 150 000 kW с водородным охлаждением на 1 800 об/мин заказан для станции Fisk со сроком вступления в эксплуатацию в 1949 г.

Кроме того, один двухвальный турбоагрегат мощностью 150 000 kW вступил в работу в 1947 г. на электрической станции Southwark в Филадельфии [Л. 6 и 7]. Оба генератора рассчитаны на напряжение 13,8 kV и суммарную мощность 187 500 kVA при  $\cos \varphi = 0,8$  при давлении водорода 0,035 kg/cm<sup>2</sup> (один генератор 65 000 kW, 81 250 kVA при 3 600 об/мин, второй 85 000 kW, 106 250 kVA при 1 800 об/мин). Турбоагрегат может длительно работать с мощностью 168 750 kW, 187 500 kVA при  $\cos \varphi = 0,9$  и при давлении водорода 0,035 kg/cm<sup>2</sup>.

Таблица 1

Данные генераторов мощностью 10 000 kW и выше типичных паротурбинных установок, вступивших в эксплуатацию с сентября 1941 г. по июль 1946 г.

Мощность генератора, kW	Число генераторов на 3 600 об/мин		Число генераторов на 1 800 об/мин	
	с воздушным охлаждением	с водородным охлаждением	с воздушным охлаждением	с водородным охлаждением
10 000 <sup>1</sup>	9	—	1	—
12 500 <sup>1</sup>	2	—	—	—
15 000 <sup>1</sup>	4	2	—	—
20 000 <sup>1</sup>	3	2	—	—
22 500	—	1	—	—
25 000	—	6	—	—
30 000	2	5	—	—
31 250	—	1	—	—
35 000	—	2	—	—
37 500	—	5	—	—
40 000	—	2	—	—
45 000	—	2	—	—
50 000	1	8	6	—
60 000	—	2	4	—
65 000	—	2	—	—
75 000	—	2	2	—
100 000	—	—	—	1
147 000	—	—	1	—
Всего		21	42	14
				1

<sup>1</sup> Для одного генератора этой мощности на 3 600 об/мин не указан способ охлаждения.

Таблица 2

Данные генераторов мощностью 10 000 kW и выше типичных паротурбинных установок, сооруженных или заказанных со сроком вступления в эксплуатацию с сентября 1946 по 1950 г.

Мощность генератора, kW	Число генераторов на 3 600 об/мин <sup>1</sup>		Число генераторов на 1 800 об/мин	
	с воздушным охлаждением		с водородным охлаждением	
	с воздушным охлаждением	с водородным охлаждением	с воздушным охлаждением	с водородным охлаждением
10 000 <sup>2</sup>	3	—	—	—
15 000	2	4	—	—
18 750	—	1	—	—
20 000	—	4	—	—
22 500	—	1	—	—
25 000	—	9	—	—
30 000	—	9	1	—
35 000	—	5	—	—
37 500	—	3	—	—
40 000 <sup>3</sup>	—	3	—	—
43 750	—	2	—	—
44 000	—	1	—	—
45 000	—	1	—	—
50 000	—	5	1	—
60 000	—	12 <sup>1</sup>	—	2
65 000 <sup>4</sup>	—	3	—	—
75 000	—	—	1	—
80 000	—	1	—	1
85 000 <sup>4</sup>	—	—	—	1
100 000	—	4	—	1
150 000	—	—	—	1
Всего	5	68	3	6

<sup>1</sup> В том числе два генератора на 3 000 об/мин, 50 Hz.

<sup>2</sup> Для одного генератора мощностью 10 000 kW на 3 600 об/мин не указан способ охлаждения и для одного генератора такой же мощности не указаны ни число оборотов, ни способ охлаждения.

<sup>3</sup> Для одного генератора мощностью 40 000 kW на 3 600 об/мин не указан способ охлаждения.

<sup>4</sup> Один генератор 65 000 kW на 3 600 об/мин и генератор 85 000 kW на 1 800 об/мин являются генераторами двухвальной паровой турбины мощностью 150 000 kW.

За исключением двух генераторов по 60 000 kW, указанных в табл. 2 и рассчитанных на 3 000 об/мин и 50 Hz, все остальные генераторы в табл. 1 и 2 изготовлены или заказаны для трехфазного тока 60 Hz. Из этого следует, что в США преимущественное развитие получают установки на 60 Hz, а удельный вес сетей с частотой 50 Hz и другими частотами все время уменьшается.

Поражает чрезмерная градация мощностей турбоагрегатов; подобная шкала мощностей является следствием хаотичности и беспланности развития энергетики, так же как и других отраслей хозяйства, в капиталистических условиях. Такое многообразие мощностей, несомненно, должно значительно увеличивать затраты на изготовление турбоагрегатов и усложнять их эксплуатацию.

Рекомендованные стандарты AIEE 1945 г. устанавливали для диапазона от 10 000 до 60 000 kW шесть номинальных мощностей турбоагрегатов (11 500, 15 000, 20 000, 30 000, 40 000 и 60 000 kW). Для этого же предела мощностей в табл. 1 имеется 14 разных номинальных мощностей генераторов, а в табл. 2 даже 15 разных мощностей. Утверждение в 1945 г. AIEE стандартов на крупные турбогенераторы сказалось только в том, что если за 1941—1946 гг. для мощностей от 10 000 до 60 000 kW 22 генератора из 60 по номинальной мощности и числу оборотов соответствовали стандартам AIEE 1945 г., то за 1946—1950 гг. из 64 генераторов тех же мощностей 32 генератора по тем же данным соответствовали стандартам. Общее же число разновидностей турбоагрегатов по мощностям даже увеличилось—с 14 до 15.

Следует отметить все большее применение двухполюсных генераторов: в табл. 2, несмотря на значительное увеличение средней мощности генераторов, имеется 75 двухполюсных машин и 9 четырехполюсных, в то время как в табл. 1 имеется 67 двухполюсных и 15 четырехполюсных машин.

В 1941—1946 гг. верхний предел мощности для генераторов на 3 600 об/мин с водородным охлаждением был 75 000 kW, а затем этот предел для генераторов с водородным охлаждением поднялся до 100 000 kW, причем из пяти генераторов на такую мощность четыре изготавливаются на 3 600 об/мин.

Мощность 100 000 kW для генератора на 3 600 об/мин при водородном охлаждении, повидимому, уже в настоящее время не является пределом, так как сообщается о том, что разрабатывается конструкция генератора мощностью 150 000 kW на 3 600 об/мин [Л. 8]. Само собой разумеется, что только водородное охлаждение дает возможность такого увеличения мощности генераторов на 3 600 об/мин.

Важнейшим выводом, который должен быть сделан из рассмотрения табл. 1 и 2, является то, что водородное охлаждение получило исключительное распространение и что для мощностей генераторов 1500 kW и выше генераторы с воздушным охлаждением почти совершенно не применяются. Если в 1941—1946 гг. для мощностей генераторов 15 000 kW и выше 43 машины выполнены с водородным охлаждением и 23 машины с воздушным (табл. 1), то для установок со сроком вступления в эксплуатацию 1946—1950 гг. 74 машины выполняются с водородным охлаждением и лишь 5 машин—с воздушным (табл. 2).

Водородное охлаждение начинают применять и для машин на 1 800 об/мин, для которых оно дает относительно меньшие выгоды, чем для машин на 3 600 об/мин. В табл. 1 из 15 машин на 1 800 об/мин только одна выполнена с водородным охлаждением, а в табл. 2 из 9 таких машин уже 6 изготавливаются с водородным охлаждением. По табл. 2 все без исключения генераторы на 3 600 об/мин мощностью выше 15 000 kW изготавливаются с водородным охлаждением. Важно отметить также, что водородное охлаждение начинает все шире применяться и для генераторов меньшей мощности, чем это рекомендуется стандартами AIEE 1945 г. По этим стандартам рекомендуется генераторы мощностью 11 500 и 15 000 kW выполнять с воздушным охлаждением, а генераторы 20 000 kW и большей мощности с водородным охлаждением. По данным табл. 1 из 6 генераторов мощностью 15 000 kW 4 выполнены с воздушным охлаждением и 2 с водородным, а по табл. 2 для более позднего периода из 6 генераторов такой же мощности уже 4 генератора изготавливаются с водородным охлаждением и лишь 2 с воздушным.

Приведенные данные, в частности, показывают необоснованность утверждения Г. С. Плисса [Л. 9], что водород нашел широкое применение в США в качестве охлаждающей среды лишь для турбогенераторов мощностью в 35 000 kW и выше. Водородное охлаждение турбогенераторов нашло распространение для агрегатов 15 000 kW и выше. По американским данным цена генератора с водородным охлаждением, включая вспомогательное оборудование, равна цене генератора с воздушным охлаждением соответствующей мощности [Л. 10]. При водородном охлаждении увеличение эксплуатационных расходов относительно мало, а усложнение обслуживания при полной автоматизации и высокой надежности отдельных элементов вспомогательного оборудования несущественно. Выгоды же, которые дает применение водородного охлаждения турбогенераторов, в результате значительного повышения к. п. д. генератора, увеличения надежности и долговечности его работы, возможности перегрузки генератора на 15% при увеличении давления водорода с 0,085 kg/cm<sup>2</sup> до 1,0 kg/cm<sup>2</sup>, настолько велики, что область применения этого способа охлаждения расширилась, распространившись на турбогенераторы, начиная с мощности 15 000 kW при 3 600 об/мин, и на генераторы большой мощности при 1 800 об/мин.

В обзорах журнала Power [Л. 1 и 2] не приводятся данные номинальных напряжений паротурбинных генераторов. В стандартах AIEE 1945 г. рекомендуются для таких

генераторов мощностью от 11 500 до 60 000 kW номинальные напряжения: 11,5; 12,5; 13,8; 14,4 kV в связи с тем, что все эти напряжения распространены в действующих установках. Конечно, никакими техническими или экономическими соображениями нельзя обосновать включение в стандарт столь близких друг к другу значений иоминальных напряжений для генераторов. Это, несомненно, является также следствием хаотичности развития капиталистического электрохозяйства США.

В тех же обзорах журнала Power для генераторов новых гидроустановок приводятся данные номинальных напряжений. Для генераторов мощностью от 18 000 kVA и выше широкое распространение в США имеет напряжение 13,8 kV. Имеются с таким напряжением отдельные генераторы мощностью 9 500 kVA и 15 000 kVA. Встречается очень немного установок с напряжением генераторов 6,6; 11,5; 12,5 и 16,5 kV (на напряжение 16,5 kV одна установка — Boulder Dam с мощностью генераторной единицы 82 500 kVA).

На основании приведенных материалов можно сделать следующие выводы относительно основных технических тенденций в установках турбогенераторов на тепловых, электростанциях США.

1. Имеет место укрупнение единичных мощностей генераторов.

2. Почти исключительное распространение получило водородное охлаждение генераторов мощностью 15 000 kW и выше.

3. Все больше увеличивается предел мощности генераторов на 3 600 об/мин. Изготовлены генераторы с во-

дородным охлаждением при 3 600 об/мин мощностью 100 000 kW. Разрабатывается конструкция таких же генераторов мощностью 150 000 kW.

4. Генераторы мощностью выше 10 000 kW выполняются почти исключительно с напряжением 11 500 V и выше. Наибольшее распространение имеет напряжение генераторов 13 800 V. Генераторы с напряжением выше 16 500 V не нашли распространения в США.

### Литература

1. P. W. Swain. Power, т. 90, № 6, стр. 371, 1946.
2. P. W. Swain. Power, т. 91, № 6, стр. 63, 1947.
3. Стандарты AIEE, № 601—602, 1945; El. Eng., т. 64, № 5, 1945; El. World, № 5, стр. 96, 1945; Электричество, № 5, стр. 91, 1946.
4. P. Sproge and E. H. Krieg. Southern Power and Industry, № 12, 1945.
5. New 147 000 kW Unit at Fisk Station. El. Eng., т. 63, № 11, 1944.
6. E. L. Hopping, L. R. Gaty and E. W. Shew. El. World, т. 125, № 25, стр. 70, 1946; т. 126, № 1, стр. 66, 1946; т. 126, № 3, стр. 73, 1946.
7. N. J. Walker and B. E. Hagy. El. Light and Power, т. 24, № 6, стр. 60; № 7, стр. 68, 1946.
8. Westinghouse Eng. т. 7, № 1, стр. 26, 1947.
9. Г. С. Плисс. Электричество, № 6, стр. 5, 1947.
10. D. S. Snell. El. Eng., т. 59, № 1, стр. 35, 1940.

