

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

8  
1948  
АВГУСТ

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Новаторы советской электротехники	3
М. Д. Суховольский—Промышленные электроустановки в послевоенной сталинской пятилетке	5
К. Д. Кофман, П. Ф. Соловьев, С. М. Лившиц и А. П. Балонов—К 30-летию проектно-монтажной деятельности по электрификации промышленных предприятий	11
Я. Б. Зильберлат—Состояние и перспективы развития наружного освещения городов	15
И. М. Маркович и С. А. Совалов—Экспериментальное определение параметров электрической системы, влияющих на процесс автоматического регулирования частоты и мощности	21
С. А. Назаров—Неискажающий делитель импульсных напряжений	28
Л. И. Гутенмахер—Электрические модели физических явлений	34
Г. И. Атабеков и Я. М. Смородинский—К теории преобразования фильтров релейной защиты	41
<b>АВТОРЕФЕРАТЫ</b>	
А. И. Вольдек—Снятие кривых моментов вращения асинхронных двигателей	47
М. А. Чернышев—Универсальные кривые для определения мешающего действия ртутных выпрямителей	48
Б. В. Беляев—Регуляторы напряжения с подвижным сердечником	51
А. С. Димитрадзе—Учет нелинейности реакции якоря при построении характеристик машины постоянного тока	52
Л. И. Полтава—Регулировочные характеристики шунтового двигателя постоянного тока	55
Н. В. Горохов—К автореферату Л. И. Полтавы	56
Ф. Е. Темников—Мультиплицированные измерительные схемы	57
П. Н. Горюнов и С. М. Пигин—Методы определения дополнительных моментов у индукционных счетчиков электрической энергии	59
А. В. Нетушил—Температурное поле одиночного цилиндрического электрода при электропрогреве бетона	62
Х. Ф. Фазылов—Обобщение метода контурных уравнений	63
Д. С. Кривозуб и А. Я. Мучник—Разновидность технического выполнения расчетов токов короткого замыкания	66
<b>К 75-ЛЕТИЮ К. А. КРУГА</b>	
Приветствие К. А. Кругу	69
К. М. Поливанов—Карл Адольфович Круг	70
<b>ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ</b>	
А. А. Елисеев—Первый русский электротехник — В. В. Петров	72
Л. Д. Белькинд—Галилео Феррарис	82
<b>ОБЗОРЫ И РЕФЕРАТЫ</b>	
С. А. Гинзбург—Современные мостовые схемы с автоматическим уравниванием	83
<b>ХРОНИКА</b>	
День радио—7 мая в Москве	86
Научная сессия, посвященная празднованию Дня радио	86
Итоги Всесоюзного конкурса 1947 г. на лучшее предложение по экономии электроэнергии	88
В научно-техническом обществе МЭИ	89
Совещание по выбору рода тока для механизмов прерывистого режима в черной металлургии	90
Районные электростанции-новостройки	91
<b>БИБЛИОГРАФИЯ</b>	
Я. А. Климовицкий—Книга В. В. Данилевского „Русская техника“	92
М. Малин—Избранные труды М. О. Доливо-Добровольского о трехфазном токе	94
Г. И. Бабат—Книга Б. М. Шляпошникова „Игнитронные выпрямители“	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 редколлегии инж. **Я. А. Климовицкий**

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

Адрес для телеграмм: Москва Электричество

# Новаторы советской электротехники

## К присуждению Сталинских премий в 1948 г.

Присуждение Сталинских премий за выдающиеся работы в области науки и выдающиеся изобретения и коренные усовершенствования методов производственной работы за 1947 г. является ярким выражением новых больших достижений науки и техники в СССР.

Эти успехи научно-технического творчества глубоко отражают советский патриотизм новаторов — ученых и изобретателей, — отдающих свой самоотверженный и плодотворный труд на благо социалистической Родины и строительства коммунизма.

Среди новых лауреатов Сталинской премии — значительный отряд деятелей советской электротехники. Сталинские премии присуждены за выдающиеся работы по созданию: крупных электрических машин постоянного тока, предназначенных для электропривода в металлургии, турбогенераторов с водородным охлаждением, мощных трансформаторов, установки для испытания высоковольтной аппаратуры, методов ремонта линий электропередачи, электрического счетно-решающего устройства электроинтегратора, катодно-осциллографической установки, радиоприборов, электронных устройств и т. д.

\*

\*

\*

Среди новых лауреатов, удостоенных Сталинской премии за выдающиеся работы в области науки, — **Шальников Александр Иосифович**, член-корреспондент Академии наук СССР, заведующий лабораторией Института физических проблем Академии наук СССР. А. И. Шальникову присуждена премия *второй* степени в размере 100 000 руб. за экспериментальные исследования сверхпроводимости, результаты которых изложены в статьях «Структура сверхпроводников в промежуточном состоянии» и «Поверхностные явления у сверхпроводников в промежуточном состоянии», опубликованных в 1946—1947 гг.

Сталинских премий удостоены многие ученые и инженеры-электрики за выдающиеся изобретения и коренные усовершенствования методов производственной работы.

Премии *первой* степени в размере 150 000 руб. присуждены:

Эти работы показывают дальнейший неуклонный рост советской электротехники, говорят о внедрении новых методов исследования и новой техники в широкой области электрификации, которая является одной из важных основ технического прогресса народного хозяйства. Некоторые из удостоенных Сталинской премии работ ранее освещались на страницах журнала «Электричество».

Наука и техника СССР на ряде важных направлений значительно опережают развитие научно-технической мысли в капиталистических странах. Перед советскими учеными, инженерами, изобретателями стоит огромной важности задача добиться решительного опережения на всех участках, на всех направлениях развития современной науки и техники.

Деятели советской электротехники, вдохновленные заботой, помощью и вниманием со стороны партии и правительства, приложат все свои знания и усилия для внедрения в производство новых достижений техники и для дальнейшего мощного роста электротехнической науки, электропромышленности и электрификации народного хозяйства СССР.

**Касьянову Владимиру Тихоновичу**, руководителю работ, профессору, консультанту завода «Электросила» имени С. М. Кирова, **Лютеру Роберту Андреевичу**, **Шапиро Давиду Вениаминовичу**, **Рабиновичу Исаю Натановичу**, **Кашину Алексею Алексеевичу**, инженерам того же завода, — за создание крупных электрических машин постоянного тока.

Премии *второй* степени в размере 100 000 руб. присуждены:

**Гореву Александру Александровичу**, руководителю работ, профессору Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина, **Гессену Виктору Юльевичу**, **Карпову Николаю Ивановичу**, **Каплану Вениамину Вульфовичу**, научным сотрудникам того же института, **Булгакову Константину Ефремовичу**, главному инженеру завода «Электроаппарат», — за разработку метода и создание установки для испытания высоковольтной аппаратуры;

**Соколову** Тарасу Николаевичу, руководителю работ, **Дружинскому** Исааку Абрамовичу, **Верину** Ивану Ивановичу, **Разыграеву** Аркадию Михайловичу, **Назарову** Анатолию Гавриловичу, инженерам станкостроительного завода имени Свердлова,—за разработку конструкции и освоение в производстве отечественного электро-копировально-фрезерного автомата;

**Сыромятникову** Ивану Аркадьевичу, руководителю работ, заместителю начальника технического отдела Министерства электростанций, **Розенбергу** Борису Исааковичу, главному электрику Ленинградского отделения Теплоэлектропроекта, **Небрату** Льву Ефремовичу, **Ясникову** Владимиру Николаевичу, инженерам «Кемерово-энерго», **Лысаковскому** Георгию Иосифовичу, инженеру «Донбассэнерго»,—за разработку и внедрение метода пофазного ремонта линий электропередачи;

**Ясногородскому** Игошу Зельминовичу, заместителю начальника центральной лаборатории Алтайского тракторного завода, **Харитонову** Вениамину Семеновичу, начальнику той же лаборатории,—за разработку нового эффективного метода электронагрева металлов и сплавов в электролите.

Премии *третьей* степени в размере 50 000 руб. присуждены:

**Брауде** Гиршу Вульфовичу, профессору Всесоюзного электротехнического института имени В. И. Ленина,—за разработку новых методов конструирования радиоприборов;

**Гуревичу** Борису Максавичу, руководителю работ, старшему научному сотруднику Всесоюзного научно-исследовательского угольного института, **Бучневу** Валериану Константиновичу, директору того же института, **Мессерману** Залману Гиршевичу, доценту Московского энергетического института имени В. М. Молотова,—за создание нового шахтного зарядного устройства для аккумуляторных батарей электровозов;

**Гутенмахеру** Льву Израилевичу, профессору, заведующему лабораторией электро моделирования Энергетического института Академии наук СССР, **Королькову** Николаю Владимировичу, научному сотруднику того же института, **Волыньскому** Борису Абрамовичу, научному руководителю лаборатории счетно-решающих механизмов Всесоюзного научно-исследовательского института автоматики, **Лебедеву** Василию Павловичу, директору того же института,—за создание нового счетного аппарата — электроинтегратора;

**Дамскому** Абраму Марковичу, директору завода № 531, **Селиберу** Борису Абелевичу, **Воскобойнику** Николаю Израилевичу, инженерам того же завода, **Арутюнову** Валентину Осиповичу, докторанту Академии наук СССР,—за разработку конструкции и освоение в серийном производстве новых инерционных осциллографов;

**Ефремову** Дмитрию Васильевичу, заместителю министра электропромышленности СССР, **Комару** Евгению Григорьевичу, **Титову** Владимиру

**Викторовичу**, **Данилову** Константину Владимировичу, **Карташеву** Евгению Ивановичу, инженерам завода «Электросила» имени С. М. Кирова,—за создание турбогенератора мощностью 100 тыс. кВт при 3 000 об/мин с водородным охлаждением;

**Кубецкому** Леониду Александровичу, научному сотруднику Института автоматики и телемеханики Академии наук СССР,—за изобретение многокаскадных вторично-электронных трубок;

**Манькину** Менделю-Эмануилу Абрамовичу,—руководителю работ, **Корсуну** Николаю Николаевичу, инженерам завода № 624, **Петрову** Георгию Николаевичу, профессору Московского энергетического института имени В. М. Молотова,—за разработку конструкций мощных выпрямительных трансформаторов;

**Наталевичу** Евгению Ефимовичу, руководителю работ, заместителю начальника проектного бюро Главного управления заводами железнодорожного машиностроения, **Афанасьеву** Евгению Владимировичу, **Шастину** Виктору Александровичу, инженерам Главного управления сигнализации и связи, **Зыкову** Леониду Семеновичу, инженеру Киевского электротехнического завода «Трансигнал»,—за разработку и внедрение новой системы блокировки железнодорожных станций, обеспечивающей безопасность движения на железных дорогах;

**Пархоменко** Василию Степановичу, начальнику лаборатории НИИ-380, **Ковальчик** Татьяне Лаврентьевне, **Кондрашевой** Зинаиде Никитичне, **Ипатовой** Софье Ивановне, инженерам завода № 632, **Романюку** Константину Бонифатьевичу, инженеру Министерства промышленности средств связи,—за разработку и внедрение новой технологии массового производства радиоламп с долговечным оксидным катодом;

**Стекольникову** Илье Самуиловичу, заведующему лабораторией высоковольтного разряда Энергетического института имени Г. М. Кржижановского Академии наук СССР,—за создание катодноосциллографической установки, имеющей важное значение для ряда областей физики и техники;

**Тиходееву** Павлу Михайловичу, руководителю работ, профессору Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии, **Карташевской** Вере Евгеньевне, **Сабуренкову** Александру Матвеевичу, научным сотрудникам того же института,—за создание нового светового эталона СССР и внедрение его в народное хозяйство;

**Усову** Владимиру Васильевичу, руководителю работ, **Поволоцкой** Марии Даниловне, **Бенько** Пелагее Акимовне, научным сотрудникам научно-исследовательского института № 627,—за разработку новых конструкций деталей электрических аппаратов.

Сталинских премий удостоен также ряд инженеров-электриков, принимавших участие в других изобретениях и коренных усовершенствованиях методов производственной работы.

# Промышленные электроустановки в послевоенной сталинской пятилетке

**Инж. М. Д. СУХОВОЛЬСКИЙ**

*Главэлектромонтаж Министерства строительства предприятий тяжелой индустрии СССР*

В соответствии с заданиями послевоенного пятилетнего плана восстановление электрохозяйства разрушенных фабрик и заводов и сооружение новых промышленных электроустановок развиваются быстрыми темпами. Проектно-монтажными организациями Главэлектромонтажа Министерства строительства предприятий тяжелой индустрии СССР, оборудующими большое число промышленных электроустановок страны, введено в строй электрохозяйство многочисленных агрегатов, цехов и предприятий, восстановленных и построенных в первые годы новой пятилетки.

В 1946—1947 гг. пущено в ход электрооборудование доменных печей Мариупольского завода «Азовсталь», Макеевского металлургического им. Кирова, Ворошиловского металлургического, Алапаевского металлургического, Тульского металлургического заводов и др.

Введенное в эксплуатацию электрооборудование некоторых крупных станов металлургических заводов состоит из электродвигателей постоянного тока высокой мощности для главных приводов, трехмашинных агрегатов, сложного электрохозяйства для привода многочисленных вспомогательных механизмов, больших трансформаторных подстанций. На одном из блюмингов осуществлена Уралэлектромонтажем новая система автоматического электромашинного управления главным приводом стана, повышающая его производительность.

Один за другим вступают в строй в разных концах страны блюминги и прокатные станы со своим мощным и сложным электрооборудованием. В протяжении первых двух лет послевоенной пятилетки смонтированы и сданы в эксплуатацию электроустановки блюмингов Макеевского и Н.-Тагильского металлургических заводов, стана 300 Узбекского металлургического за-

*Сообщается о некоторых работах по электрификации промышленности, выполненных в первые два года послевоенной пятилетки. Рассматриваются вопросы внедрения передовой техники в строительство промышленных электроустановок. Излагаются способы усовершенствования систем питания и распределения электрической энергии на предприятиях. Разбираются вопросы применения сборных распределительных устройств и комплектных трансформаторных подстанций. Описываются новейшие способы и схемы исполнения электросетей фабрично-заводских цехов. Высказываются соображения о модернизации осветительных устройств и выпрямительных установок.*

вода, стана 400 Казахского металлургического завода, трубопрокатного стана «малый штифель» на Днепропетровском заводе им. Ленина, трубопрокатного стана «большой штифель» на Никопольском заводе, колесо-прокатного цеха завода им. К. Либкнехта и многие другие.

Из электроустановок черной металлургии надо особо указать на восстанавливаемое электрохозяйство одного из крупнейших предприятий нашей страны — «Запорожстали», где в 1947 г. введены в действие мощная доменная печь, слэбинг, тонколистовой стан и цех холодной прокатки. О масштабах этой электроустановки, выполненной Южэлектромонтажем в исключительно короткий срок, можно судить по тому, что канализация энергии на этом предприятии потребовала нескольких сот километров кабеля, число панелей щитов низкого напряжения и магнитных станций доходит до полутора тысяч и т. д.

Восстанавливается и развивается в соответствии с пятилетним планом также электрохозяйство предприятий цветной металлургии. Электролизные установки заводов этой отрасли промышленности представляют большой технический интерес. Эти установки характерны применением мощных выпрямительных агрегатов и выполнением тяжелой шинной канализации для весьма высоких значений тока, требующей сотен тонн цветного металла.

В одном из сданных в эксплуатацию электролизных цехов ошиновка ванн выполнена алюминиевыми шинами сечением  $256 \times 31 \text{ мм}^2$  и медными лентами сечением  $250 \times 2 \text{ мм}^2$ . Главный шинопровод преобразовательной подстанции выполнен в виде мощного пакета медных шин сечением  $10 \times 254 \times 12,7 \text{ мм}^2$ . Аналогичные тяжелые шинопроводы на ряде заводов цветной металлургии, сооруженных в последние годы, выполнены на участках между преобразователь-

ными подстанциями и цехами электролиза совершенно открытыми, что дает значительную экономию в затратах на строительные работы.

Обширные работы по электрооборудованию предприятий ведутся во всех отраслях машиностроительной и металлообрабатывающей промышленности. В качестве одного из многочисленных примеров укажем на электроустановку цеха шасси одного из новых заводов автомобильной промышленности. В этом цехе установлено для привода станков около 1000 электродвигателей. Электрохозяйство другого цеха этого завода, кузнечного, насчитывает 400 электродвигателей.

Сказанное выше характеризует широкий размах работ по электрооборудованию промышленных предприятий в послевоенной пятилетке. Центральным вопросом в области электрификации промышленности, как и во всех других отраслях нашего строительства, является выполнение задачи, сформулированной «Законом о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг.» следующим образом: «обеспечить дальнейший технический прогресс во всех отраслях народного хозяйства СССР».

За годы довоенных пятилеток строительство советских промышленных электроустановок ушло далеко вперед. На базе передовой техники усовершенствованы системы питания и распределения электрической энергии на предприятиях, автоматизирован электропривод многих агрегатов и механизмов, достигнуты большие успехи в области рационального использования электрооборудования и цветных металлов и т. д. В послевоенной пятилетке развитие электрохозяйства фабрик и заводов должно еще в большей степени опираться на внедрение прогрессивных решений, направленных на повышение технического уровня электроустановок. В дальнейшем освещены некоторые вопросы сооружения электроустановок предприятий на технически передовой основе.

**Системы электроснабжения предприятий.** Большие мощности, сосредоточенные на наших современных предприятиях, и их территориальная разбросанность требуют повышения напряжения питания заводских сетей. Сопоставление систем электроснабжения крупных предприятий при питании их от напряжений 10 и 6 кВ показывает, что применение напряжения в 10 кВ дает значительный экономический эффект — уменьшение капитальных затрат, снижение расходов цветного металла, сокращение потерь электроэнергии. Техничко-экономические подсчеты (Южэлектромонтаж, Ю. М. Захаров) подтверждают целесообразность применения 10 кВ даже в ряде таких случаев, когда в связи с выбором 10 кВ вместо 6 кВ приходится вводить трансформацию с 10 на 3 кВ для питания от напряжения в 3 кВ электродвигателей средних мощностей, не изготавливаемых для напряжения в 10 кВ.

Электрохозяйство большинства наших крупных предприятий базируется на системе электро-

снабжения при напряжении в 6 кВ, и только малая часть промышленных электроустановок имеет напряжение первичной распределительной сети в 10 кВ [Л. 1 и 2]. Объясняется это во многих случаях изготовлением электродвигателей на 10 кВ только большой мощности, относительно высокой стоимостью этих электродвигателей и присоединением новых электроустановок к уже существующим энергетическим системам на 6 кВ. Однако, даже учитывая влияние этих факторов, сферу применения напряжения в 10 кВ можно значительно расширить, чему должно способствовать увеличение производства 10-кВ электродвигателей.