Инж. А. Б. КРИКУНЧИК

### H. L. Darley. Диэлектрические свойства титанатов бария и стронция. *RCA Review*, т. 8, № 3, стр. 539, 1947.

Как показали работы советских исследователей Б. М. Вула и др. [Л. 1, 2], титанат бария, представляющий собой керамический материал с ультравысокой диэлектрической проницаемостью, отличается нелинейной зависимостью диэлектрической проницаемости от напряженности поля. Это свойство данный материал сохраняет до температуры, порядка 120°С, после чего нелинейность исчезает. По аналогии с ферромагнитными материалами эту температуру можно назвать «точкой Кюри», а сам титанат бария можно называть «ферроэлектрическим» материалом. В реферируемой статье приведены результаты исследования нового керамического материала, полученного при добавлении к титанату бария BaTiO<sub>3</sub> некоторого количества титаната стронция SrTiO<sub>3</sub>. Опыт показал, что, изменяя состав, можно резко изменять положение точки Кюри. Для чистого титаната стронция точка Кюри соответствует температуре —200°С. При снижении содержания SrTiO<sub>3</sub> температура, соответствующая точке Кюри, возрастает прямо пропорционально возрастанию содержания BaTiO<sub>3</sub>, достигая для чистого BaTiO<sub>3</sub> +120°С. Подробному исследованию подверглись образцы из трех основных рецептур: 10, 20 и 30% SrTiO<sub>3</sub>.

Проведенные исследования показали, что для материала, содержащего титанаты бария и стронция, можно получать значения диэлектрической проницаемости порядка 5 000—10 000. Этот материал имеет относительно простую технологию и сохраняет нелинейность при высоких частотах, вплоть до 1—10 MHz. Если работать при слабых полях, т. е. не доводить материал до насыщения, то параметры в нем относительно малы: коэффициент мощности имеет значение порядка нескольких процентов. Зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля и от температуры характеризуется наличием резко выраженных максимумов. При понижении температуры максимум зависимости  $\epsilon = f(E)$  сдвигается в сторону более высоких значений напряженности поля  $E$ . Зависимость  $\operatorname{tg} \delta = \varphi(E)$  также имеет максимум, который всегда лежит при мень-

ших значениях  $E$ , чем максимум кривой  $\epsilon = f(E)$ . При переходе от постоянного тока к высокой частоте значения  $\epsilon$  заметно снижаются. Обнаружена заметная зависимость электрических свойств от толщины образца.

Конденсаторы из нового материала могут быть использованы в умножителях частоты. Эта идея, как известно, была высказана впервые В. П. Вологдиным [Л. 3], который дал теоретическое обоснование для изготовления умножителя частоты из керамических материалов с особо высоким  $\epsilon$  и провел первые исследования такого умножителя, изготовленного из титаната бария. Опыты, проведенные автором реферируемой статьи, показали, что при питании цепи, содержащей конденсатор исследуемого типа, чисто синусоидальным напряжением, происходит резкое искажение кривой напряжения, причем особо сильно проявляются третья и пятая гармоники. Автор считает наиболее целесообразным использовать третью гармонику; имеется возможность получать мощность при этой гармонике до  $1/3$  мощности основной частоты, а напряжение того же порядка, что и напряжение основной синусоиды. Наиболее удобным для применения в умножителях частоты оказался материал, содержащий 69% титаната бария и 31% титаната стронция. Указывается также возможность применения конденсаторов из этого материала в схемах преобразования частоты и частотной модуляции.

### Литература

1. Б. М. Вул. Вещества с высокой и сверхвысокой диэлектрической проницаемостью. Электричество, № 3, стр. 12—21, 1946.
2. Г. И. Сканави, Д. М. Казарновский, К. Ф. Караташов. Новые типы высокочастотных керамических конденсаторов. Радиотехника, № 7—8, стр. 83, 1946.
3. В. П. Вологдин. Новый генератор повышенных и высоких частот. Электричество, № 8, стр. 28—32, 1946.

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ



# Хроника

## Конференция читателей журнала „Электричество“ в Москве

9 апреля с. г. в конференц-зале Отделения технических наук АН СССР редакцией журнала «Электричество» совместно с Московским отделением ВНИТОЭ была проведена однодневная конференция читателей журнала «Электричество». Читательская конференция была организована для выявления запросов читателей к журналу с целью дальнейшего улучшения его содержания и устранения имеющихся в журнале недостатков. Такие конференции намечено провести в ближайшее время в Ленинграде и в некоторых других городах.

В работе конференции приняли участие свыше 350 инженеров и научных деятелей — читателей и авторов журнала, работающих на московских заводах и электростанциях, в конструкторских бюро и научно-исследовательских институтах, в проектно-монтажных организациях, в высшей школе, в институтах АН СССР, в Министерстве электростанций, в Министерстве электропромышленности и др.

Председатель МОНITOЭ проф. Б. А. Телешев, открывая конференцию, отметил большую роль научно-технической периодической печати и призвал присутствующих к активному участию в работе конференции.

С докладом о деятельности редакции в 1946 и 1947 гг. и о задачах журнала в 1948 г. выступил редактор журнала «Электричество» заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. Г. Н. Петров.

Докладчик кратко напомнил историю создания старейшего русского научного электротехнического журнала «Электричество». 68 лет назад в Русском техническом обществе, в связи с начавшимся развитием электротехники и потребностью в организации, которая бы объединила кадры русских электротехников и способствовала распространению электротехнических знаний, был создан VI отдел Общества. Одним из первоначальных мероприятий VI отдела было издание специального журнала «Электричество», первый номер которого вышел в июле 1880 г. Инициатором создания журнала и первым его редактором был выдающийся русский электротехник В. Н. Чиколев. Журнал «Электричество» очень быстро сделался центром русской научной электротехнической мысли и летописью развития науки об электричестве и успехов электротехники.

Только после Великой Октябрьской социалистической революции были созданы в нашей стране условия для быстрого развития и расцвета передовой науки и техники. Ни в одной стране мира кроме СССР нет таких неограниченных возможностей для роста науки и для реализации всех преимуществ электроэнергетической техники. Могучая творческая сила советской науки заключается в мировоззрении диалектического и исторического материализма, в великом учении Маркса—Энгельса—Ленина—Сталина. Слова Ленина «Коммунизм есть советская власть плюс электрификация всей страны» определили направление развития планового социалистического хозяйства СССР.

Главной задачей журнала является освещение важнейших теоретических и практических проблем электротехники; вопросов восстановления и развития электроэнергетического хозяйства страны на более высокой технической основе; вопросов создания новых, более совершенных типов электрических машин, аппаратов и приборов; вопросов автоматизации основных производственных процессов. Журнал должен раскрывать перед читателями не только новые научно-технические проблемы, но и показывать огромную работу русских физиков и электротехников, установивших приоритет в самых разнообразных отраслях исследования и применения электричества. Читатели своевременно должны узнавать о новых работах,

открытиях и достижениях советских электротехников. Вместе с тем, журнал должен содержать необходимую информацию о состоянии электротехники за рубежом и с этой целью периодически помещать обзорные статьи и рефераты, критически оценивая материалы иностранных журналов и ведя решительную борьбу с проявлениями низкопоклонства перед буржуазной наукой и техникой.

Выполняя указанные выше задачи, редакционная коллегия учитывает положение, высказанное президентом Академии наук СССР академиком С. И. Вавиловым в его докладе «Основные научные проблемы Академии наук в ближайшее пятилетие» на сессии Академии наук СССР в июле 1947 г. С. И. Вавилов сказал: «Наука, вырастая из потребностей практики и оправдывая перед этой практикой свое существование полезными результатами, в то же время имеет собственную «логику». Наука — всегда система, она не может развиваться отрывочно, эпизодически и под влиянием только внешних импульсов. Наука многое заготавливает «впрок», часто проходят многие десятилетия, прежде чем ее результаты по-настоящему оцениваются и глубоко входят в жизнь. Учение об электромагнитных волнах Максвелла возникло в 60-х годах прошлого века, радио между тем осуществлялось только в конце века. Идею атомного ядра высказывал еще Ньютона, распад атома был открыт Беккерелем 50 лет тому назад, а только теперь весь мир понял значение энергии атомного ядра.

Вот почему в нашем плане, помимо непосредственного ответа на запросы государственного пятилетнего плана, существуют свои собственные внутренние линии развития, не отрывающиеся от практики, уходящие в неизвестные, но вместе с тем стремящиеся значительно дальше».

Журнал «Электричество» является органом Академии наук СССР, Министерства электростанций и Министерства электропромышленности. Этот синтез не случайный и он должен учитываться при обсуждении направления и содержания журнала.

Переходя к характеристике журнала за 1946 и 1947 гг., Г. Н. Петров остановился на отдельных проблемах электротехники, получивших за этот период, в соответствии с указанными выше задачами, отражение на страницах журнала.

Ряд физических проблем, тесно связанных с электротехникой, был освещен в статьях: С. И. Вавилова «Люминесценция и ее применение в светодиодике» (№ 12, 1947), А. Ф. Иоффе «Полупроводники и их применения» (№ 1, 1946), Я. И. Френкеля «Современные представления о природе диэлектриков» (№ 8, 1947), Т. П. Кравца «От физики Максвелла к ядерной энергетике» (№ 9, 1946), В. А. Фабриканта «Современная физика и энергетика» (№ 5, 1946) и «Физика новых источников света» (№ 10, 1947), А. И. Шальникова и Ю. В. Шарвина «Сверхпроводимость» (№ 1, 1946), Н. Д. Папалеки «К вопросу об измерении расстояния от земли до луны с помощью электромагнитных волн» (№ 5, 1946), Я. И. Френкеля «Атмосферное электричество и грозовые явления» (№ 10, 1946), Ю. М. Кушнира «Физико-технические основы электронной микроскопии» (№ 5, 1947) и «Конструкции и применение электронных микроскопов» (№ 7, 1947), К. С. Вульфсона «Импульсный разряд в ионных газах» (№ 11, 1946) и др.

Проблемам теоретической электротехники были посвящены статьи: Л. И. Гутенмахера, И. С. Градштейна и В. А. Тафта «Электрическое моделирование физических процессов при помощи матричных схем с усилителями» (№ 3, 1946), Н. Н. Щедрина «К теории сложных несимметричных режимов электрических

систем» (№ 5, 1946), Л. А. Цейтлина «Общие основания расчета коэффициентов самоиндукции криволинейных проводов» (№ 7, 1946), Я. З. Цыпкина «Нерезонансные электрические цепи с переменным параметром» (№ 7, 1946), Э. А. Мироновича «Геометрическая теория электрических цепей» (№ 2, 1947), К. М. Поливанова «Теорема вариации параметров линейной электрической цепи» (№ 2, 1947) и др.

Общие вопросы энергетики получили отражение в статьях: Б. Е. Веденеева «Молотовская область — энергетическая база Урала» (№ 2, 1946), В. И. Вейца «Основные вопросы энергетического баланса и направление развития энергохозяйства Западного Урала» (№ 2, 1946) и «Энергетический баланс и электрификация промышленности СССР» (№ 12, 1947), В. А. Голубцовой «Вопросы подготовки инженерных кадров для энергетики» (№ 4, 1946 и дискуссия в № 8 и 11, 1946).

Практические проблемы электротехники и вопросы восстановления и развития энергохозяйства страны на более высокой технической основе освещались в статьях: А. А. Глазунова, С. А. Геликонского, П. Г. Грудинского, В. А. Трапезникова, Ю. С. Чечета и С. И. Рабиновича «О проблеме расхода металла и экономии электроэнергии в электрохозяйстве СССР» (№ 6 и 7, 1946 и дискуссия в № 12, 1946 и № 1, 5, 8, 1947), И. Л. Каганова «Система передачи электроэнергии на далекие расстояния постоянным током» (№ 1, 1946), К. А. Круга «Проблема передачи электроэнергии на сверхдалечные расстояния» (№ 3, 1946), П. С. Жданова «Перспективы передачи электроэнергии переменным током на большие расстояния» (№ 4, 1946), М. П. Костенко и Л. Р. Неймана «Электромагнитные процессы в мощных выпрямителях и их связь с параметрами энергоснабжающей системы» (№ 1, 1947), Я. М. Червоненкиса «Пути к решению основных вопросов передачи энергии постоянным током» (№ 1, 1947), И. А. Сыромятникова «Повышение устойчивости электрических систем и обеспечение надежности электроснабжения потребителей» (№ 6, 1946), З. П. Черногубовского «Восстановление электрической части Днепровской гидроэлектростанции им. Ленина» (№ 1, 1947), Б. С. Успенского и Ю. А. Якуба «Основные принципы проектирования электромеханической части многоагрегатных водосливных гидроэлектростанций большой мощности» (№ 4, 1946), А. А. Куликовского «Система городских распределительных сетей низкого напряжения с искусственными нейтральными точками» (№ 9, 1947), Д. И. Азарьева «Модель электрических систем» (№ 5, 1947; другая выполненная в СССР за последнее время модель электрических систем описана в статье И. С. Брука, С. С. Чугунова и М. С. Либкина «Расчетный стол переменного тока», № 1, 1948), С. М. Сердинова «К проблеме энергоснабжения электрических железных дорог большой протяженности» (№ 9, 1947 и дискуссия в номерах 1948 г.), Н. А. Сазонова и И. А. Будзко «Основные научно-технические задачи развития сельской электрификации СССР» (№ 7, 1946), И. А. Будзко, А. Г. Захарина и Л. Е. Эбина «Опыт сельской электрификации Свердловской области» (№ 12, 1947), С. В. Щурова «Итоги и перспективы электрификации сельского хозяйства СССР» (№ 7, 1946) и др.