Важнейшим элементом рационализации систем электроснабжения является всемерное приближение центров питания предприятий энергией высокого напряжения к местам наибольших нагрузок. Распределение энергии высокого напряжения на крупных предприятиях следует, по возможности, рассредоточивать, и вместо сооружения по принятой ранее практике главных понизительных подстанций (ГПП) и центральных распределительных подстанций (ЦРП) надо строить понизительные подстанции со 110 или 35 кВ на 10 или 6 кВ (или, как указывается ниже, с 35 на 0,4 кВ) непосредственно у цехов в районах крупных нагрузок. Этим не только повышаются технико-экономические показатели заводских электроустановок, но и увеличивается надежность работы предприятий.

С рассредоточением понизительных подстанций высокого напряжения тесно связано предложение (Уралэлектромонтаж, П. С. Харченко) о магистральных системах заводского электроснабжения. Вместо применения на крупных промышленных установках трех ступеней трансформации, например, 35, 6 и 0,4 кВ или 35, 10 и 0,4 кВ, магистральная система электроснабжения ограничивается двумя — высшей и низшей, устраняя промежуточную ступень трансформации. Достигается это устройством на предприятии сквозной магистрали напряжения 35 кВ, к которой присоединяются в центрах нагрузок подстанции на 35/0,4 кВ; подстанции же на 35/10 кВ или 35/6 кВ оставляются только для питания потребителей с напряжением 10 или 6 кВ (например, крупных электродвигателей). Магистральной системой электроснабжения осуществляется глубокий ввод высокого напряжения в предприятия со всеми вытекающими отсюда преимуществами, из которых особо важным является устранение значительной части кабельной сети на 6 или 10 кВ.

Таким образом, дальнейшее усовершенствование заводских систем электроснабжения требует повышения напряжения питания заводских сетей, рассредоточения первичных понизительных подстанций и устранения излишних ступеней трансформации. Глубокий ввод высокого напряжения в предприятия объединяет эти элементы технически передовой системы электроснабжения. Внедрение этой системы должно быть облегчено расширением производства кабелей на 35 кВ небольших сечений и надежной

гарнитуры к ним, трансформаторов на 35/0,4 kV малых мощностей для наружной установки и требующейся аппаратуры.

**Сборные распределительные устройства высокого напряжения.** Распределительные устройства на 6 kV (10 или 3 kV) обычно монтируются в специально сооружаемых на месте железобетонных камерах с многочисленными перегородками и полками. Недочетами подобных распределительных устройств являются большой объем строительных работ и необходимость выполнения электромонтажных работ на месте строительства и притом только по окончании основной части строительных работ.

Индустриальная технология электромонтажных работ основывается на переводе их основной части со строительной площадки в специально оборудованные производственные базы. Это требует в данном случае замены указанного типа распределительных устройств сборными конструкциями, выполняемыми на стороне в виде металлических ячеек, в которых на месте их изготовления устанавливаются и коммутируются все аппараты и приборы. Преимущества сборных распределительных устройств значительны: на месте монтажа, куда они доставляются уже готовыми, остается только установить их и соединить с питающими линиями и отходящими фидерами; индустриальные методы производства способствуют повышению их качества и снижению стоимости; легче достигается стандартность их составных элементов; график выполнения электромонтажа становится независимым от строительных работ.

Сборные распределительные устройства начали у нас применяться еще до войны. За годы войны внедрение их было приостановлено вследствие ограничения применения металлических конструкций в строительстве подстанций [Л. 3]. В настоящее время сборные устройства высокого напряжения вновь стали применяться. Внедрение сборных распределительных устройств в наши промышленные электроустановки надо всемерно ускорить.

Попутно с рассмотрением вопроса о распределительных устройствах высокого напряжения следует остановиться на выборе систем шин в заводских электроустановках. Не всегда обоснованное применение двойной системы шин, значительно удорожающей стоимость подстанций вследствие увеличения их кубатуры и большего расхода цветных металлов и электроаппаратуры, было в годы войны прекращено. «Правила устройства электроустановок промышленных предприятий», содержащие технические решения военного периода, предписывают во всех подстанциях и распределительных устройствах «применять только одну систему сборных шин» (§ 99). В связи с этим за последние несколько лет не только обычные подстанции малой и средней мощности, но и многие крупные распределительные устройства были выполнены с одной системой шин. Проверка работы таких

устройств подтвердила в большинстве случаев их удовлетворительные эксплуатационные качества. Исключением являются мощные распределительные устройства, питающие особо ответственных потребителей (например, крупные распределительные подстанции листопрокатных цехов), где наличие только одной системы шин не обеспечивает требуемой гибкости обслуживания электрохозяйства, — увеличивается длительность ликвидации аварий, затрудняется профилактический ремонт и пр.

Поэтому, продолжая и в дальнейшем придерживаться в целом принятого решения о выполнении на промышленных электроустановках одной системы шин, следует для крупных и особо важных распределительных устройств допускать и вторую систему шин.

**Внедрение внутрицеховых подстанций.** Принцип разукрупнения трансформаторных подстанций с вторичным низким напряжением и размещения их внутри цехов для приближения к центрам нагрузок, чем достигается существенная экономия цветных металлов и электроэнергии, нашел у нас значительное применение. Теоретическое обоснование высокой технико-экономической эффективности этого принципа и инициатива внедрения его на практике принадлежат главному инженеру Севзапэлектромонтажа А. С. Либерману [Л. 4].

Отметим, что в США особый интерес к принципу разукрупнения промышленных подстанций стал проявляться позднее, чем в нашей технике нашли место теоретическая разработка, признание и применение этого принципа. Только в годы войны под влиянием дефицитности цветных металлов метод дробления подстанций привлек заметное внимание американских электриков [Л. 5].

Параллельно следует указать, что многочисленные работы А. С. Либермана по вопросу о дроблении промышленных подстанций относятся к гораздо более раннему периоду, а именно к 1934—1937 гг., а Технический совет НКТП еще своим постановлением от 8 августа 1936 г. предложил «избирать мощность трансформаторных подстанций, исходя из принципа наименьшего расхода цветных металлов, определяющего необходимость дробления трансформаторных подстанций, и располагать эти подстанции в непосредственной близости к их нагрузкам внутри цехов либо в крайнем случае у наружных стен цехов» [Л. 4].

Преобладавшие ранее в предприятиях схемы распределения энергии на стороне низкого напряжения с небольшим числом мощных внецеховых подстанций, связанных с приемниками в цехах тяжелой кабельной сетью, в настоящее время больше не применяются. Современные системы внутрицехового распределения электрической энергии низкого напряжения в предприятиях могут характеризовать следующие примеры, взятые из практики ведущихся в настоящее время восстановительных работ: электрохозяйство одного из восстанавливаемых паровозо-



строительных заводов при общей установленной трансформаторной мощности в 17 500 kVA имеет 27 внутрицеховых подстанций мощностью каждой в 320—560—750 kVA; в другом металлообрабатывающем заводе монтируется 36 внутрицеховых трансформаторных подстанций мощностью по 320—560 kVA.

В целях дальнейшего способствования применению принципа дробления цеховых подстанций целесообразна постановка производства комплектных трансформаторных подстанций. В отличие от принятого в настоящее время способа монтажа подстанций на строительстве из отдельных элементов электрооборудования в специально сооружаемых помещениях комплектные подстанции должны полностью, т. е. включая трансформаторы, сборные ячейки высокого напряжения и распределительные шкафы низкого напряжения, изготавливаться на электротехнических заводах и доставляться в совершенно готовом виде на место установки, где их надо только присоединить к электрической сети. Комплектные трансформаторные подстанции имеют небольшие габариты и занимают в цехе значительно меньше места, чем особые сооружаемые для подстанций помещения. Они требуют меньше затрат и снижают до минимума сроки электромонтажных работ. Эти преимущества комплектных подстанций облегчают размещение разукрупненных подстанций внутри цехов и их сосредоточение в центрах нагрузок. Поэтому весьма желателен скорейший выпуск их из производства.

**Цеховое распределение электроэнергии по схеме «блок трансформатор — магистраль».** Существенным элементом новой техники в заводских электроустановках является система «блок трансформатор — магистраль» (или «блок преобразователь — магистраль»), которую в последнее время стали применять для питания цеховых приемников переменного и постоянного тока. Низковольтная питательная сеть в цехе, осуществляемая по этой схеме, характеризуется отсутствием на подстанциях распределительных устройств низкого напряжения, от которых обычно отходят многочисленные фидеры. Место разветвленной радиальной питательной сети с тяжелыми потоками кабелей или проводов, отходящих от распределительных щитов к потребителям электроэнергии, занимают магистрали, выполняемые зачастую в виде шинопроводов, открытых или закрытых, которые присоединяются непосредственно к трансформаторам и к которым на всем их протяжении от трансформатора до конца магистрали приключаются распределительные силовые и осветительные пункты и отдельные приемники [Л. 6].

Как было указано, при схеме «блок трансформатор — магистраль» из системы распределения энергии в цехе выпадают, как излишняя ступень, дорогостоящие распределительные щиты низкого напряжения, что не только удешевляет эту систему, но и увеличивает ее надежность и упрощает ее выполнение.

Указанные преимущества магистральных цеховых электросетей низкого напряжения, осуществляемых по схеме «блок трансформатор — магистраль», должны обеспечить ей распространение на предприятиях. Уже в настоящее время электрические сети многих цехов машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий, строящихся в послевоенной пятилетке, запроектированы по этому принципу. Однако, не только эти, но и предприятия других отраслей промышленности должны использовать в своем электрохозяйстве достоинства новой магистральной схемы цехового электроснабжения.

Даже на заводах черной металлургии, для которых характерны не сравнительно равномерно распределенные потребители низкого напряжения, а крупные сосредоточенные нагрузки в виде электродвигателей высокого напряжения для главных приводов, имеются возможности для внедрения системы магистральных сетей, осуществляемых по схеме «блок трансформатор — магистраль» или «блок преобразователь — магистраль». В виде примера укажем, что в восстановленных в 1947 г. прокатных цехах «Запорожстали» — слябинге, цехе тонколистового стана и цехе холодной прокатки, существовавшие ранее схемы питания постоянным током вспомогательных механизмов прокатных станов, по которым мотор-генераторы присоединялись к щитам, а от последних отходили радиальные фидеры к пунктам магнитных станций и троллейным линиям кранов, были в значительной мере заменены современной магистральной схемой — «блок мотор — генератор — магистраль». Это позволило сократить число промежуточных распределительных пунктов, для которых требуется большое количество аппаратуры, и привело к значительной экономии цветных металлов в сетях.

**Применение открытых магистралей в цехах.** Несмотря на известное предубеждение против применения в цеховых сетях низкого напряжения голых токопроводов без защитных покрытий, практика последних лет свидетельствует об усиливающемся внедрении в цехи открытых питательных магистралей. Эти магистрали выполняются в виде шинопроводов или голых проводов, прокладываемых внутри цехов с нормальной средой (не опасных в отношении пожара и взрыва) по фермам зданий, колоннам, стенам и т. д., на соответствующей высоте над уровнем пола, исключающей возможность задевания за них.

Произведенным в 1945 г. обследованием 31 предприятия разных отраслей промышленности были в числе прочих вопросов проверены результаты применения открытых незащищенных линий во внутрицеховых сетях. Обследование констатировало удобство и надежность эксплуатации и отсутствие нареканий и указаний на опасность в тех случаях, где соблюдена необходимая высота прокладки открытых магистралей. Только там, где голые провода или шинопроводы проложены слишком низко, эксплуатация их затрудняется и наблюдаются частые за-

мыкания в сети. Следует указать, что для предотвращения несчастных случаев голые линии в цехах должны согласно существующим правилам прокладываться на высоте не менее 3,5 м от уровня пола и не менее 2,5 м, считая от настила моста крана.

При соблюдении указанной высоты, а также таких элементарных условий, как расположение голых магистралей выше технологического оборудования и трубопроводов, требующих регулярного обслуживания, открытые питательные линии в цехах дают столь заметный положительный эффект в виде снижения капитальных затрат и облегчения внутрив заводских сетей, что рекомендация их применения является вполне обоснованной.

**Применение защищенных цеховых шинопроводов.** В предприятиях с распределенной мелкой нагрузкой прежние цеховые распределительные сети, выполнявшиеся обычно проводами и кабелем, прокладываемыми в полу, в трубах, от силовых пунктов к электродвигателям, в настоящее время в большой мере вытеснены так называемыми шинными сборками системы инженера Центрорэлектромонтажа Ф. Я. Гольдберга. Эти сборки [Л. 11] представляют собой стальные шинопроводы для тока 80—100 А, смонтированные в закрытых металлических коробах, реже — асбоцементных трубах, устанавливаемых на стойках или кронштейнах или подвешиваемых к конструкциям зданий.

Общеизвестны достоинства шинных сборок. Они придают большую гибкость системе распределения электроэнергии низкого напряжения, так как делают возможным быстрое присоединение электродвигателей к силовой сети при перегруппировке технологического оборудования вследствие изменений в производственных процессах. Шинные сборки также удешевляют электроустановку и уменьшают расход цветных металлов. Они нашли широкое распространение на предприятиях разных отраслей машиностроения в пролетах цехов, где работа кранов не может вызвать повреждения сборок.

Наряду с указанными распределительными стальными шинными сборками, предназначенными для подключения к ним электродвигателей малой мощности, должны найти применение более мощные закрытые шинопроводы с медными шинами на большие токи. Они могут быть использованы в распределительной сети цехов с крупной распределенной нагрузкой, а также в качестве совмещенных питательно-распределительных магистралей, к которым присоединяются и пункты, питающие группы распределительных шинных сборок или электродвигателей, и непосредственно отдельные шинные сборки или электродвигатели.

**Совместное питание силовых и осветительных нагрузок.** В целях снижения стоимости заводских электроустановок и экономии цветных металлов на наших предприятиях еще 1½ десятка лет назад стали отказываться от раздельного питания силовых и осветительных нагрузок, со-

вмещающая питание силы и света от общих трансформаторов [Л. 7, 8]. В американской практике этот принцип стал внедряться позднее — в военный период [Л. 9, 10]. Так, D. L. Beeman [Л. 9] сообщает, что некоторые крупные авиационные заводы ввели в начале войны в целях экономии совмещенную систему питания и что ее стали применять и на других заводах.

Наши современные цеховые электроустановки имеют большей частью общие трансформаторы на 380/220 В для совместного питания силовых и осветительных приемников. В последний период, и в особенности в годы войны, стремясь к дальнейшей экономии проводниковых материалов, систему совместного питания силы и света стали распространять не только на трансформаторные подстанции, но и на питательные магистрали. Питание силовых и осветительных приемников от общих магистралей было регламентировано «Правилами устройства электроустановок промышленных предприятий» (§ 213 и 293), и в настоящее время на ряде фабрик и заводов силовые и осветительные распределительные сети питаются и от общих трансформаторов, и от объединенных магистралей.

Упомянутое выше обследование коснулось также вопроса об эксплуатационных результатах присоединения осветительных нагрузок к силовым пунктам. Из обследованных электроустановок 16 имели совмещенные питающие сети. На четырех предприятиях эксплуатация объединенных магистралей была признана удовлетворительной, а на 12 отмечались разные недочеты — преждевременное перегорание ламп из-за их перекала вследствие повышения напряжения при отключении силовых нагрузок в нерабочее время и др. Поэтому представляется целесообразным сузить в дальнейшем практику совмещения осветительных и силовых магистралей, допуская применение подобной системы питания силы и света только в тех случаях, когда влияние отмеченных эксплуатационных недочетов незначительно, например на предприятиях с непрерывной трехсменной работой.

**Освещение предприятий люминесцентными лампами.** Влияние хорошей освещенности в цехе на производительность труда общеизвестно, и поэтому вполне понятно стремление к модернизации осветительных электроустановок. Устройство освещения на фабриках и заводах при помощи люминесцентных ламп, расходующих при той же светоотдаче примерно втрое меньше энергии, чем лампы накаливания, и дающих к тому же возможность получить спектр искусственного освещения, близкий к дневному, создало бы резкий перелом в развитии осветительных установок. Поэтому обеспечение предприятий люминесцентными лампами с их высокими энергетическими и светотехническими показателями является неотложной задачей электропромышленности. Эту задачу следует разрешить в таких масштабах, которые позволили бы осветить люминесцентными лампами не только новые цехи и предприятия, но и перевести значительное

число существующих осветительных установок на этот новый вид освещения.

**Об электроустановках постоянного тока на предприятиях.** На ряде предприятий имеется область для применения постоянного тока — для регулируемого электропривода, электролиза и т. д. Источниками постоянного тока, не считая небольших по мощности аккумуляторных батарей, служат установки с вращающимися преобразователями, обычно мотор-генераторами или ртутными выпрямителями. По своим технико-экономическим показателям ртутные выпрямители стоят, как известно, выше мотор-генераторов — они экономичнее, требуют меньше места, эксплуатация их проще вследствие отсутствия вращающихся частей. Поэтому целесообразна замена мотор-генераторов ртутными выпрямителями, в особенности в их современных модификациях в многобаковом исполнении.

К сказанному об установках для преобразования переменного тока в постоянный следует добавить, что в области электропривода применение постоянного тока должно ограничиваться только теми случаями, когда электродвигатели постоянного тока обеспечивают предприятию такие преимущества, которые позволяют мирииться и с удорожанием электроустановок, и с усложнением эксплуатации. Там, где постоянный ток таких решающих преимуществ не дает, надо для привода пользоваться, как обычно, электродвигателями переменного тока.

Интересным примером замены электропривода постоянного тока переменным является электрооборудование пущенной в 1946 г. в ход доменной печи Алапаевского металлургического завода. Все механизмы, включая скиповой подъем, вопреки общепринятому, приводятся на этой домне электродвигателями не постоянного, а трехфазного тока 380 В. Это значительно снизило стоимость электрооборудования доменной печи, так как отпала необходимость в преобразовательной установке и упростило уход за электрохозяйством. Эксплуатация механизмов этой домны на постоянном токе протекает вполне удовлетворительно.

**Заключение.** Мы не касались выше вопроса автоматизации электропривода, а также таких элементов заводских электроустановок, как электропечные устройства, подъемно-транспортное электрооборудование и др., — это значительно бы расширило бы рамки статьи и должно служить предметом отдельного рассмотрения.

Мероприятия, о которых говорилось, — повышение напряжения общезаводских систем электроснабжения; приближение высокого напряжения к центрам нагрузок; разукрупнение и расщепление как первичных (общезаводских), так и вторичных (цеховых) подстанций; применение магистральных схем распределения электроэнергии на стороне высокого и низкого напряжения; внедрение сборных распределительных устройств высокого напряжения и комплектных трансформаторных подстанций; распространение рациональных конструкций цеховых сетей в виде открытых и закрытых шинопроводов; рационализация осветительных устройств; модернизация выпрямительных установок, — отражают современные технико-передовые тенденции в промышленном электростроительстве. Последовательное проведение этих мероприятий в жизнь будет способствовать дальнейшему росту технико-экономической эффективности электроустановок наших предприятий в послевоенной сталинской пятилетке.