Вопросы создания, новых, более совершенных типов электрических машин, аппаратов, приборов и других электрических устройств, а также материалов были рассмотрены в статьях: Г. С. Плисса «О повышении качественных требований в стандартах на электрические машины» (№ 6, 1947), А. Я. Буйлова «Основные типы современных выключателей высокого напряжения» (№ 5, 1946), Ю. В. Буткевича и А. М. Бронштейна «Выключатель с твердым газогенерирующим веществом» (№ 5, 1946), И. С. Трухманова «Испытание воздушного выключателя на 110 кВ в энергосистеме» (№ 5, 1946), Е. М. Цейрова «Вопросы газодинамики воздушного выключателя» (№ 12, 1946), С. М. Брагина «Высоковольтные кабельные линии в энергетических системах» (№ 2, 1947 и дискуссия в № 2 и 3, 1947), Ф. И. Бутаева, В. Л. Савицкого и Е. Л. Эттингера «Одноанодные ртутные выпрямители» (№ 11, 1946), В. Л. Савицкого «Мощный одноанодный ртутный выпрямитель» (№ 11, 1946), Б. М. Шляпошникова «Теория и практика схем поджигания многофазных игнитронных выпрямителей»

(№ 9, 1947), Б. П. Илясова «Новые тиатротроны и газотроны» (№ 11, 1946), Р. Г. Извекова «Электроразрядные лампы» (№ 10, 1947), М. С. Рябова «Основные вопросы внедрения люминесцентных ламп» (№ 10, 1947), А. Д. Нестеренко «Состояние электроприборостроения и его ближайшие задачи» (№ 7, 1947), И. С. Стекольникова «Современное состояние катодной осциллографии» (№ 10, 1946), Е. Г. Шрамкова «Магнитные эталоны» (№ 7, 1946), Н. Н. Андreeва «Пьезоэлектрические кристаллы и их применение» (№ 2, 1947), К. А. Андрианова и др. «Новая изоляция электрических машин» (№ 2, 1946) и «Новые теплостойкие диэлектрики — силиконы» (№ 4, 1946), Б. М. Вула «Вещества с высокой и сверхвысокой диэлектрической проницаемостью» (№ 3, 1946), В. Г. Комара «Селеновые выпрямители» (№ 2, 1947) и др.

Вопросы автоматики, телемеханики и релейной защиты нашли отражение в статьях: И. И. Соловьева «Развитие релейной защиты и автоматики энергосистем» (№ 10, 1946), Г. И. Атабекова и Я. М. Смородинского «Быстро действующая фильтровая высокочастотная защита» (№ 1, 1946), Г. И. Атабекова «Задача длинных или сильно нагруженных линий электропередач» (№ 7, 1947), М. А. Гаврилова «Методы синтеза релейно-контактных схем» (№ 2, 1946) и «Анализ релейно-контактных схем» (№ 4, 1947), Д. И. Марьинского «Устойчивость линейных систем автоматического регулирования» (№ 9, 1946), А. Г. Иосифьяна, Б. М. Кагана и Н. Н. Шереметьевского «Теория амплидально-сельсинной синхронно-следящей системы» (№ 3, 1946), В. К. Попова «К обобщению теории движения автоматизированного электропривода» (№ 4, 1947), А. А. Булгакова «Структура и характеристики современных схем автоматического управления электроприводами постоянного тока» (№ 4, 1947) и др.

За истекшие два года на страницах журнала обсуждались и другие разнообразные вопросы применения электричества. Поднимая отдельные проблемы, редакция журнала стремилась концентрировать внимание читателей на этих проблемах путем помещения тематически связанных между собой статей в одном номере. Таким образом № 6, 1946 г. был в известной части посвящен проблеме расхода металлов и снижения потерь электрической энергии; № 7 за 1946 г. — вопросам электрификации сельского хозяйства; № 11 за 1946 г. — крупнейшему советскому электротехническому институту — ВЭИ в связи с его 25-летием; № 1 за 1947 г. — автоматизации электропривода; № 6 за 1947 г. — электрическим машинам; № 7 за 1947 г. — электроизмерительной технике; № 8 за 1947 г. — электротехническим материалам; № 9 за 1947 г. — электрификации железнодорожного транспорта; № 10 за 1947 г. — проблемам светотехники; № 11 за 1947 г. — развитию электротехники в Советском Союзе за 30 лет, в связи с 30-летием Советской власти.

За два года в журнале «Электричество» было опубликовано 320 оригинальных работ. Основная часть авторского коллектива журнала — москвичи (в 1947 г. 144 автора) и ленинградцы (48); из Свердловска, Киева, Харькова, Тбилиси, Баку, Ташкента и других городов — около 50 авторов. Незначительное привлечение к участию в журнале авторов, работающих на периферии, является одним из недостатков журнала. В числе авторов в 1947 г. было 16 академиков и членов-корр. Академии наук СССР, 63 доктора и профессора, 72 кандидата наук и 71 инженер-электрик.

В разделе обзоров и рефератов журнала получало отражение развитие электротехники за рубежом. В 1946 г. было помещено 13 обзоров и 117 рефератов, в 1947 г. — 14 обзоров и 128 рефератов. Однако, этот раздел еще не поставлен должным образом, не находится на уровне современных задач журнала.

Значительное внимание уделяется в журнале вопросам истории науки, описанию деятельности замечательных людей электротехники. За два года были помещены статьи о Лебедеве, Столетове, Лодыгине, Яблочкове, Славянове, Попове, Тесле, Эдисоне. Раздел истории науки будет развиваться с целью более глубокого ознакомления читателей с выдающимися деятелями науки и электротехники — нашими соотечественниками, которые внесли неоценимый вклад в мировую науку и технику.

Развиваться будет и раздел дискуссий, причем

необходимо большее привлечение для участия в дискуссиях читателей, работающих на периферии.

Критико-библиографический раздел журнала за 1946 и 1947 гг. содержит 32 рецензии на новые книги. Не все еще в этом разделе находится на должной высоте, и в дальнейшем вопросам критики технической литературы следует уделять большее внимание.

Хроника занимает заметное место в журнале. Этот отдел развился особенно в последние годы и, повидимому, интересует всех читателей. В отделе хроники даются сведения: о деятельности Академии наук СССР и других научно-исследовательских учреждений, технических советов министерств электростанций и электропромышленности, научно-технических обществ, о проведении конференций по разным вопросам электротехники, о защите диссертаций и пр.

Перейдя к характеристике недостатков журнала «Электричество», Г. Н. Петров особо отметил, что редакции не всегда удавалось во время выявить и отклонить статьи, которые не представляют значительного технического или научного интереса. Были случаи, когда лишь из откликов читателей становилось ясным, что та или иная статья была принята к опубликованию ошибочно, что ее не следовало печатать. Примером этого является статья «Об экономических основах распределения нагрузки между электростанциями» В. М. Синькова (№ 12, 1947). Организованная по этой статье дискуссия выявила ошибочность основных положений статьи.

В № 9 за 1947 г. был напечатан обзор Н. И. Шиферсона «Быстро действующее возбуждение синхронных машин». В этом обзоре статья из французского журнала была разобрана недостаточно критично, без необходимого учета работ советских инженеров и достижений энергосистем СССР в данной области. Обзор вызвал отклики читателей (см. № 4, 1948), которые свидетельствуют о том, что редакции не следовало помещать этот обзор в том виде, в каком он был представлен автором. Вообще главный недостаток отдела обзоров и рефератов заключался именно в том, что многие из помещаемых рефератов носили случайный характер и реферирование статей иностранных журналов проводилось без должного критического анализа. В дальнейшем необходимо помещать в этом отделе в первую очередь обзоры, освещающие актуальные темы по ряду опубликованных статей; рефераты отдельных статей должны отражать только наиболее интересные вопросы новой техники. Имеется ряд тем, которые должны занимать в журнале большее место.

Явно недостаточное внимание журнал уделил в 1946—1947 гг. вопросам электрификации отдельных отраслей промышленности. Журнал должен своевременно освещать задачи развития новых отраслей электротехники, должен шире знакомить читателей с намечающимся сближением многих разделов физики с электротехникой, помогая читателям расширять свои знания и повышать квалификацию.

При наличии отраслевых электротехнических журналов следует концентрировать тематику журнала «Электричество» на важнейших теоретических и практических проблемах электротехники.

В заключение Г. Н. Петров обратился к присутствующим с просьбой высказать свое мнение о работе журнала и внести предложения, направленные к его улучшению.

В начале прений проф. Б. А. Телешев кратко охарактеризовал задачи журнала. Журнал «Электричество», сказал Б. А. Телешев, должен освещать технические проблемы и, главным образом, вопросы новой техники, стоящие в послевоенной сталинской пятилетке перед инженерами-электротехниками и перед научными работниками в области электричества. Журнал обязан вести борьбу с низкопоклонством перед буржуазной наукой и техникой. Редакция журнала должна обеспечивать высокое качество всех публикуемых материалов.

Кандидат техн. наук А. А. Климов (Всесоюзный институт механизации и электрификации сельского хозяйства) отметил: глубокую содержательность статей, освещение журналом проблем электрификации сельского хозяйства и улучшение технического оформления журнала. Существенным является то, что журнал отводит должное место показу роли русских электротехников, воспоминая в читателях чувство благородного патриотизма. Читатели были очень удовлетворены тем, что журнал «Электриче-

ство» обратил внимание в заметке «Великие люди электротехники в предвзятом освещении американского журнала» (№ 12, 1947) на исключительную необъективность буржуазной печати.

Приходится выразить большое сожаление по поводу отсутствия в юбилейном номере журнала «Электричество» (№ 11, 1947) в разделе, посвященном электрификации сельского хозяйства, имен ученых и инженеров, известных своими работами в области сельской электрификации. Необходимо более широко освещать теорию и практику сельской электрификации, так как специального журнала по сельской электрификации пока нет.

Кандидат техн. наук Н. Н. Линниченко (Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина) выразил пожелание, чтобы в журнале отмечалась дата получения статей редакцией. Это необходимо в интересах обеспечения приоритета, так как в журнале иногда значительно задерживается опубликование статей. В мае прошлого года Н. Н. Линниченко направил в редакцию статью «Гермодинамический эффект, вызываемый электрической дугой воздушного выключателя». На Парижской конференции по сетям высокого напряжения в 1946 г. был сделан доклад, который совершенно неправильно освещал этот же вопрос, что и показано в статье Н. Н. Линниченко. Редакция должна была поспешить опубликовать такую статью. Между тем, статья включена лишь в № 6, 1948 г.

Кандидат с.-х. наук С. А. Тэйс (Московский инженерно-строительный институт), касаясь вопроса о тематике журнала, заметил, что взгляд на журнал «Электричество», как на журнал исключительно технический, не совсем правилен, так как электричество—это один из основных факторов природы и было бы желательно, чтобы в журнале «Электричество» появлялись больше физических статей.

К. М. Лобанова (библиограф Государственной политехнической библиотеки) в своем выступлении остановилась на разделе библиографии журнала «Электричество». Авторы рецензий, помещенных в журнале, являются крупными специалистами электротехники. Журнал публикует списки выходящей литературы, причем хорошо то, что в этих списках указывается электроэнергетическая литература всех издательств. В журнале печатаются краткие сообщения (авторефераты), которые дают представление о новых исследованиях советских ученых в области электротехники; помещаются библиографические сведения, правда далеко не полные, о работах русских ученых и инженеров-электротехников. В 1947 г. журнал сообщил о выходе более 150 книг по электротехнике; между тем, из этой обширной литературы журнал пропечатывал только 15 книг. Списки новых книг целесообразно печатать систематически в каждом номере, а не так, как это практикуется редакцией—от случая к случаю. Необходимо помещать рекомендательные списки литературы и обзоры по отдельным вопросам электротехники и помогать читателям критически воспринимать публикуемые работы. Рецензии должны отличаться высокой принципиальностью. В настоящее время критико-библиографический отдел журнала еще не стоит на должной высоте.

Кандидат техн. наук И. В. Рабчинский сказал, что в журнале «Электричество» нужно освещать проблемы электротехники с позиций диалектического материализма. Назрел вопрос о пересмотре наследства основоположников электротехники. Работы Ампера и других основоположников учения об электричестве следует трактовать в свете новых физических воззрений, ибо физика и электротехника ушли далеко вперед. Нужно обсудить вопрос о переименовании журнала «Электричество» в журнал «Электромагнетизм». В журнале желательно открыть раздел «философия и естествознание».

Кандидат техн. наук А. И. Яковлев (Всесоюзный научный энергетический институт) отметил, что название журнала «Электричество» совершенно правильное, оно широко охватывает тематику и изменять его не следует. Касаясь тематики журнала, А. И. Яковлев сказал, что вопросы телеграфии и телефонии остались без научного журнала и эти разделы слаботочной техники в журнале «Электричество» следовало бы представить.