#### Литература

1. М. Д. Суховольский. Проектно-монтажные работы по электрификации промышленности (сборник „Сильноточная электропромышленность на рубеже второй пятилетки“). Госэнергоиздат, 1933.
2. М. Д. Суховольский. Электрификация промышленности СССР на современном этапе. Электричество, № 1, 1936.
3. Правила устройства электроустановок промышленных предприятий. Госэнергоиздат, 1944.
4. А. С. Либерман. Подстанции малой мощности в электроснабжении промышленных предприятий. Азчериздат, 1937.
5. L. A. Umansky. Conservation of Critical Materials for Electrical Equipment. Iron and Steel Engineer, № 9, 1943.
6. А. М. Храмушин. Несколько вопросов по схеме „блок трансформатор — магистраль“. Технический бюллетень Уралэлектромонтажа, № 3, 1946.
7. С. М. Лившиц. К вопросу о применении общих или отдельных трансформаторов для силовой и осветительной нагрузки в фабрично-заводских установках. ВЭП № 2, 1932.
8. В. М. Горнштейн. Нужны ли отдельные осветительные трансформаторы в промышленных установках. Электрические станции, № 3, 1934.
9. D. L. Beeman. Combined Light and Power Systems for Industrial Plants, GER, № 3, 1946.
10. R. Kaufmann, N. Kieb. Modern Electric Power Distribution Ideas as Applied in a large War Plant. El. Eng., № 6, 1945.
11. Ф. Я. Гольдберг. Распределение электроэнергии по системе шинных сборок. Электричество, № 5, 1939



# К 30-летию проектно-монтажной деятельности по электрификации промышленных предприятий

*Инж. К. Д. КОФМАН, инж. П. Ф. СОЛОВЬЕВ, инж. С. М. ЛИВШИЦ и инж. А. П. БАЛОНОВ*  
*Москва*

В 1948 г. исполнилось тридцать лет работы электротехнических организаций Советского Союза, осуществляющих проектно-монтажные работы по электрификации промышленных предприятий и входящих в настоящее время в систему Главэлектромонтажа Министерства строительства предприятий тяжелой индустрии СССР.

В апреле 1918 г. была организована при ВСНХ секция «Электросила», на отделения которой было возложено проектирование и монтаж электроустановок. В 1922 г. проектно-монтажные отделения секции «Электросила» вошли в состав электротехнических трестов «ЭТЦР» и «Элмаштрест» (1922—1924 гг.), и в дальнейшем при происходивших реорганизациях они последовательно включались в Государственный электротехнический трест «ГЭТ» (1925—1928 гг.), Всесоюзное электротехническое объединение «ВЭО» (1929—1933 гг.) и Всесоюзный электротехнический трест «ВЭТ» (1934—1938 гг.).

С 1930 г. проектно-монтажные организации ВЭО, в дальнейшем ВЭТ, были объединены в единую систему Электропрома, которая впоследствии перешла в Главэлектромонтаж Наркомстроя (1939—1945 гг.). С 1946 г. организации, существующие в виде ряда территориальных проектно-монтажных трестов (Центрэлектромонтаж, Южэлектромонтаж, Уралэлектромонтаж, Севзапэлектромонтаж, Кавэлектромонтаж, Сибэлектромонтаж и Средазэлектромонтаж), объединяет Главэлектромонтаж Министерства строительства предприятий тяжелой индустрии СССР. В составе трестов имеются проектные и монтажные управления, заводы и научно-исследовательские лаборатории.

На протяжении тридцатилетнего периода деятельности указанных организаций ведущим

*Электрификация промышленности является одним из важнейших направлений развития плановой социалистической электрификации народного хозяйства СССР. За истекшие тридцать лет (1918—1948) проектно-монтажные организации Главэлектромонтажа Министерства строительства предприятий тяжелой индустрии СССР выполнили большие работы по электрификации предприятий многих отраслей промышленности. Накоплен огромный и ценный производственно-технический опыт электрификации заводов черной металлургии, машиностроения, химической, текстильной, бумажно-целлюлозной, полиграфической промышленности и других областей народного хозяйства. В статье К. Д. Кофмана, П. Ф. Соловьева (организация МОНИТОЭ при Главэлектромонтаже), С. М. Лившица и А. П. Балонова (организация МОНИТОЭ) при Московском проектно-конструкторском управлении треста Центроэлектромонтаж) дается сжатое описание основных работ за 30 лет проектно-монтажной деятельности системы Главэлектромонтажа.*

направлением в их работе было проектирование, монтаж, наладка и пуск промышленных электроустановок, главным образом, тяжелой индустрии. Наряду с основными работами по электрификации промышленности немалая работа была проделана и по электрификации объектов других отраслей народного хозяйства.

За истекшие 30 лет, 1918—1948 гг., организациями Главэлектромонтажа было спроектиро-

вано, смонтировано, налажено и пущено в ход подавляющее большинство электроустановок крупных объектов черной и цветной металлургии, машиностроительной, химической, легкой, текстильной и других отраслей промышленности. Ими были проведены важнейшие работы по восстановлению после гражданской войны электрохозяйства промышленных предприятий, по электрификации крупнейших промышленных объектов сталинских пятилеток, по электрификации в период Великой Отечественной войны предприятий, перебазированных на Восток, и вновь возведенных заводов оборонных отраслей промышленности, а также по восстановлению электрооборудования многочисленных предприятий, подвергшихся разрушению в годы войны. И, наконец, в настоящее время организации Главэлектромонтажа выполняют работы по электрификации фабрик и заводов, восстанавливаемых и вновь сооружаемых в соответствии с заданиями послевоенной сталинской пятилетки.

Ниже приводятся некоторые данные о проектно-монтажной деятельности организаций Главэлектромонтажа в течение тридцатилетнего периода их существования.

**Черная металлургия.** Особенно большой объем работ выполнен в области электрификации черной металлургии. Монтажными управлениями

Главэлектромонтажа по проектам, выполненным в основном Московским, Харьковским и Свердловским проектными управлениями, смонтировано и введено в действие комплексное электрохозяйство важнейших металлургических заводов — Магнитогорского, Кузнецкого, Запорожстали, Ново-Тагильского, Макеевского, Азовстали, Днепродзержинского, Никопольского, Криворожского, Златоустовского, Челябинского, Липецкого, Узбекского и многих других.

В числе выполненных электроустановок особо следует отметить советские блюминги Златоустовского, Магнитогорского, Макеевского, Днепродзержинского заводов, первый в СССР и единственный в Европе слябинг Запорожстали с индивидуальным приводом валков, тонколистовой непрерывный стан горячей прокатки и станы холодной прокатки Запорожстали, непрерывные, проволочные и штрипсовые станы Магнитогорского, Макеевского и других заводов.

Московским и Харьковским проектно-конструкторскими управлениями Главэлектромонтажа, совместно с предприятиями и организациями электропромышленности, разработаны и внедрены советские системы автоматического управления как отдельными электроприводами, так и комплексами технологического процесса на предприятиях черной металлургии, автоматическая система загрузки доменных печей, автоматическая перекидка клапанов кауперов и мартеновских печей, автоматизация непрерывных штрипсовых станов, непрерывных проволочных станов, реверсивных и неререверсивных станов холодной прокатки и т. п. За последние годы проектные и монтажные организации внедряют электромашинную автоматику в сложные металлургические приводы для обеспечения высокой производительности и гибкости управления.

Организации Главэлектромонтажа освоили и развили проектирование современных систем электроснабжения высокого и низкого напряжения крупнейших металлургических предприятий с их высокими требованиями к надежности, бесперебойности и гибкости работы электроустановок. Внедрены такие новые технические решения в области электроснабжения современных металлургических комбинатов, как приближение главных понизительных подстанций к центру нагрузки комбината (к прокатным цехам), сооружение встроенных в машинные залы прокатных цехов распределительных подстанций с общим управлением всем сложным электрохозяйством машинного зала и т. д.

**Цветная металлургия.** Управления Главэлектромонтажа выполнили электроустановки крупнейших объектов цветной металлургии — алюминиевых, медеплавильных, магниевых, ферросплавных и др. предприятий

Характерной технической особенностью электрооборудования заводов алюминиевой, магниевой и никелевой промышленности является преобразование и канализация электрических токов больших величин. Для преобразования переменного тока высокого напряжения в постоянный ток

(600—800 V) были внедрены как двигатель-генераторные установки, так и в большом количестве ртутно-выпрямительные. Сооружение таких преобразовательных мощных подстанций представляет сложную задачу, успешно решенную проектными и монтажными организациями Главэлектромонтажа.

Большую работу проделали управления трестов Главэлектромонтажа также при сооружении электроустановок для прокатки цветных металлов.

**Машиностроительная промышленность.** Огромная работа была проделана по электрификации различных отраслей машиностроительной промышленности. Спроектированы и введены в действие электроустановки на крупнейших паровозо- и вагоностроительных заводах, на заводах тяжелого машиностроения, на предприятиях автомобильной промышленности, сельскохозяйственного машиностроения, электромашиностроения и т. д.

Организации Главэлектромонтажа принимают деятельное участие в переводе машиностроительной промышленности с группового привода станков на индивидуальный (1925—1929 гг.), в разработке и внедрении современных многоотворных приводов станков и автоматов, а также высокопроизводительных автоматических линий станков. В частности, ЦНИЛЭПС<sup>1</sup> разработал советский ионный привод для металлообрабатывающих станков.

**Химическая промышленность.** Выполнена работа по электрификации наиболее крупных объектов химической промышленности: Донсода, Бобриковского, Воскресенского и других хлоркомбинатов. Управления Главэлектромонтажа электрифицированы также крупные объекты резиновой промышленности, заводы синтетического каучука, Ярославский резиновый, Омский и Московский шинные заводы и др.

Характерным в техническом отношении для объектов химической промышленности являются крупные трансформаторные и преобразовательные подстанции с мощными двигатель-генераторными и ртутно-выпрямительными установками, аналогичными применяемым в цветной металлургии.