Инж. А. А. Тайц (Центрэнергочермет) остановился на недостатках журнала. Он отметил совершенно недостаточное количество статей по вопросам электростанций и энергосистем. Об электрификации отраслей промышленно-

сти не было ни одной статьи. В целом, электроприводу посвящено 12 статей, включая и авторефераты. Рефератов по электроприводу за 1947 г. помещено 2, а по электротранспорту — 15. Конечно, электротранспорт — очень важная отрасль электротехники, но не менее важно освещать проблемы электропривода и электрификации отдельных отраслей промышленности. Этот недостаток объясняется отсутствием необходимой плановости в подборе статей редакцией. За 1947 г. было помещено только 2 статьи по стандартам, правилам и нормам; это явно недостаточно. Сейчас, когда происходит пересмотр правил, норм и стандартов, этим вопросам журнал должен уделить гораздо больше внимания. Темы дискуссий надо выбирать более актуальные и интересные. Математические выкладки, встречающиеся в ряде теоретических статей, следует, как правило, выносить в приложения. Это в значительной степени облегчит читателям усвоение статей.

Кандидат техн. наук **В. И. Горушкин** (Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР) заявил, что журнал «Электричество» является одним из наиболее авторитетных электротехнических журналов мира. У журнала есть недостатки и трудности, которые проистекают из-за того, что электротехника чрезвычайно разрослась. Электротехника проникла во все области науки и в каждой области достаточно материала, для того, чтобы заполнить отдельные специальные журналы. Если бы журнал поставил перед собой задачу осветить буквально все области применения электричества, то такая задача оказалась бы невыполнимой. Журнал «Электричество» должен систематически освещать основные проблемные вопросы электрификации и развития электротехники и в особенности теоретические вопросы электротехники. Эта линия, судя по докладу, правильно намечена редакцией журнала. Предложения же, направленные к расширению тематики журнала «Электричество», не соответствуют интересам дела.

На конференции собралось много электротехников и уместно обратить внимание на то, как ведутся другие электротехнические журналы, например «Электрические станции» и «Вестник электропромышленности». В этих журналах заметен недостаточно высокий теоретический уровень. Его следует повысить и тогда ряд материалов мог бы с успехом помещаться в этих отраслевых журналах.

Кандидат техн. наук **И. Л. Файбисович** (Всесоюзный научно-исследовательский угольный институт) сказал, что журнал «Электричество» является любимым журналом советских электротехников и одним из лучших советских технических журналов. Высокое качество журнала становится особенно очевидным при сравнении его с иностранными электротехническими журналами. Большинство заграничных журналов носит рекламный, фирменный характер; читая в иностранном журнале статью, никогда нельзя быть уверенным в объективности и в строгой научности изложения, так как не исключено, что статья была оплачена фирмой, которая выпускает то или иное оборудование, рассмотренное в статье.

Журналу «Электричество» следует ограничить свою тематику. Это касается, в частности, радиотехники, проводной связи, поскольку по этим вопросам имеются свои журналы. Это касается до некоторой степени и вопросов электрических станций, потому что имеется журнал «Электрические станции»; то же можно сказать и о некоторых других темах. Тогда на страницах журнала «Электричество» возможно будет более широко освещать вопросы электропривода и электрификации различных отраслей промышленности. И. Л. Файбисович выразил пожелание, чтобы в разделе библиографии журнала «Электричество» помещались критические обзоры по материалам других электротехнических журналов, как, например, журналов «Электрические станции», «Вестник электропромышленности» и др.

Кандидат техн. наук **А. В. Корицкий** (Всесоюзный научный энергетический институт) предъявил несколько требований читателей к журналу «Электричество». Журнал должен охватить тематику, соответствующую размаху работы электротехников в Советском Союзе. В журнале должны освещаться жизненно важные темы народного хозяйства из области электротехники. Журнал должен вести пропаганду новых идей в электротехнике и исключительно внимание обращать на то, чтобы содействовать широ-

рому внедрению в промышленность достижений науки. Совершенно необходимо расширить раздел «Из научно-исследовательских работ. Авторефераты». В Советском Союзе так много творческих работников в области электротехники, что существующий объем этого раздела журнала уже не удовлетворяет читателей. Статьи, помещаемые в журнале в порядке обсуждения, иногда бывают недостаточно подготовленными; это отражается на проведении дискуссий.

Инж. **А. И. Фюрстенберг** (Министерство угольной промышленности западных районов), считая, что тематика журнала совершенно правильна возражает против увеличения в журнале места для вопросов электрификации сельского хозяйства, хотя эти вопросы и играют большую роль в народном хозяйстве страны. Технические вопросы, которые возникают в области электрификации сельского хозяйства, в большинстве случаев достаточно прости и нет никакой нужды загружать журнал «Электричество» рассмотрением таких вопросов. Желательно видеть больше статей из области метрологии, ибо последняя представляет интерес для всех инженеров-электриков. Краткие обзорные статьи приносят мало пользы, ценность представляли бы солидные обзорные статьи, составленные с охватом большого материала, излагающие историю и состояние вопроса, а также известные перспективы.

Нужно сократить слишком длинные «сроки обращения» статьи до ее опубликования. Редакции необходимо принять надлежащие меры к тому, чтобы статьи не задерживались рецензентами.

Инж. **А. В. Крикунчик** (Теплоэлектропроект), соглашаясь в общем с соображениями докладчика относительно направления журнала, однако отметил, что вопросам, касающимся электрификации страны, журнал уделяет очень мало места. Нужно, чтобы дискуссии хорошо организовались и давали читателям ценный материал. С этой точки зрения безусловно неудачным является опубликование в порядке дискуссии статьи **В. М. Синькова**. Оформление журнала еще не достигло необходимого уровня; клише часто негодные.

Доктор техн. наук, проф. **В. А. Трапезников** (Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР) подчеркивает, что журнал «Электричество» достойно поддерживает лучшие традиции русской электротехнической мысли. Журнал сочетает широту охвата электротехнических проблем с глубиной их проработки, постановку теоретических задач с освещением практических инженерных вопросов электротехники. Журнал «Электричество» живо откликается на научные достижения и повседневную жизнь нашей электротехнической общественности.

Одной из важных современных тенденций науки и техники является то, что наряду с углублением отдельных вопросов осуществляется переход к съединению различных областей: техники сильных и слабых токов, механики и электротехники, радиотехники и оптики и т. д. В связи с этим было бы желательным поместить в журнале «Электричество» статей комплексного характера, критически сопоставляющих решение аналогичных задач различными методами, например: задач управления станками и другого оборудования методами электротехники, гидравлики, пневматики, комбинированными методами. Следовало бы показать, как видоизменяются механические конструкции при их широкой и глубокой электрификации. Освещая проблемы материаловедения, необходимо шире освещать влияние свойств материала на машину или аппарат в целом. В журнале совершенно недостаточно отражаются проблемы электроники, являющейся в настоящее время неотъемлемой частью электротехники сильных токов и, в частности, новых автоматических систем управления и регулирования.

Хотелось бы видеть на страницах журнала более широкое освещение методики анализа сложных систем уравнений, в частности, методики моделирования, находящей широкое применение в науке и технике. Моделирование осуществляется разнообразными способами, и статьи по этому вопросу, помещавшиеся в журнале «Электричество», не дают всестороннего освещения этих методов. Желательно дать по этому вопросу статьи обзорного характера с описанием современных вычислительных устройств.

Весьма желательно расширить освещение технико-экономических проблем, связанных с электротехникой. Это

направление разрабатывается совершенно недостаточно, тогда как оно имеет первостепенное значение при решении многих электротехнических задач.

Доктор техн. наук проф. Г. И. Атабеков (ЦНИЭЛ Министерства электростанций) отмечает, что журнал «Электричество», воспитавший несколько поколений русских и советских электротехников, за последние годы стал одним из ведущих электротехнических журналов в мировой научно-технической литературе. Высказывая пожелания на будущее, Г. И. Атабеков подчеркнул, что научный журнал, объединяющий многотысячный коллектив читателей-электротехников различных специальностей, должен уделять большее внимание общетехническим вопросам электротехники, вопросам теории электромагнитных цепей и электромагнитного поля. Эти вопросы, составляющие научный фундамент современной электротехники, в равной степени интересуют научных работников и инженеров-электриков самых различных профилей и должны находиться в центре внимания журнала «Электричество».

На страницах журнала в большей мере должны освещаться научные основы и общая теория современных электроэнергетических систем, электроаппарат и машиностроения, теоретические основы современной электроавтоматики, теория электрических и магнитных измерений.

Директор Госэнергоиздата Д. В. Калантаров обратил внимание на совершенно недопустимое явление, когда статья, поступившая в редакцию журнала, лежит шесть и более месяцев до ее опубликования. Очевидно, портфель принятых статей намного превышает даже такие возможности, которыми обладает журнал «Электричество» с объемом, практически доходящим до 15—17 авторских листов в каждом номере. Авторы и редакция используют объем журнала очень нерационально: средний объем статьи, помещаемой в журнале «Электричество», превышает 30 тыс. печатных знаков; в отдельных статьях имеется 80—100

тыс. печатных знаков. Редакция должна бороться за ясный, сжатый стиль изложения материала; тогда в каждом номере журнала при том же объеме будет помещаться в  $1\frac{1}{2}$ —2 раза больше статей.

Качество воспроизведения некоторых рисунков зависит от авторских оригиналов: нельзя из любительских фотоснимков, сделанных на плохой фотобумаге при плохом освещении, получить хорошие клише. Конечно, техника цинкографии Госэнергоиздата стоит еще не на высоком уровне. В ближайшее время издательство получит новое оборудование для цинкографии и это даст возможность улучшить полиграфическое оформление журнала, которое пока еще оставляет желать лучшего. Госэнергоиздат будет прилагать всяческие усилия для ликвидации этого недостатка.

В заключительном слове Г. Н. Петров ответил на поступившие по его докладу записки и от имени редакционной коллегии журнала поблагодарил всех выступивших на конференции читателей и авторов за внесенные предложения и за критику недостатков журнала. Г. Н. Петров обещал, что редакция учитывает выраженные пожелания и практические замечания читателей.

Редакция надеется, что те читатели, которые не успели высказаться на конференции, пришлют дополнительные свои предложения и соображения по затронутым вопросам.

Пользуясь присутствием на конференции большого числа инженеров-электриков, Г. Н. Петров обратился к ним с просьбой шире освещать на страницах журнала «Электричество» работы советских электротехников.

Для собравшихся на конференции была устроена документально-библиографическая выставка, посвященная журналу «Электричество». После конференции состоялся концерт.

Д. Р.



## ДИССЕРТАЦИИ

### Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

В Ученом совете Института автоматики и телемеханики Академии наук СССР за период с августа 1944 г. по февраль 1948 г. защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

А. В. Храмой защитил 4 августа 1944 г. диссертацию на тему «Технико-экономическое обоснование автоматизации массового производства». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Г. А. Шаумян и доктор эконом. наук, проф. Е. Л. Грановский.

Дано общее понятие автоматизации производства, как высшей формы механизации, сопровождающейся внедрением рефлекторных технических устройств. На примере автоматической поточной линии рассмотрены технико-экономические предпосылки и закономерности развития автоматизации массового производства. Предложен графоаналитический метод технико-экономического анализа производства.

Н. П. Хрунов защитил 18 декабря 1944 г. диссертацию на тему «Выбор системы автостопов для железных дорог СССР». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. М. И. Вахнин и кандидат техн. наук П. В. Майшев.

Рассмотрены все системы точечных и непрерывных автостопов, применявшихся на железных дорогах мира. Даны: история развития, классификация, конструктивные особенности всех систем, теория передачи воздействия с пути на локомотив. Проанализированы применительно к условиям и требованиям железных дорог СССР все действующие системы автостопов. В результате анализа и экспериментальных данных рекомендованы: для линий, не оборудованных автоблокировкой—точечный одночастотный резонансный автостоп с ламповым генератором, а для линий, оборудованных автоблокировкой с трехзначной сигнализацией,—непрерывный автостоп с частотным кодом и маятниковыми трансмиттерами.

В. Т. Быбышев защитил 13 апреля 1945 г. диссертацию на тему: «Основные правила и нормы по элек-

трооборудованию металлорежущих станков». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук В. И. Андреев.

Освещены современные задачи в области электрификации станков, дан оригинальный проект правил по электрооборудованию металлорежущих станков. Подробно рассмотрен вопрос о выборе единого напряжения для цепей управления электроприводами станков.

Б. Я. Коган защитил 20 ноября 1945 г. диссертацию на тему «Автоматическое регулирование скорости многодвигательных электроприводов». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук Е. Л. Этингер.

Рассмотрены вопросы автоматического регулирования скорости многодвигательных электроприводов быстроходных бумагоделательных машин. Даны—обзор, классификация и критика существующих систем. На основе теоретических и экспериментальных исследований установлена величина допустимых отклонений скорости между секциями. Проведен теоретический анализ двух основных классов авторегуляторов скорости, в результате которого для каждого класса в отдельности установлены статические и динамические характеристики процесса регулирования и влияние на них отдельных параметров системы. Установлены преимущества статического принципа авторегулирования скорости в отношении динамической точности, и сделан вывод о целесообразности применения статических авторегуляторов скорости с электронно-ионными усилителями и компенсацией колебаний с помощью обратной связи на  $R$  и  $C$ . Вывод подтвержден экспериментальными лабораторными и промышленными исследованиями электронно-ионного статического авторегулятора скорости.

Я. З. Цыпкин защитил 20 ноября 1945 г. диссертацию на тему «Основы теории и расчета воспроизводящих систем». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. П. Г. Тагер и проф. Г. А. Левин.