**Текстильная промышленность.** Московским проектно-монтажным отделением в 30-х годах было электрифицировано большинство текстильных фабрик Московской, Ивановской, Владимирской, Горьковской и других областей. Позднее организации Главэлектромонтажа выполнили также работы по электрификации Барнаульского, Ташкентского и других комбинатов. Была проведена широкая электрификация старых текстильных фабрик путем перевода механического парового привода текстильных машин на индивидуальный электродвигательный. Соответственно были разработаны и внедрены электроприводы для отдельных текстильных машин. Одновременно были разработаны и внедрены

<sup>1</sup> Центральная научно-исследовательская лаборатория по электрификации промышленности и строительства.

также методы рационального электрического освещения текстильных производств, послужившие основой для реконструкции электрического освещения в других отраслях промышленности.

**Бумажно-целлюлозная промышленность.** Наибольший объем работ по электрификации бумажно-целлюлозной промышленности выполнен ленинградской организацией Главэлектромонтажа. Электроустановки крупнейших бумажно-целлюлозных комбинатов—Балахнинского, Мариинского, Кондопожского, Ново-Лялинского и др. выполнены организациями Главэлектромонтажа.

Разработка и внедрение современного электропривода отдельных машин, а также автоматического управления всем технологическим процессом бумагоделательных машин с применением электронных регуляторов являлись одной из основных задач ленинградской организации Главэлектромонтажа.

**Полиграфическая промышленность.** Электрооборудование гигантов полиграфической промышленности—комбинатов «Правда» и «Известия», а также Щербаковского завода полиграфических машин—запроектировано, смонтировано и налажено московскими организациями Главэлектромонтажа. Были предложены и осуществлены оригинальные решения в части привода и автоматизации советских как однорольных, так и многорольных ротационных машин, установленных во многих городах (Ростов на Дону, Курск, Минск и др.).

**Другие области народного хозяйства.** Не пренебрегая на полноту освещения всей многогранной и долгодетельной деятельности организаций Главэлектромонтажа, отметим наиболее существенные работы по электрификации других отраслей народного хозяйства.

В угольной промышленности большие работы были выполнены по сооружению высоковольтных линий электропередачи и подстанций в районах угледобычи. В частности, харьковской организацией Главэлектромонтажа (1921—1924 гг.) были выполнены работы по восстановлению электрохозяйства угольных шахт и по кольцеванию воздушных линий электропередачи 22 kV для угольных шахт Донбасса. Наряду с электрификацией подземного и надземного хозяйства шахт сооружались комплексные установки (механическая и электрическая часть) шахтных подъемников различных систем и мощностей.

Управления Главэлектромонтажа принимали деятельное участие в восстановлении после периода гражданской войны электрооборудования нефтяной промышленности в Баку, Грозном, Майкопе и в создании электрохозяйства новых нефтяных районов в Эмбе и Башкирии, в электрификации нефтяных районов, а также нефтепровода Грозный—Туапсе.

В области электрической тяги организациями Главэлектромонтажа выполнены установки по электрической откатке на Магнитогорском, Богословском, Соликамском рудниках, Балхашском комбинате и др., смонтировано электрооборудование тяговых и понижительных

подстанций Московского метрополитена им. Кагановича и выполнено освещение его пассажирских станций и туннелей. Электрооборудование последних очередей Московского метро характеризуется применением широкой автоматизации, а также применением металлических комплектных и сборных распределительных устройств постоянного и переменного тока, вместо ранее применявшихся железобетонных.

В области электрических станций организации Главэлектромонтажа выполнили проектирование и монтаж тепловой и электрической части Криворожской, Харьковской, Ивановской и других электростанций, а также монтаж электрической части фабрично-заводских тэц на автозаводах им. Сталина и им. Молотова, на металлургических заводах—Магнитогорском, Кузнецком; Челябинском и на Уральском алюминиевом заводе и др.

Московские организации Главэлектромонтажа немало потрудились над благоустройством столицы, выполнив большое количество работ по проектированию и монтажу электроустановок коммунальных объектов Москвы: электрическое освещение окраинных районов (1924—1926 гг.) и вновь выстроенных жилых домов (1924—1929 гг.); электрификация Рублевского водопровода (1927 г.); электрооборудование московских театров—Большого, Малого, Камерного и др.; электрооборудование Центрального телеграфа; электрооборудование кремлевских звезд; иллюминация Кремля и Красной площади к празднику 800-летия Москвы и др.

Наряду с электрификацией коммунального хозяйства Главэлектромонтаж уделял большое внимание вопросам электрификации сельского хозяйства. Еще в начале своей деятельности (1924 г.) организации Главэлектромонтажа выполнили работы по электрификации сельскохозяйственных электроустановок в Клинском, Волоколамском и Солнечногорском районах Московской области и в других районах СССР. В последние годы произведены большие работы в районах сплошной электрификации сельского хозяйства—Московской, Молотовской и Свердловской областях, на Северном Кавказе и Украине.

Московской организацией выполнены проекты и проведен монтаж электроустановок на первой (1923 г.) и второй (1939 г.) сельскохозяйственных выставках в Москве.

Организациями Главэлектромонтажа спроектированы, смонтированы, налажены и пущены в эксплуатацию электроустановки разнообразных научно-исследовательских институтов и вузов с уникальным электрооборудованием: Оргметалл, ЦАГИ, лаборатория прокатки института им. Баумана, Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина), Пулковская обсерватория и др.

**Новые технические решения в области электрооборудования.** Организации Главэлектромонтажа внедряли значительное количество новых рациональных технических решений, направленных на уско-



технических решений, направленных на ускорение и удешевление работ по электрификации и экономному расходованию электрооборудования, электроматериалов и электроэнергии, при высокой надежности эксплуатации электроустановок.

Из числа наиболее существенных решений должны быть отмечены следующие:

1. В области электроснабжения промышленных предприятий Главэлектромонтаж широко внедрил систему дробления подстанций и приближения их к центрам нагрузки. В дальнейшем эта система была расширена путем внедрения трансформаторных и преобразовательных подстанций по системе блоков (без щита низкого напряжения). Разработаны системы глубокого ввода воздушных линий высокого напряжения (35—110 кВ) на территории промышленных предприятий, непосредственно к местам сосредоточения основных нагрузок.

2. Была проведена рационализация электрической части сооружаемых распределительных устройств и подстанций путем внедрения сборных металлических ячеек, изготавливаемых на заводе или монтажной площадке, вместо сооружения сложных железобетонных ячеек, и за счет широкого применения одинарной системы сборных шин, ручных приводов к выключателям, защиты на переменном токе и т. п.

3. Выбор основных агрегатов и сетей в значительной мере производится на основании реальных коэффициентов спроса, полученных организациями Главэлектромонтажа в результате обследования ряда промышленных предприятий, а также с учетом перегрузочных способностей генераторов, трансформаторов и сетей.

4. Широко применяются магистральные системы питания низковольтных потребителей взамен радиальной системы, которая требует излишнего количества низковольтной аппаратуры, проводниковых материалов, и связана с увеличением стоимости строительства и усложнением эксплуатации. В частности, широко внедрены в машиностроительной промышленности гибкие системы распределения энергии в цехах при помощи шинопроводов, удовлетворяющих высоким требованиям, которые предъявляются часто меняющимися технологическими условиями.

5. В различных отраслях промышленности внедрялись рациональные схемы электропривода, основанные на применении релейно-контакторной и в позднейшем электромашинной и ионно-электронной автоматики. Автоматикой охвачены как отдельные узлы, так и комплексы технологических процессов. Начал получать широкое распространение переменный ток в металлургическом электроприводе с повторно-кратковременным режимом работы.

6. Внедрялись рациональные методы освещения промышленных и культурно-бытовых и других зданий.

Успешному внедрению передовой техники в электроустановки содействовали крупные проектные организации Главэлектромонтажа (Московская, Харьковская, Ленинградская, Свердлов-

ская, Сибирская и Ростовская) и Московская и Ленинградская научно-исследовательские лаборатории.

Руководящие материалы по проектированию, монтажу и наладке электроустановок, издаваемые Главэлектромонтажем, являлись необходимым пособием во всех организациях, занимающихся вопросами электрификации промышленности.

На протяжении многих лет Главэлектромонтаж проводит большую деятельность по разработке технических требований на новые изделия электропромышленности, а также по разработке правил и норм для электроустановок сильного тока.

Механизация и индустриализация электромонтажных работ обеспечиваются наличием в системе Главэлектромонтажа широко развитой производственной базы (заводы и мастерские), где изготавливаются разнообразные виды специальных монтажных механизмов, электротехнических конструкций и электромонтажных изделий и деталей.

В заключение необходимо отметить деятельность ЦНИЛЭПС Главэлектромонтажа по разработке и внедрению электрического нагрева в технологию строительных работ: электропрогрев бетона, грунта и кирпичной кладки, сушка и пропитка древесины токами высокой частоты. Электропрогрев бетона и строительных конструкций были внедрены в весьма широких масштабах и позволили вести зимние бетонные работы, что имело особое значение на Урале и в Сибири при перебазировании в зимних условиях промышленных предприятий в годы Великой Отечественной войны.

**Кадры.** В успешной работе организаций Главэлектромонтажа огромную роль сыграли квалифицированные кадры, которые эти организации воспитали на протяжении многих лет. Из общего количества 29 000 чел., работающих в организациях Главэлектромонтажа, более 1 000 чел. имеет стаж непрерывной работы в этих организациях свыше 15 лет, 310—свыше 20 лет. В их числе находится 31 работник, отдавший делу электрификации советской промышленности четверть века и более.