Рассмотрены системы, предназначенные для возможно точного воспроизведения приложенного к ним воздействия. Эти системы называются воспроизведющими (в. с.). Искажения в. с. оцениваются так называемой приведенной погрешностью. Установлены условия отсутствия искажений в. с., а также условия, при выполнении которых искажение в. с. не превосходят заданной величины. Эти условия положены в основу расчета в. с. и позволяют выбрать ее параметры, исходя из заданных технических условий, что и показано на примерах расчета виброизмерительной аппаратуры, осциллографов, следящих систем, усилителей и т. д. Рассмотрены методы уменьшения искажений в. с. Установлены простые критерии устойчивости в. с., в которых для целей уменьшения искажений применяется обратная связь. В заключение приведены условия отсутствия искажений в. с., содержащих нелинейные элементы.

**Б. И. Филипович** защитил 14 мая 1946 г. диссертацию на тему «Общие вопросы фотоэлектрических устройств автоматического контроля в приложении к контролю отверстий». Официальные оппоненты: локтор техн. наук, проф. В. А. Трапезников и кандидат техн. наук А. А. Соколов.

Составлена сравнительная классификация способов осуществления автоматического контроля. Рассмотрены структура фотоэлектрического устройства для контроля несамосветящихся изделий и принципы построения рациональной оптической системы для такого устройства. Приведено сравнение источников света, фотоэлементов, усилителей и стабилизаторов напряжения. Даны способы борьбы с помехами в фотоэлектрических устройствах автоматического контроля. Особое внимание уделено оптическим системам, явлениям в цепи фотоэлемента, питаемой постоянным напряжением, и вопросам стабилизации напряжения. Введены понятия «динамической характеристики чувствительности» фотоэлемента и чувствительности цепи фотоэлемента по напряжению и предложены оригинальные графические способы их определения по статическим характеристикам фотоэлемента. Показаны преимущества вакуумного фотоэлемента.

**Я. Л. Быховский** защитил 14 мая 1946 г. диссертацию на тему «Высокочастотная связь по линиям электропередачи». Диссертационная работа представлена в виде изданной книги. Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. А. Дьяков и доктор техн. наук Г. И. Бабат.

**Н. О. Чечик** защитил 6 декабря 1946 г. диссертацию на тему «Фотоэлектрическое фотометрирование весьма слабых световых потоков на основе вторично-электронного усиления». Официальные оппоненты: доктор физико-матем. наук, проф. С. Э. Хайкин, доктор физико-матем. наук, проф. П. В. Тимофеев.

Показаны преимущества величины пороговой чувствительности фотоэлектронного прибора, в котором используется фотоэлектронный умножитель вместо фотоэлемента. Рассмотрены условия, позволяющие обнаруживать световые потоки до  $10^{-14}$  лм. Описывается созданный автором на основе проведенных исследований фотометр, обнаруживающий весьма слабый световой поток и измеряющий слабые световые потоки с относительной точностью  $\pm 1 \div 2\%$ .

**М. А. Розенблат** защитил 20 декабря 1946 г. диссертацию на тему «Магнитные усилители». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. Н. Мильштейн и кандидат техн. наук А. А. Фельдбаум.

Рассмотрены основные типы магнитных усилителей, в том числе и усилителей с обратной связью. Указаны достоинства и недостатки отдельных схем и область их применения. Приведены результаты экспериментального исследования некоторых типов усилителей и выяснено влияние изменений напряжения и частоты источника питания, температуры окружающей среды, начального подмагничивания и пр. на характеристики усилителей. Особое внимание уделено исследованию переходных процессов в магнитных усилителях и выяснению основных факторов, определяющих запаздывание усилителей. Дано общее уравнение магнитного усилителя, определяющее величину тока на выходе усилителя в любой момент времени.

Предложены инженерные методы расчета дроссельных и двухтактных магнитных усилителей.

**Л. Р. Меламед** защитил 27 мая 1947 г. диссертацию на тему «Некоторые новые методы управления анондным током тиатронов». Официальные оппоненты: доктор физико-матем. наук, проф. В. Ю. Ломоносов, кандидат техн. наук Б. Е. Телишевский.

Исследован особый генератор импульсов, служащий одновременно усилителем тока. Показано, что при использовании этого устройства с датчиками, обладающими падающей вольтамперной характеристикой, их схемная чувствительность повышается, а время работы фотоэлемента под током уменьшается во много раз. Предлагаемые автором устройства позволяют вести управление от маломощных датчиков (емкостных и сопротивления) при промышленной частоте без применения высокочастотных генераторов для питания.

**Р. И. Юргенсон** защитил 29 мая 1947 г. диссертацию на тему «Структурный анализ избирающих устройств с одной линией связи». Официальные оппоненты: доктор техн. наук М. А. Гаврилов и проф. Б. И. Доманский.

Произведен структурный анализ избирающих устройств с одной линией связи, которые широко применяются в современных устройствах телеуправления, телесигнализации, телеграфии, автоматической телефонии и т. п. На основании обобщения материалов анализа составлена таблица для построения избирающих устройств с одной линией связи.

**Д. И. Марьяновский** защитил 2 июля 1947 г. диссертацию на тему «Системы автоматического регулирования без внутренних обратных связей». Официальные оппоненты: член-корр. Армянской Академии наук, доктор техн. наук А. Г. Иосифьян и кандидат техн. наук А. А. Фельдбаум.

Основные положения диссертации изложены в статье автора «Устойчивость линейных систем автоматического регулирования», опубликованной в журнале «Электричество», № 9, 1946.

**А. М. Гуревич** защитил диссертацию 12 декабря 1947 г. на тему «Принципы рационального построения фотоэлектрических пирометров». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Н. Иванов, кандидат техн. наук Н. О. Чечик.

Работа посвящена проблеме автоматического измерения и регулирования высоких температур. Дан анализ работы яркостных пирометров — автономного и неавтономного. Изложена теория фотоэлектрического пирометра. Приведены основные характеристики и результаты экспериментальных исследований опытного фотоэлектрического пирометра, построенного на основе разработанных в диссертации принципов. В электрической схеме использован принцип, обеспечивающий стабильную работу пирометра и позволяющий получить равномерную температурную шкалу в пределах 900—1 700° С.

**А. М. Поповский** защитил 12 февраля 1948 г. диссертацию на тему «К теории регулирования прямоточного котла». Официальные оппоненты: доктор техн. наук В. Л. Лоссиевский и кандидат техн. наук А. Т. Агапов.

Даны уравнения динамики бессепараторного прямоточного котла, как системы с несколькими регулируемыми параметрами. Рассмотрено явление внутреннего резонанса, его типы, физический смысл и влияние на устойчивость системы регулирования.

Рассмотрены технологические приемы регулирования прямоточного котла, построены структурные схемы типовых систем регулирования прямоточного котла и выявлены двухсторонние внутренние связи. Дано оценка прямоточного котла, как объекта автоматического регулирования и указаны пути к улучшению его регулировочных характеристик.

**И. о. ученого секретаря ИАТ АН СССР, кандидат техн. наук Н. П. Хрунов**

## Томский политехнический институт им. Кирова

На энергетическом факультете Томского политехнического института им. Кирова за период с февраля 1940 г. по март 1947 г. защищены следующие диссертации:

*На соискание ученой степени кандидата технических наук.*

Е. М. Пухов защитил 20 февраля 1940 г. диссертацию на тему «Основные параметры рудничной электровозной откатки (троллейной)». Официальные оппоненты: кандидат техн. наук, проф. А. С. Бетехтин, кандидат техн. наук А. М. Дядьков.

Разработана методология расчета основных параметров рудничной электровозной откатки: веса состава, сечения контактной сети и рельсовой цепи. Расчет сечения контактной сети рекомендуется производить, исходя из среднего падения напряжения до пантографов электровозов. Показана рациональность экономического расчета контактной сети.

М. Ф. Карасев защитил 17 апреля 1940 г. диссертацию на тему «Кривые тока и э. д. с. коммутируемой секции в машинах постоянного тока». Официальные оппоненты: кандидат техн. наук А. М. Дядьков, кандидат техн. наук И. Г. Кулев, кандидат техн. наук М. Ф. Филиппов.

Применен метод осциллографирования добавочного тока коммутируемой секции при помощи разрезной щетки и опытным путем выявлены причины искрения щеток у машин постоянного тока. Установлено, что разрыв цепи добавочного тока от э. д. с. самондукции является главной причиной искрения щеток машин постоянного тока.

Р. Ф. Трофимов защитил 20 мая 1940 г. диссертацию на тему «Автоматические повторные включения и аварийные переключения питающих линий в применении к шахтным условиям». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. А. Воробьев, кандидат техн. наук И. А. Балашев, кандидат техн. наук И. Д. Кутявин, кандидат техн. наук Е. И. Пухов.

Автором исследовано поведение шахтных механизмов при АПВ и в лабораториях ТПИ, на основании чего показана необходимость частичного отключения механизмов при работе АПВ. В качестве источника оперативного переменного тока в схемах защиты и АПВ рекомендовано применять трансформаторы напряжения для включения и трехобмоточные трансформаторы тока с одним сердечником для выключения масляных выключателей. В соответствии с этим предложена новая управляемая на расстоянии конструкция привода с использованием коробки КАМ в сочетании с моторным приводом мгновенного, многократного действия. Для питания подземных шахтных подстанций рекомендованы автоматизированные схемы спаренных фидеров.

В. Н. Титов защитил 8 мая 1941 г. диссертацию на тему «Изоляция и опоры линий электропередачи с заземленной фазой». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. А. Воробьев, кандидат техн. наук Е. М. Пухов.

Произведен анализ перенапряжений, возникающих при некоторых коммутационных и аварийных процессах, а также условий работы изоляции линий электропередачи. Выявлены основные причины старения изоляции и влияния напряженности электрического поля на интенсивность старения. Произведенные исследования указывают на возможность применения существующего уровня изоляции высоковольтных линий и на линиях электропередачи с заземленной фазой. Показано, что для линий электропередачи системы с заземленной фазой до 110 kW возможно выполнить двухцепные деревянные опоры, в полном соответствии с требованиями правил технической эксплуатации и техники безопасности, а это дает около 60% экономии материала (для металлических опор 13%).

Ю. Е. Неболюбов защитил 3 февраля 1943 г. диссертацию на тему «Релейная защита синхронных компенсаторов». Официальные оппоненты: кандидат техн. наук А. Д. Дроzdov, кандидат техн. наук И. Г. Кулев.

Дана оценка существующих схем защиты синхронных компенсаторов и предложена методика обоснованного выбора уставок для некоторых защит. Разработана новая схема защиты компенсаторов от выпадания из синхронизма, основанная на использовании появляющегося при асинхронном режиме индуктированного переменного тока в обмотке возбуждения. Как показали лабораторные исследования, защита обладает достаточной чувствительностью, надежностью, быстротой и селективностью действия. Предложена также новая методика построения асинхронных характеристик компенсаторов (ток статора, ток ротора и момент в зависимости от скольжения). На основе анализа асинхронного режима компенсаторов дан способ выбора тока действия защиты от потери синхронизма.

Г. Е. Пухов защитил 18 февраля 1944 г. диссертацию на тему «К вопросу о серийной компенсации высоковольтных линий электропередачи». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Р. А. Воронов, проф. Н. Н. Луценко.

Указанные недостатки применяемых в настоящее время схем для серийной компенсации реактивности электропередач с использованием вращающихся электрических машин и предложено улучшение схемы Т. Х. Моргана. Произведенный анализ устойчивости установившегося движения компенсатора с двумя обмотками возбуждения на роторе показал, что при условии непрерывного регулирования токов возбуждения амплитуда моментно-угловой характеристики вращающего мотора может быть взята меньше характеристики компенсатора.

О. А. Толокнов защитил 21 декабря 1944 г. диссертацию на тему «Несимметричный пуск короткозамкнутых асинхронных двигателей». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Р. А. Воронов, кандидат техн. наук О. И. Золотарев.

Рассмотрены способы ограничения пускового момента двигателей, требующих плавного пуска: включением в одну фазу статорной обмотки двигателя активного или реактивного сопротивления; использованием для пуска двигателя однофазного автотрансформатора; применением нового, предложенного автором,  $L$ -соединения статорной обмотки, уменьшающего пусковой момент на 35% по сравнению с моментом при соединении треугольником. При использовании  $L$ -соединения как промежуточного между переключением со звезды на треугольник пусковые моменты имеют соотношение 1:2:3. Пусковые токи в сети при  $L$ -соединении меньше, чем при соединении статорной обмотки треугольником.

Н. Б. Богданова защитила 22 мая 1946 г. диссертацию на тему «Исследование осаждения влаги на коронирующих проводах». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. А. Прилежаева, доктор техн. наук, проф. Р. А. Воронов, кандидат техн. наук В. Н. Титов.

В результате изучения характера вольтамперных характеристик коронного разряда на проводах, находящихся под дождем, и осаждения влаги установлено, что корона на проводах препятствует осаждению на них влаги и образованию гололеда. Определены численные значения напряжения, при котором провода не покрываются влагой и не обледеневают, и зависимость этого напряжения от различных условий. Исследовано также поведение тока короны при разных условиях.

В. В. Каменский защитил 4 декабря 1946 г. диссертацию на тему «Исследование трехщеточного генератора». Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Р. А. Воронов, кандидат техн. наук М. Ф. Филиппов, кандидат техн. наук В. А. Падежников.

Предложен новый тип трехщеточного генератора постоянного тока, не перемагничивающийся при обратном токе и обладающий внешней характеристикой машины-компаунд. Данный генератор предназначается для питания постоянным током мощных телеграфных узлов. Произведено исследование существующих типов трехщеточных генераторов, которые находят применение в автомобиль-

ной технике. Разработаны также более точные методы исследования трехщеточных генераторов.

Г. Ф. Пухова защитила 26 марта 1947 г. диссертацию на тему «К вопросу об автоматическом повторном включении одиночных линий электропередачи с двухсторонним питанием».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Р. А. Воронов, кандидат техн. наук И. Д. Кутявин.

Изучена проблема сохранения синхронизма генераторных станций при трехфазном АПВ одиночных линий электропередачи с двухсторонним питанием. Анализ динами-

ческой устойчивости систем производился оригинальным аналитическим методом, отличающимся простотой и достаточной точностью. Произведено также ориентировочное определение области применения трехфазного АПВ для большого круга энергетических систем, и дан детальный анализ влияния местной нагрузки станций на допустимое, с точки зрения сохранения синхронизма, время раздельной работы.

Кандидат техн. наук И. Д. КУТЯВИН  
и инж. А. С. ШАРЫГИНА



## Соревнование энергетиков по досрочному выполнению пятилетки

### Обязательства работников крупнейших энергосистем СССР

Работники крупнейших энергетических систем СССР—Мосэнерго, Свердловэнерго и Донбассэнерго, отвечая на патриотический призыв трудящихся Ленинграда, в своем письме к товарищу Сталину приняли на себя ряд обязательств по досрочному выполнению послевоенной пятилетки<sup>1</sup>.

Первые успехи были достигнуты уже в 1947 г. Работники системы Мосэнерго выполнили задание по выработке электроэнергии на 103%; донецкие энергетики увеличили выработку энергии в 1947 г. по сравнению с 1946 г. и сэкономили 15 тыс. т топлива; работники Свердловской энергосистемы за прошлый год превысили выработку электроэнергии 1946 г., сэкономили 70 млн. kWh электроэнергии по расходу на собственные нужды и 8,2 тыс. т челябинского угля.

Энергетики названных энергосистем обязались к концу 1949 г. довести выработку электроэнергии до среднеквартального уровня, установленного пятилетним планом для 1950 г.

По системе Мосэнерго обязательствами намечено в 1948—1949 гг. сэкономить на электростанциях по сравнению с 1947 г. 125 тыс. т условного топлива и, кроме того, сэкономить против плановых заданий 10 млн. kWh электроэнергии, расходуемой на собственные нужды; сократить в 1949 г. на 5% по сравнению с 1947 г. средний срок простоя в капитальном ремонте турбогенераторов и котлов.

В 1949 г. намечено осуществить полную автоматиза-

<sup>1</sup> Письмо товарищу Сталину от рабочих, работниц, инженеров, техников и служащих электростанций и электросетей энергетических систем Мосэнерго, Свердловэнерго и Донбассэнерго опубликовано в газетах „Известия“ и „Правда“ 25 февраля 1948 г.

цию и перевод на телеуправление из Москвы гидроагрегатов Щербаковской гидроэлектростанции, а также довести к 1950 г. оборудование котлов автоматическими регуляторами горения до 40% и автоматическими регуляторами питания до 80% от всей мощности котельных агрегатов, установленных на станциях Мосэнерго.

По системе Свердловэнерго намечено в 1948—1949 гг. сэкономить на электростанциях и в электросети 15 млн. kWh электроэнергии, автоматизировать процесс синхронизации генераторов и линий электропередачи, на основных электростанциях и подстанциях, снизить на 3% себестоимость электроэнергии в 1949 г. по сравнению с 1947 г.

По системе Донбассэнерго в 1948—1949 гг. намечено сэкономить на электростанциях 184 тыс. т донецких углей и 1,5 млн. kWh электроэнергии по сравнению с фактически достигнутыми нормами в 1947 г.; на Зуевской электростанции в 1948 г. провести автоматизацию на 5 котлах; на Куряховской электростанции в 1948 г. освоить автоматизацию питания на 4 котлах и перегрева пара на 5 котлах, а в 1949 г. еще на 2 котлах; на Северодонецкой электростанции в 1948—1949 гг. освоить автоматическое регулирование питания на 7 котлах и снизить себестоимость электроэнергии за 1948—1949 гг. на 10% по сравнению с 1947 г.

Министерство электростанций одобрило обязательства, принятые энергетиками Москвы, Свердловска и Донбасса и рекомендовало работникам электростанций и сетей остальных энергосистем разработать и принять обязательства по досрочному выполнению послевоенного пятилетнего плана.

План производства электроэнергии за I квартал 1948 г. по Министерству электростанций СССР выполнен на 104%.

Инж. Ф. Л. ВЕЙТКОВ



## Экономия и нормирование расхода электроэнергии в текстильной промышленности

В марте с. г. в г. Иванове была проведена организованная Ивановским энергетическим институтом им. Ленина совместно с энергоотделом Министерства текстильной промышленности СССР научно-техническая сессия по вопросам экономии и нормирования расхода электроэнергии в текстильной промышленности.

В работе сессии кроме научных сотрудников института и работников энергоотделов союзного и республиканского министерств текстильной промышленности приняли участие также механики и энергетики текстильных предприятий Московской, Ленинградской, Ивановской, Ярославской и Владимирской областей. На сессию прибыли делегаты из Кирова, Ташкента, Сталинабада и других городов СССР.

В основу работы сессии были положены результаты выполненного Ивановским энергетическим институтом в течение 1944—1947 гг. цикла научно-исследовательских работ по проблеме повышения эффективности энергоиспользования в промышленности.

На сессии были освещены: 1) методика и техника организации оперативного контроля за энергопотреблением производственного оборудования; 2) методика и техника составления оперативных цеховых и общефабричных электробалансов и дифференцированных удельных расходов; 3) анализ энергобалансов и мероприятия по их улучшению; 4) прогрессивное нормирование энергопотребления машин и методика среднепрогрессивного нормирования удельных расходов электроэнергии.

Сессию открыл директор института, кандидат техн. наук А. В. Разумов, осветивший основные задачи сессии. Председательствовал на сессии инж. М. Е. Симкин (Энергоотдел МТП).

В докладе инж. И. А. Горностаева были изложены теоретические основы механических способов оперативного контроля по методу самоторможения. Приведя результаты экспериментальной проверки различных способов, докладчик выскочился за использование предложенного Н. И. Коноваловым (ИвЭИ) метода, охватывающего измерение времени самоторможения, начальной скорости и площади под кривой выбега. Далее была рассмотрена методика составления электробаланса и удельных расходов электроэнергии на основе данных оперативного контроля, фактических режимов работы оборудования и выработки промышленной продукции.

В докладе инж. Г. М. Шипова был указан ряд организационных и технических дефектов в работе по экономии и нормированию расхода электроэнергии и предложены отдельные организационно-технические мероприятия по экономии энергии. Этой же теме были посвящены и другие доклады. В частности, в одном из докладов была изложена методика приведения приращения реактивной энергии к активной с помощью теплового эквивалента реактивной энергии.

В сделанных на сессии докладах были рассмотрены также вопросы улучшения коэффициента мощности предприятий с помощью компенсаторов для повышения к. п. д. энергетических систем, дана методика выбора типа и мощности компенсатора, обеспечивающая максимальное снижение потерь в системах.

Были рассмотрены задачи прогрессивного планирования расхода электроэнергии. Методика прогрессивного нормирования удельных расходов предусматривает непрерывное улучшение технологического процесса и технического состояния производственного оборудования и, кроме того, предусматривает введение прогрессивных коэффициентов, учитывающих снижение нормы энергопотребления от проведения дополнительных мероприятий, как, например, рационализации и модернизации электроприводов, технологического оборудования и др.

В прениях выступило более 20 чел. Делегаты указали на недостатки в технике организации работы по экономии электроэнергии на текстильных предприятиях и на возможные пути их устранения, а также поставили новые проблемы перед научно-исследовательской мыслью.

Подводя итоги сессии, зам. директора ИвЭИ, доктор техн. наук, проф. Г. К. Филоненко отметил, что организация тематических научно-технических сессий с привлечением широких кругов работников промышленности является наиболее эффективной формой связи работников науки и промышленности. Такая связь дает возможность глубокого изучения поставленных вопросов и являются средством внедрения в промышленность предложений, сформулированных в научно-исследовательских работах.

В заключение сессии было принято развернутое решение — техплан перестройки работы по экономии электроэнергии в текстильной промышленности.

Кандидат техн. наук Н. И. КОНОВАЛОВ



# Профessor A. A. Горев

## К 40-летию научной, педагогической и инженерной деятельности

Осенью 1947 г. исполнилось сорокалетие научной, преподавательской и инженерной деятельности профессора Александра Александровича Горева, заведующего кафедрой техники высокого напряжения Ленинградского политехнического института им. Калинина.

А. А. Горев родился 4 мая 1884 г. в Москве. В 1907 г. он окончил Петербургский политехнический институт и начал в нем свою научную и преподавательскую работу. В 1919 г. он был избран советом Института профессором по кафедре «Передача электрической энергии». В 1930 г. А. А. Горев был привлечен к разработке плана ГОЭЛРО и принял активное участие в работе по составлению плана электрификации Северного района, а также принимал участие в разработке и экспертизе ряда важнейших электротехнических сооружений (Шатурстрой, Днепрострой, и др.). С 1932 г. А. А. Горев развернул в Политехническом институте широкую научную работу, сплотив вокруг себя большой коллектив, состоящий в значительной части из его учеников, и создал научную школу, снискавшую себе широкую известность и авторитет.

Научная работа А. А. Горева весьма многообразна и характеризуется глубиной и полнотой разработки вопросов, строгостью и обоснованностью математических выводов, тщательностью экспериментальных исследований, предвидением новых научных и технических задач и умением проводить исследования в крупном масштабе.

Одним из первых вопросов, изучением которого А. А. Горев занимался в начале своей научной деятельности, была теория передачи электрической энергии переменным током. К этой проблеме он неоднократно возвращался и в дальнейшем. В своих работах по этому вопросу А. А. Горев дает графический метод решения уравнений передачи энергии, основанный на принципе инверсии, который дополняется аналитическим решением задачи.

Много работал А. А. Горев в области изоляции линий высокого напряжения. При его ближайшем участии был разработан «Проект временных технических условий для изоляторов высокого напряжения». Проект этот послужил основной технической базой для работы по созданию советской изоляторной промышленности. Совместно с группой своих учеников А. А. Горев разработал первый в СССР проект сортамента высоковольтных штыревых изоляторов. Изоляторы по этому сортаменту изготавливались в течение нескольких лет на наших заводах «Изолятор» и «Пролетарий». Из последних его работ в этой области отметим «Импульсные характеристики линейной изоляции», напечатанную им совместно с Б. М. Рябовым в 1945 г.<sup>1</sup>. В этой работе получены вольтсекундные характеристики искровых промежутков при расстояниях, значительно превосходящих максимальную длину промежутков, встречаемую в исследованиях, проведенных за границей. С этими работами А. А. Горева тесно связаны его работы по созданию мощных генераторов импульсов. Постройка и эксплуатация этих генераторов, а также проектировка генератора импульсов ЛПИ на напряжение 7 млн. В привели А. А. Горева к мысли о необходимости наладить собственное производство высоковольтных конденсаторов. Эта мысль вскоре была им реализована с помощью инженера Н. И. Карпова и ряда других работников, создавших в ЛПИ

конденсаторную лабораторию и опытную конденсаторную мастерскую.

Под руководством А. А. Горева в ЛПИ был построен кроме генераторов импульсов напряжения также и генератор импульсов тока на 200 кА. Результатом работ, связанных с использованием высоковольтных конденсаторов, является создание в ЛПИ оригинальной установки для испытания высоковольтных аппаратов на отключающую способность («колебательный контур»).

На протяжении многих лет А. А. Горев занимается вопросом устойчивости работы электрических систем. Эта проблема является одной из важнейших проблем, от разрешения которых зависит увеличение дальности передачи энергии и передаваемой мощности. Капитальным трудом в этой области является книга А. А. Горева «Введение в теорию устойчивости параллельной работы электрических станций». В этой книге он рассматривает устойчивость как установившегося движения ротора синхронной машины, так и движения при переходных процессах, а затем дает решение проблемы устойчивости работы машины на шине бесконечной мощности, и устойчивости работы системы из двух и более машин.

С 1936 г. А. А. Горев совместно с А. А. Вульфом и В. А. Толвинским руководил в Ленинградском отделении Гидроэнергопроекта (Ленгидэп) разработкой проекта электропередачи Куйбышев—Москва. Решение, полученное в этом проекте, явилось результатом радикального пересмотра положений, общепринятых при проектировании дальней электропередачи; указанный пересмотр привел к существенным нововведениям: применению блоковой схемы передачи и установке шунтирующих реакторов на отправном конце линии электропередачи.