Приведенное в статье описание основных работ организаций Главэлектромонтажа за 30 лет их существования свидетельствует о крупном масштабе и разнообразии этих работ. В области электрификации промышленности в настоящее время имеется большое количество новых и еще не решенных задач по внедрению новой техники; многое еще нужно сделать для устранения ряда существенных недостатков, имеющихся в практике проектно-монтажной работы.

Накопленный проектно-монтажными организациями опыт и квалифицированные кадры должны обеспечить успешное выполнение производственно-технических задач по электрификации промышленности Советского Союза, поставленных партией и правительством в послевоенной сталинской пятилетке.

# Состояние и перспективы развития наружного освещения городов

Кандидат техн. наук Я. Б. ЗИЛЬБЕРБЛАТ

Академия коммунального хозяйства им. Памфилова

Влияние условий освещения улиц на безопасность движения установлено рядом исследований, в результате которых были выработаны требования к устройству улично-

го освещения. Однако, условие обеспечения безопасности движения не является единственным критерием для оценки качества освещения. Правильно устроенное освещение должно также являться средством украшения города, способствуя улучшению его архитектурного вида. Поэтому освещение городов нормируется обычно применительно к отдельным разрядам улиц, основываясь как на степени интенсивности движения, так и на значимости отдельных улиц в данном населенном пункте.

В Советском Союзе уличное освещение регламентирует ГОСТ 1002-41, в котором классификация улиц и нормы освещенности установлены в зависимости от количественных характеристик движения транспорта. Основным требованием этого стандарта является создание минимальной горизонтальной освещенности на поверхности проезжей части улиц в пределах от 0,2 до 6 лк. Оптимальные условия видения в уличных условиях зависят от величины яркости фона и контраста между фоном и объектами, которые необходимо различать. Однако, недостаток опытных данных не позволяет пока нормировать яркость или соотношения яркостей между фоном и объектами. При искусственном освещении улиц обычно преобладает силуэтное видение; очевидно, чем светлее фон, тем лучше видимость предметов. Отсюда следует возможность нормирования горизонтальной освещенности поверхности улиц. Рекомендуемые стандартом уровни освещенностей соответствуют минимуму требований для создания необходимых условий видения.

Происходившее еще в 1946 г. при Министерстве Коммунального хозяйства РСФСР широкое научно-техническое совещание по вопросам уличного освещения отметило ряд недостатков в общем состоянии наружного электрического освещения городов; эти недостатки обусловле-

*Развивающийся городской транспорт и интенсивное движение пешеходов требуют создания должных условий видения в ночное время для обеспечения безопасности движения. Рассматриваются вопросы нормирования наружного освещения городов, источники света и особенности различных осветительных приборов. Намечаются мероприятия по улучшению наружного освещения городов СССР.*

ны в известной мере практикой проектирования, устройства и эксплуатации осветительных установок. Отсутствие на местах обоснованных указаний по устройству улич-

ного освещения приводит иногда к тому, что восстановление и развитие осветительных установок производится без составления технических проектов и соблюдения архитектурных требований. Практика проектирования уличных осветительных установок показывает, что выбор разрядов по признаку интенсивности движения весьма затруднителен вследствие отсутствия необходимых количественных характеристик движения транспорта по отдельным улицам. К тому же классификация улиц исключительно по признаку интенсивности движения может быть оправдана лишь для весьма крупных городов. Центральные улицы большинства районных и областных центров обычно относятся к IV или V разряду, однако при этом не учитываются факторы значимости этих улиц и перспективы развития уличного движения.

Совещание в своем решении отметило необходимость разработки норм освещенности улиц применительно к классификации улиц, утвержденной Комитетом по делам архитектуры при Совете Министров СССР. Проект этих норм приведен в табл. 1.

Указанная классификация улиц почти полностью исчерпывает встречающиеся на практике типы улиц городов и рабочих поселков. Предлагаемые нормы освещенности не выходят за пределы норм, установленных стандартом, и являются, по существу, рекомендацией, дополняющей его.

Недостатком действующего стандарта является также установленное им ограничение яркости видимых частей светильников в пределах защитного угла до  $3 \div 0,5$  sb. Это исключает, по существу, возможность применения в уличных осветительных установках наиболее экономичных приборов—зеркальных и призматических светильников.



Таблица 1

Разряд улиц	Характеристика улиц	Общая ширина улиц, м	Ширина проезжей части, м	Минимальная горизонтальная освещенность, lx	
				для городов и районов республиканского значения	для остальных городов и поселков
Высший	I. Магистральные улицы				
	Транспортные артерии крупных городов	По специальному расчету	6	—	
	I Остальные парадные и бульварные улицы, соединяющие основные общественные центры, площади, вокзалы, стадионы	35—75	25—65	4	3
	II Общегородские	35—40	25—30	3	2
III	Межрайонного и внутрирайонного значения	30	22	2	1
IV	Общепоселковые	20—25	15—19	—	0,5
II. Жилые улицы					
	I Улицы на территории многоэтажной застройки для связи с магистралями	15—20	10—16	1	0,5
	II Улицы на территории малоэтажной застройки	12—15	9—12	0,5	0,2
III	Тупики, переулки	Не менее 6	0,2	0,2	

Действие блескости светильников наружного освещения исследовалось неоднократно. Исследование вопроса влияния яркости светильников на наружного освещения на ослепленность производилось нами совместно с Институтом общей и коммунальной гигиены Академии медицинских наук. Для сравнительной оценки блескости светильников были подвергнуты испытаниям три типа осветительных приборов: шар молочного стекла, зеркальный широкоизлучатель типа АКХ-5 и призматический светильник типа Голофан. Измерение значения яркости отдельных элементов поверхностей этих приборов показало, что наибольшая величина яркости в направлении максимума силы света светильника составляет: для шара молочного стекла  $B_m = 2$  sb; для светильника АКХ-5—36 sb и светильника Голофан—400 sb. Освещенность  $E_s$ , создаваемая блеским источником света на зрачке наблюдателя, для всех трех типов приборов была постоянной и составляла 4 lx. Опыты производились при четырех вариантах освещенности фона  $E_{\phi} = 1; 2; 4$  и 8 lx при угле зрения блеского источника  $\theta = 5, 10$  и  $15^\circ$  и коэффициенте отражения поверхности фона  $\rho = 0,1$ . Было исследовано изменение контрастной чувствительности глаза и времени различения контрастов под воздействием блескости. В качестве тестов применялись кольца Ландольта одного

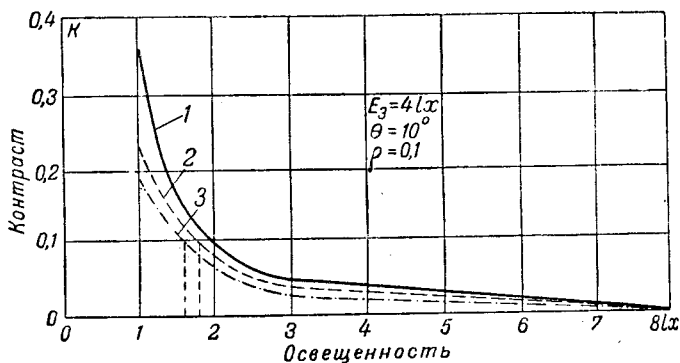


Рис. 1. Кривые зависимости контраста от освещенности фона.

1 — светильник Голофан; 2 — зеркальный светильник АКХ-5; 3 — шар молочного стекла.

углового размера, но с различными коэффициентами отражения. Контраст между фоном и объектом изменялся в пределах от 0,04 до 0,4. В результате исследования были получены данные, устанавливающие зависимость ослепленности от угла зрения, яркости фона и яркости блеского светильника. На рис. 1 и 2 приведены кривые зависимости контраста  $K$  и времени различения контраста  $T_k$  от освещенности фона, в условиях, наиболее близких к реальным условиям освещения улиц. Анализ полученных результатов позволяет оценить блескость зеркального и призматического светильников по сравнению с блескостью диффузных светильников, обладающих незначительной яркостью. Из кривых рис. 1 видно, что минимально различимый контраст в условиях освещения широкоизлучателями резко увеличивается при освещенности фона выше 2 lx. Но эта закономерность имеет место и при освещении диффузными светильниками. При этом разница в абсолютных значениях различаемого контраста столь незначительна, что она полностью компенсируется небольшим увеличением освещенности фона. Так, различение контраста в 0,1 достигается в условиях освещения диффузными светильниками при  $E_{\phi} = 1,6$  lx, а в тех же условиях освещения зеркальным светильником при  $E_{\phi} = 1,75$  lx. При освещенности фона свыше 8 lx минимально различимый контраст для всех светильников практически одинаков.

Аналогичные результаты дает анализ характеристик времени различения контраста (рис. 2). Таким образом, приведенные лабораторные исследования показывают, что видение в условиях освещения улиц мало зависит от яркости блеских источников.

Исследования указывают также на незначительное влияние яркости блеских источников на общие условия видения. Современные исследователи, рассматривая действие блескости, резко разделяют его на две составляющие. К первой относится прямая или слепящая блескость, действующая непосредственно на функции зрения и зависящая исключительно от величины светового потока, который попадает

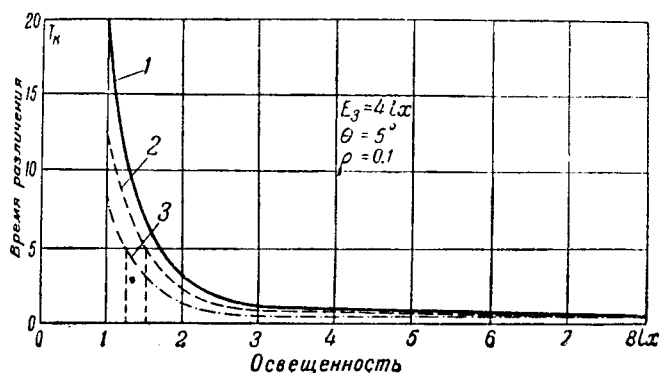


Рис. 2. Кривые зависимости времени различения контраста от освещенности фона.