Нельзя не подчеркнуть, что в некоторых работах А. А. Горев опередил развитие научной мысли за рубежом. Характерным примером может служить его работа по исследованию переходных процессов на линиях электропередачи. В этой работе, доложенной в 1915 г. на заседании Русского физико-химического общества, им была дана многоскоростная теория распространения и деформации волн в системе параллельных проводов. К сожалению, эта работа осталась не напечатанной из-за событий первой мировой войны. Через 20 лет аналогичная теория была разработана американским ученым Бьюли, с именем которого она обычно связывается. Однако упомянутый публичный доклад А. А. Горева в Русском физико-химическом обществе в 1915 г. дает бесспорное право считать его пионером в решении этого сложного научного вопроса.

В настоящее время А. А. Горев осуществляет научное руководство Научно-исследовательским институтом постоянного тока Министерства электростанций. Его организационный талант и умение ставить и направлять разрешение больших научных проблем, а также поощрять научную инициативу всех своих сотрудников, позволяют надеяться, что и в этом деле он добьется таких же крупных результатов, какими ознаменовалось отмечаемое 40-летие его научной деятельности.

Доктор техн. наук, проф. А. М. ЗАЛЕССКИЙ

Доктор техн. наук, проф. Л. Р. НЕЙМАН

Доктор техн. наук, проф. В. А. ТОЛВИНСКИЙ



<sup>1</sup> Электричество, № 10, 1945.

## Устаревший стандарт тормозит развитие электрохозяйства страны

Развитие электрохозяйства промышленности и сельского хозяйства требует обязательного пересмотра ГОСТ 721-41 нормальных напряжений приемников, генераторов и трансформаторов электроэнергии (Эл. станции. № 10, 1947).

Из систем напряжения распределительных низковольтных сетей  $3\times120$ , 220/127, 380/220 и 500 В, наибольшее развитие получили сети 380/220 и 500 В в промышленности; 380/220 В в сельском хозяйстве и 220/127 и 380/220 В в коммунальных сетях городов. Напряжение  $3\times120$  В, имеющееся на отдельных участках Москвы и Ленинграда, вытесняется напряжением 220/127 В. Везде наблюдается переход на более высокое напряжение в интересах экономии цветных металлов и борьбы с потерями электроэнергии. Напряжение 220/127 В запрещено для новых предприятий с 1933 г. и все предприятия, где это напряжение уцелело, стремятся перейти на 380/220 В, причем основное препятствие для перехода — парк двигателей 220/127 В. За последние годы сильное развитие получили установки термообработки и электросварки с установленными мощностями приемников в несколько сот и даже свыше тысячи kW и kVA, требующие специальных трансформаторных подстанций.

При таких условиях существование стандарта напряжений для приемников в 220/127, 380/220 и 500 В серьезно тормозит развитие электрохозяйства нашей страны. Распространение напряжений 380/220 и 500 В лишает возможности производить пуск короткозамкнутых двигателей переключением со звезды на треугольник. Между тем подобный пуск необходим в случаях, когда мощность короткозамкнутого двигателя близко подходит к мощности питающего трансформатора. А это имеет место в промышленных установках при дроблении подстанций (особенно для насосных, компрессорных и вентиляционных установок); в сельском хозяйстве, где мощность молотилки — главного потребителя — обычно равна остальной нагрузке; в торфяной промышленности, где агрегат с короткозамкнутым двигателем питается от своего трансформатора; в угольной промышленности и пр. В свое время работники электропромышленности затратили немало труда для того, чтобы доказать необходимость более смелого применения короткозамкнутых двигателей больших мощностей. Но невозможность пуска этих двигателей переключением со звезды на треугольник создает серьезное препятствие для их распространения. В некоторых случаях, например, при отдаленной насосной станции с короткозамкнутыми двигателями в 100 kW и трансформатором 320 kVA, приходится переходить на напряжение  $3\times220$  В, переключив трансформатор на треугольник на стороне низкого напряжения и применив пуск переключением со звезды на треугольник для двигателей 380/220 В. В других случаях приходится выбирать трансформатор излишне высокой мощности с учетом перегрузки пусковыми токами.

Необходимо поэтому ввести для короткозамкнутых асинхронных двигателей напряжение 660/380 В, которое позволит восстановить в нашей электротехнике пуск переключением со звезды на треугольник. Кроме того, это напряжение может быть использовано для обратного переключения с треугольника на звезду при недогрузке двигателей, что требуется в целях повышения коэффициента мощности. Использование напряжения 220/127 В для асинхронных двигателей должно быть возможно скопее запрещено, как противоречащее интересам народного хозяйства, поскольку двигатели 380/220 В нормально работают в сетях 220/127 В на треугольнике. Поэтому не

нужно загружать конструкторов электропромышленности расчетами двигателей 220/127 В. В ГОСТ 185-41 на краиневые двигатели напряжение 220/127 В отсутствует и это совершенно правильно.

Введение двигателей 660/380 В в существующих сетях 380/220 В создаст предпосылки для перехода в дальнейшем на более высокое напряжение в 660/380 В на промышленных предприятиях, замен неудобного напряжения 500 В; это позволит унифицировать хозяйство электродвигателей. Вся история развития электрохозяйства промышленных предприятий говорит о неуклонной тенденции к повышению напряжения во всех элементах их сети, чему способствует также появление новых видов изоляции. Вполне вероятно, что через 5—10 лет переход на 660/380 В станет реальным. Развитие новых источников света также связано с тенденцией повышения напряжения и некоторые авторы рекомендуют напряжение 440/255 В для совместного питания электродвигателей и источников света при напряжении люминесцентных ламп 255 В.

В настоящее время применение напряжения 660 В совершенно реально для установок термических электропечей и электросварки. Электросварочные машины достигают мощностей до 1 000 kVA и более; будучи однофазной нагрузкой с повторно-кратковременным режимом, они требуют специальных типов проводов и отдельных трансформаторов для питания. Питание этих установок выполняется обычно при помощи шинопроводов и применение напряжения 660 В весьма существенно сократит расход цветных металлов и уменьшит потери энергии.

В трансформаторах заводских подстанций желательно иметь вывод шести концов обмоток низкого напряжения для получения напряжения 660/380 и  $3\times380$  В.

Основное возражение работников электропромышленности против напряжения 660/380 В заключается в повышении требований к изоляции. В этом случае испытательное напряжение для машин должно быть 2 320 В (для машин 500 В оно составляет 2 000 В). При современном развитии изоляционной техники это не создаст дополнительных трудностей. Кабели и провода до 1 000 В являются вполне освоенной продукцией. Распределительная аппаратура на 660 В для электропечей (контакторы, предохранители и рубильники) в данное время может быть изготовлена вполне надежно. Нет никаких оснований предполагать, что создание надежной аппаратуры для управления двигателями при напряжении в 660 В будет в дальнейшем неразрешимой задачей, поскольку тенденция повысить напряжение все время существует.

Исходя из всего изложенного, необходимо: возможно скорее запретить изготовление двигателей 220/127 В и ввести стандартное напряжение 660/380 В для приемников энергии и стороны низшего напряжения трансформаторов; в первую очередь ввести напряжение 660/380 В для короткозамкнутых асинхронных и синхронных двигателей, для электроприводов насосных, компрессорных и вентиляторных установок, для агрегатов торфяной, нефтяной, угольной, бумажной и других отраслей промышленности, а также для сельского хозяйства; ввести стандартное напряжение 660 В для сварочных машин и трансформаторов электропечей термообработки; ввести стандартное напряжение 690/400 В для трансформаторов цеховых подстанций, питающих термические установки и сварку.

Инж. Ю. Л. МУКОСЕЕВ  
Горьковское управление Центроэлектромонтажа

# Библиография

## Первый том „Экспериментальных исследований по электричеству“ М. Фарадея

М. ФАРАДЕЙ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ. Т. 1. Перевод с английского Е. А. Чернышевой и Я. Р. Шмидт-Чернышевой. Примечания и редакция члена-корр. Академии наук СССР проф. Т. П. Кравца. Издательство Академии наук СССР, 1947, 848 стр., тираж 5 500 экз., цена 42 руб.

Издательство Академии наук СССР выпустило в серии «Классики науки» перевод первого тома знаменитого труда Михаила Фарадея «Экспериментальные исследования по электричеству».

Капитальный труд Фарадея содержит систематическое изложение его многочисленных опытов, приведших к ряду важнейших открытий в области электрических, магнитных, а также связанных с ними химических, оптических и других явлений.

Книга не является сводкой обработанных результатов изучения тех или других вопросов, а содержит разбитые на серии разделы и параграфы описания отдельных опытов. Это придает книге необычный характер. Сам Фарадей в предисловии пишет:

«Я надеюсь, что читатели этого тома примут во внимание, что он не был написан как нечто целое, но создавался по частям: более ранние части в момент их написания редко имели определенную связь с теми частями, которые могли бы за ними последовать. Если бы я написал этот труд заново, то, вероятно, значительно изменил бы форму, но навряд ли изменил бы многое по существу; тогда, однако, его нельзя было бы рассматривать как верное воспроизведение или отчет о ходе и результатах всего исследования, а я хотел бы дать только это.

Да будет мне позволено выразить мое глубокое удовлетворение тем, что различные части, написанные с перерывами на протяжении семи лет, оказались столь соглашающимися друг с другом. В этом не было бы ничего особенного, если бы факты, к которым эти части имеют отношение, были бы хорошо известны до написания каждой из них; но так как каждая часть претендует на то, что содержит какие-либо оригинальные открытия или исправление общепринятых взглядов, то даже я, при всем моем возможном пристрастии, удивлен тем, в какой степени они, на мой взгляд, оказываются взаимно согласующимися и вообще точными».

Первый том «Экспериментальных исследований» разбит на 14 серий, 22 раздела и 1748 параграфов и содержит описания опытов, касающихся электрических и магнитных явлений и связи между ними, опытов над явлениями электрохимического характера, а также над гальваническими элементами.

К переводу труда Фарадея приложены многочисленные примечания редактора, Т. П. Кравца, и его статья, занимающая почти три листа «М. Фарадей и его «Экспериментальные исследования по электричеству». В рецензии на перевод труда Фарадея можно не говорить о содержании и работах Фарадея: они достаточно хорошо известны всякому физику, химику и электрику. Интерес в «Экспериментальных исследованиях» представляет самый способ изложения и принятая группировка материалов, в высшей степени характерные для знаменитого исследователя. Эта сторона книги обрисовывает лучше всего личность Фарадея.

«До сих пор мы ничего не говорили о Фарадее, как о человеке», — пишет в своей статье Т. П. Кравец. — «Но и в этом отношении его книга дает нам материал первостепенного значения. Фарадей предстает здесь нам, как живой — этот гениальный самоучка, прошедший путь от места ученика переплетного заведения до положения уваженного всеми академиями мирового ученого; преодолев-

ший гигантским, неутомимым трудом недостаток своей подготовки и опрокинувший мировоззрение, выработанное лучшими представителями тогдашней цеховой науки; подготовивший нынешним государствам и народам возможность электрификации промышленности, совершивший все это и сохранивший до конца весь юношеский энтузиазм и неугасимую веру в дело науки, своей науки, а вместе с тем всю ту скромность, с которой он впервые постучался в двери лаборатории Королевского института».

Скромность, столь характерная для Фарадея, проявляется во многих местах его труда. Даже если он касается возражений против своих заключений и мнений, он выражает свои суждения чрезвычайно сдержанно.

Там, где Фарадей соглашается с возражениями, он безоговорочно признает свою ошибку. Так, относительно статьи академика Якоби, он пишет: «Это прекрасная статья, и, хотя я не повторял этих опытов, но описание их приводит меня к убеждению, что я, вероятно, ошибся».

Читать труд Фарадея современному читателю довольно трудно вследствие совершенно непривычной для нас терминологии, причем иногда термины, получившие теперь какое-либо определенное значение, применяются в совершенно ином смысле. Очень полезны в этом отношении многочисленные примечания редактора, разъясняющие многие неясности. Точно так же весьма большие затруднения при чтении вызывает применение единиц, в которых Фарадей выражает длины, диаметры, веса и т. п. И в этом случае большую услугу оказывают приложенные к переводу таблицы перехода от применяемых Фарадеем единиц к метрическим.

Большую помощь читателю «экспериментальных изысканий» оказывает упомянутая статья Т. П. Кравца. С этой статьей полезно ознакомиться раньше, чём приступить к чтению текста самого Фарадея, так как она облегчает верное понимание часто очень трудного текста исследований.

В начале статьи Т. П. Кравец дает мастерский очерк состояния физики и химии в ту эпоху, когда Фарадей начал свои работы, и знакомит читателей с существовавшей терминологией, методом написания химических формул и т. п. Затем приводится характеристика самого труда Фарадея и рассматриваются главные черты и основное содержание этого труда. Т. П. Кравец делит переведенный том исследований на ряд главных и второстепенных отделов, в которые он группирует работы, помещенные в различных сериях и выполненные в различные периоды жизни Фарадея. К главным отделам Т. П. Кравец относит отделы, посвященные: а) электромагнитной индукции; б) законам электрохимического разложения; в) природе электрических действий; г) общим соображениям. К второстепенным отнесены вопросы: а) тождественности электричества разного происхождения; б) сущности проводимости; в) контактного действия платины; г) гальванических батарей. Рассмотрению каждого из этих отделов посвящен особый раздел статьи, в каждом из которых дается не только краткое изложение идей Фарадея, но и характеристика этого нового, что вносил Фарадей в изучение отдельных вопросов своей работой. Кроме того, Т. П. Кравец дает и краткое сопоставление идей Фарадея со взглядами современной науки.

Чрезвычайно интересна написанная статья Т. П. Кравца вводит читателя в тот круг научных проблем, в котором жил Фарадей, и делает более понятным и многие его заключения как верные, так и неверные.

Как известно, Фарадей при изложении своих исследований совсем не пользовался математической формой изложения. Это заставляло его прибегать в своих выводах к распространенным и сложным формам словесного изложения. Правда, это изложение позволило Максвеллу так охарактеризовать его: «когда я стал углубляться в изучение Фарадея, я заметил, что его метод понимания явлений также математичен, хотя не представляется в условной форме математических символов... Когда я перевел то, что я рассматривал как фарадеевские идеи, в математическую форму, я нашел то, что в общем результаты обоих методов совпадают, так что одни и те же явления учитываются обоими этими методами, и они приводят к одним и тем же законам действия... Я нашел также, что некоторые из наиболее плодотворных методов исследования, открытые математиками, могут быть много лучше выражены

в терминах, вытекающих из идей Фарадея, чем в их оригинальной форме».

Однако, несмотря на такие достоинства метода изложения Фарадея, все же языком, которым написан текст его «Исследований», представляет исключительные трудности для перевода. С этими трудностями справились: им удалось передать и сущность и форму английского изложения.

Издательством Академии наук СССР выпущен пока лишь первый том «Экспериментальных исследований». Надо пожелать, чтобы в возможно скором времени был издан и перевод второго тома, а также, если не полностью, то хотя бы в извлечениях, и перевод дневника (Faraday's Diaries), в котором Фарадей день за днем систематически описывал свои работы.

Только ознакомление с этими трудами даст русскому читателю полное представление о большом значении Фарадея и его исследований для науки.

Член-корреспондент Академии наук СССР  
проф. М. А. ШАТЕЛЕН



## Электрические машины

Г. Н. ПЕТРОВ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ, Ч. II. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для энергетических и электротехнических вузов и факультетов. Госэнергоиздат, 1947, 329 стр., тираж 10 000 экз., цена 12 руб. 60 коп.

Вышла в свет вторая часть капитальной работы, составленной коллективом кафедры электрических машин Московского энергетического института им. Молотова.

Написанная, за исключением нескольких параграфов, доктором техн. наук, проф. Г. Н. Петровым, эта часть учебника «Электрические машины» посвящена коллекторным машинам постоянного и переменного тока. Она охватывает теорию машин постоянного тока, электромашинных преобразователей и коллекторных машин переменного тока. Это содержание соответствует общим идеям, положенным в основу компоновки первого в нашей литературе учебника, концентрирующего вопросы теории и характеристику конструкций всех получавших распространение электрических машин.

Как указано в предисловии ко второй части, «раздел машин постоянного тока изложен по возможности так, чтобы он мог изучаться до соответствующих разделов машин переменного тока». Это обстоятельство позволяет в данной рецензии не затрагивать общего методического вопроса рациональной последовательности изложения в высшей электротехнической школе отдельных частей курса «Электрические машины».

Необходимо отметить, что наиболее многократное отражение в отечественной учебной литературе нашла теория машин постоянного тока. С этой точки зрения создание аналогичного нового учебника должно было поставить перед автором ряд сложных научно-методических задач. Изложение теории машин постоянного тока в рецензируемой книге представлено двенадцатью главами.

Первые три главы знакомят учащегося с основными элементами конструкции, принципом компоновки обмоток, процессом наведения в них э. д. с., условиями образования вращающего момента. Четвертая глава дает развернутое изложение теории якорных обмоток и практики их применения. К достоинствам этой главы нужно отнести четкое определение понятий и внимательное отношение автора к принятым обозначениям.

Магнитной системе машины посвящена пятая глава. Наличие аналогичного материала в первой части учебника позволяет автору всего на двух страницах изложить основные особенности расчета магнитной цепи машин постоянного тока. Безусловно удачным следует считать включение в эту главу вопросов опытного исследования магнитной системы. Однако, упоминание о величине коэффициента магнитного рассеяния дополнительных полюсов на стр. 56—57 является несколько преждевременным и неубедительным. Так, аргументация результатами эксперимента

величины этого коэффициента требует в данном случае расшифровки условий постановки опытов. В то же время далее, на стр. 103, приведено исчерпывающее ясное изложение этого же вопроса. Изложение протекания во времени процессов возбуждения и самовозбуждения, иллюстрируемое аналитическими связями и кривыми, с методической точки зрения является ценным развитием главы о магнитных системах машин постоянного тока.

Шестая глава рассматривает магнитное поле машины при нагрузке. Она вводит читателя в круг весьма важных вопросов влияния реакции якоря на работу машины и дает ясное представление о природе поперечной реакции и назначении компенсационной обмотки.

Не менее удачным следует считать описание в седьмой главе группы сложных явлений коммутации в машинах постоянного тока. Некоторым упреком автору может здесь служить недостаточное освещение современных взглядов на природу щеточного контакта.

Восьмая глава посвящена режимам работы генераторов постоянного тока. Классический метод, графической иллюстрации основных связей в этих режимах обладает бесспорными методическими преимуществами. Он наиболее доступен впервые изучающим теорию электрических машин. Вместе с тем, реальные соотношения отличаются от тех предпосылок, на которых базируются графические методы построения характеристик. Автор, используя графические приемы, с большим тщетом неоднократно информирует читателя о степени точности получаемых результатов и причинах расхождений. Однако, рассматривая характеристику короткого замыкания на стр. 118—120, автор не предупредил читателя об особо резком влиянии на эту характеристику компаундирующего эффекта дополнительных полюсов и соединительных проводов схемы внутренних соединений обмоток машин постоянного тока.

Весьма важно внимание, уделяемое в этой же главе изменению во времени якорного тока при внезапном коротком замыкании шунтового генератора. Изложение этого вопроса могло бы выиграть при рассмотрении соответствующих аналитических связей подобно тому, как это было выше сделано в отношении возбуждения и самовозбуждения. Интересным развитием общего описания условий работы генераторов является параграф, связанный с аналитическим методом исследования установившихся режимов.

Глава девятая, посвященная двигателям, обеспечивает полноценное и всестороннее знакомство учащегося со всеми основными свойствами машин и процессами управления.

К некоторому недоразумению может привести замечание о неизменности точки 4 на рис. 163 и 173. Последние представляют собой скоростные характеристики двигателя при разных токах возбуждения. Указанная точка отмечает пересечение этих характеристик с осью абсцисс. При регулировании скорости вращения вверх ослаблением поля эта точка оказывается неподвижной на оси абсцисс только при выяснении зависимости скорости от тока в якоре. Использованное на оси абсцисс рис. 173 обозначение величин тока и момента —  $I(M)$  — является, повидимому, опечаткой. Разбор вопроса о пределах повышения скорости оказался не связанным с прекрасно изложенными ранее процессами реакции якоря и коммутации.

На уровне современной техники находится материал весьма важной десятой главы, вводящей читателя в круг задач, решаемых машинами постоянного тока специального назначения. Здесь рассмотрены генераторы с продольным комбинированным возбуждением, генераторы с двойной полюсной системой, генераторы с поперечным возбуждением и электромашинные усилители (амплифиды). Достаточное внимание уделено режимам работы изобретенных К. И. Шенфером преобразователей постоянного тока — магнитов.

Потери, условия нагрева и охлаждения являются содержанием одиннадцатой главы рассматриваемого раздела. В двенадцатой главе излагаются конструкции машин постоянного тока и перспективы их развития. Здесь помещен весьма тщательно подобранный материал, иллюстрирующий конструктивное оформление продукции нашей электропромышленности в области разнообразных типов машин постоянного тока. Чертежи (разрезы), приведенные в этой главе, с успехом могут использоваться студентами как небольшой атлас конструкций при работе над курсовыми и дипломными проектами.

Содержание рецензируемой книги представляет большие возможности для углубленного изучения дисциплины. Особую роль в этом отношении играет текст, набранный мелким шрифтом. Он вводит учащегося в круг некоторых сложных вопросов современного электромашиностроения.

Несколько неудачно в этом тексте изложены вопросы, связанные с «регулексом» и «рототором». Прежде всего вызывает возражение наименование соответствующего параграфа, «Возбудители машин постоянного тока», в то время как рассматриваются, по существу, «машины регуляторы», в том числе система с бустером в цепи возбуждения. Едва ли можно согласиться с тем, что описанные схемы способны решать задачи повышения скорости возбуждения генераторов Леонарда. Упоминание в изложении вопроса о подобных устройствах следует считать отсутствие упоминания об обратной связи.

И, наконец, наиболее существенным недостатком рассматриваемого параграфа следует считать отсутствие внимания к специфике исполнения машин и к причинам, в силу которых все вспомогательные обмотки возбуждения оказались на добавочно введенных небольших машинах, а не на основном генераторе Леонарда.

Детальное ознакомление с рассматриваемым разделом позволяет утверждать, что новая книга дает нашим электротехническим вузам и факультетам безусловно оригинальное построение и изложение одного из основных разделов курса электрических машин. К числу достоинств учебника необходимо в первую очередь отнести полноту охвата рассматриваемой области вопросов электрических машин. В книге, по существу, нашли отражение все вопросы современной теории и практики машин постоянного тока, подлежащие включению в учебные программы вузов. Наряду с этим совершенно необходимо отметить также компактность изложения материала.

Следующий раздел книги в весьма сжатом объеме, всего на 27 страницах, дает весь материал учебной программы о вращающихся преобразователях тока. Рассмотрение автодина О. В. Бенедикта (стр. 227) следовало бы, пожалуй, снабдить либо более детальным разъяснением, либо ссылкой на первоисточник.

Последний, третий, раздел учебника на 95 страницах удачно излагает принципы действия, конструктивное оформление, режимы работы и указывает области применения всех основных видов коллекторных машин переменного тока. После небольшого вступления, посвященного назначению и краткой истории этих машин, расположены четыре главы. Первая из них, отмечая эффект введения дополнительных э. д. с. во вторичные цепи бесколлекторной индукционной машины, знакомит читателя с получившими практическое применение видами трехфазных коллекторных машин. Основные данные о режимах работы иллюстрируются соответствующими аналитическими соотношениями, векторными диаграммами, кривыми геометрических мест, электрическими и механическими характеристиками.

Небольшим недостатком этой главы является некоторая сжатость изложения при рассмотрении закономерностей распределения многофазных токов в обмотке якоря. При более подробном изложении не потребовалось бы особое подстрочное примечание на стр. 243 для пояснения совпадения пространственного вектора Н. С. с линией щетки при амплитудном значении щеточного тока.

Вторая глава посвящена регулированию коэффициента мощности индукционных машин в каскадных соединениях с коллекторными трехфазными возбудителями.

Третья глава в достаточно сжатой форме рассматривает каскадные соединения асинхронной машины с коллекторными для регулирования скорости вращения. При этом незаслуженно мало внимания уделено неоднократно выполнявшемуся нашими заводами каскадному соединению асинхронного двигателя с одноякорным преобразователем. Комбинированное возбуждение машины постоянного тока не соответствует в реальных условиях схеме рис. 337. Следовало бы обратить внимание читателей на то, что обычная схема включения последовательной обмотки возбуждения не сможет обеспечить требующегося поворота характеристик на всем диапазоне регулирования скорости.

Четвертая и последняя глава раздела дает достаточно развернутую картину принципов конструктивного оформления и теории рабочих процессов однофазных коллекторных двигателей.

Сделанные выше отдельные замечания не могут, конечно, уменьшить общих плодотворных результатов работы по созданию нового учебника. К числу отмеченных ранее достоинств книги следует добавить интересные результаты оригинальной компоновки ряда иллюстраций к тексту. Такие рисунки, как, например, рис. 101, в большой мере должны способствовать усвоению учащимися излагаемого материала.

Оформление книги издательством при почти полном отсутствии опечаток и неплохом качестве всех рисунков и чертежей, безусловно, облегчит работу студентов над одной из основных дисциплин учебного плана.

Вполне обоснованным является значительное увеличение тиража учебника по сравнению с тиражом первой части, ставшей библиографической редкостью и нуждающейся уже в повторном издании.

Рецензируемая книга представляет ценный вклад в библиотеку учебников электротехнических вузов и факультетов.

Доктор техн. наук, проф. Г. И. ШТУРМАН  
Харьковский электротехнический институт



ПОПРАВКА

В статье Л. А. Цейтлина «Параметры систем прямолинейных и криволинейных проводов» (Электричество, № 4, 1948) следует читать:  
на стр. 36, правая колонка, 24 строку сверху: «Считаю своим долгом отметить ...»