1 — светильник Голофан; 2 — зеркальный светильник АКХ-5; 3 — шар молочного стекла.

в глаз наблюдателя, и угла зрения. Вторая составляющая так называемая дисккомфортная блескость, зависит от яркости блеского источника, от контраста между блеским источником и фоном и от общих условий адаптации. В условиях уличного освещения Дисккомфортная блескость имеет весьма малое значение.

На рис. 3 приведены результаты исследования влияния на ослепленность экранирования блеского источника при различных углах максимальной силы света. Экранирование производится при помощи непрозрачного щита, располагаемого между блеским источником и глазом наблюдателя. Из приведенных кривых видно, что действие блескости почти не сказывается на уменьшении видения при углах максимальной силы света блеского источника  $75^\circ$  и ниже.

Наиболее приемлемым способом уменьшения ослепленности является увеличение высоты подвеса светильников, так как при этом возрастает угол между линией зрения и блеским источником. Действие этого фактора иллюстрирует кривая рис. 4, которая дает зависимость между высотой подвеса светильников в  $m$  и относительной ослепленностью. Видно, что увеличение высоты подвеса светильников резко уменьшает ослепленность от блеских источников уличного освещения. Необходимо также учесть, что в поле зрения наблюдателя в уличных условиях имеется обычно и ряд других блеских источников, как яркие покрытия, встречные фары и т. п., яркость которых не может быть ограничена.

На основании сказанного можно сделать вывод о нецелесообразности ограничения яркости светильников уличного освещения. Для уменьшения действия блескости этих светильников необходимо нормировать минимальные значения высоты подвеса светильников в зависимости от мощности источников света.

Весьма важным фактором, определяющим качество освещения и эффективность установок, является тип применяемого осветительного прибора. В уличных осветительных установках наших городов в качестве источника света применяются в настоящее время почти исключительно

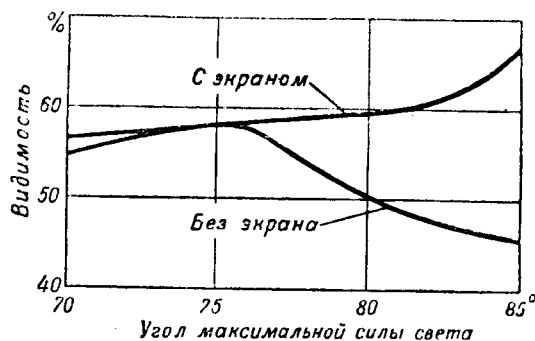


Рис. 3. Влияние экранирования блеского источника света на видимость.

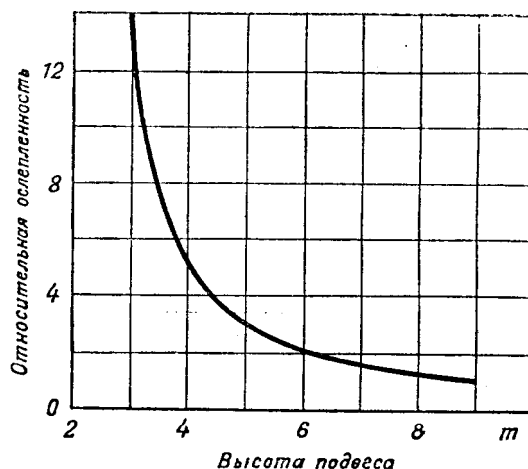


Рис. 4. Зависимость относительной ослепленности от высоты подвеса светильников.

стандартные лампы накаливания. Эффективность установок может быть, как известно, повышена применением ламп с большей световой отдачей — ртутных или смешанного света.

Известны попытки использовать люминесцентные лампы в установках городского освещения. Однако, исследования опытных установок показали, что в условиях уличного освещения установки с люминесцентными лампами обладают пока меньшей эффективностью, чем рациональные установки с лампами накаливания. Это обусловлено, главным образом, размерами светящегося тела и малой плотностью свечения люминесцентных ламп, что затрудняет концентрацию их светового потока в необходимых телесных углах.

Весьма эффективным является применение низковольтных ламп накаливания, световая отдача которых на 15—20% выше, чем у стандартных ламп накаливания. Такие лампы включаются последовательно в высоковольтную сеть, что дает значительную экономию меди.

Возможность использования для освещения городов источников света с высокой световой отдачей требует широких исследований и является одной из основных задач наших научно-исследовательских институтов и заводских лабораторий. В ближайшие годы необходимо рассчи-

тивать на почти исключительное применение в уличных установках ламп накаливания, и задачей наших заводов является всемерное улучшение качества их, в особенности ламп большой мощности.

Не менее важным для эффективности уличных осветительных установок является характер распределения силы света применяемых светильников. Это обусловлено профилем и значительными размерами освещаемых поверхностей, а также характеристиками уличных покрытий, требующих соответствующего перераспределения светового потока источников света для создания условий видения при минимальной установленной мощности и минимуме первоначальных и эксплуатационных расходов. Такое перераспределение светового потока достигается, как известно, применением оптических систем, действующих на принципе преломления и отражения света.

Эффективность применения широкоизлучателей с оптическими системами видна из приведенных в табл. 2 данных о выполненных установках наружного освещения в различных странах.

Таблица 2

Где выполнена установка	Ширина улицы, м	Шаг светильников, м	Высота подвеса, м	Тип светильника	Удельные показатели при $E = 10 \text{ lx}$		
					Световой поток, $\text{lm/m}^2$	Мощность лампы, $\text{W/m}^2$	Эффективность, $\text{lm/W}$
СССР	26	29	8,5	Зеркальный с лампой накаливания	16	1,0	9,8
	33	40	9	То же	24	1,2	8,3
	30	27	6,5	Диффузный с лампой накаливания	60	3,8	2,6
	28	30	7	Прямого света с лампой накаливания	50	3,4	3,0
Англия	21	40	7	Призматический с лампой накаливания	19	1,0	8,6
	24	20	8	То же зеркальный	22	1,3	7,1
	20	27	7	То же диффузный	66	4,1	2,3
	18	42	7,5	Зеркальный с ртутной лампой	27	0,7	13
США	44	33	8,5	То же	20	0,5	15,6
	36	30	7,5	Призматический с лампой накаливания	17	0,8	9,5
	22	25	7,5	То же диффузный	74	4,9	1,9

В табл. 2 приведены удельные показатели установок, из которых видно, что удельный расход мощности в установках с газосветными лампами (при  $E=10 \text{ lx}$ ) составляет 0,5—0,7  $\text{W/m}^2$ , в установках с призматическими и зеркальными светильниками с лампами накаливания 0,8—1,3  $\text{W/m}^2$ , а в установках с диффузными приборами—3,4—4,9  $\text{W/m}^2$ . Эффективность установок (отношение использованного светового потока к мощности установки) соответственно равна:  $13 \div 15,6$ ;  $7,1 \div 9,8$ ;  $1,9 \div 2,6 \text{ lm/W}$ .

В уличных осветительных установках наших городов применяются в основном нерациональ-

ные светильники прямого и рассеивающего света. Необходимо указать, что в области расчета и конструирования зеркальных и отчасти призматических светильников нашими научно-исследовательскими институтами проделана большая работа. В результате были освоены методы расчета сложных оптических систем для светильников наружного освещения, разработан и исследован ряд опытных образцов зеркальных широкоизлучателей типа ВЭИ и АКХ, зеркальные лампы ВЭИ и т. д. Однако, военные условия и возникшие в связи с войной временные затруднения в стекольной промышленности задержали массовый выпуск этих приборов. Учитывая исключительную важность применения рациональных светильников для улучшения освещения наших городов, необходимо более детально проанализировать состояние и перспективы развития этой области.

Как уже было указано, эффективность осветительного прибора для наружного освещения обусловлена в основном характером перераспределения светового потока лампы и определяется обычно характеристиками распределения силы света в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Характеристика распределения силы света светильника в вертикальной плоскости определяется высотой его подвеса и шагом. Рекомендуемая в настоящее время типовая характеристика для светильников наружного освещения приведена на рис. 5,б. Представленная кривая распределения силы света имеет максимум под углом  $70-80^\circ$  от вертикали. Хорошие условия освещения требуют, чтобы основная часть светового потока светильника была направлена на проезжую часть улицы и меньшая часть была использована для освещения тротуаров и фасадов зданий. Таким образом, в уличных условиях более экономично несимметричное распределение силы света.

Степень асимметричности светораспределения, требуемая от каждого светильника, неодинакова для различных профилей улиц, и таким образом, необходимо большое количество характеристик наивыгоднейшего распределения силы света в горизонтальной плоскости, что является практически мало достижимым. Комитет по уличному освещению Американского светотехнического общества рекомендует пять типовых кривых распределения силы света в горизонтальной плоскости, удовлетворяющих наибольшему числу встречающихся на практике профилей улиц и дорог. Эти кривые изображены на рис. 5,а. Кривая I дает двустороннее распределение силы света для светильников центрального подвеса. Кривые типа II, III и IV дают соответственно узкое, среднее и широкое распределение для бокового подвеса. Кривая типа V дает симметричное распределение для освещения площадей, перекрестков и т. п. Анализ рекомендуемых типовых кривых, проведенный нами, показал, что в наших условиях целесообразнее вместо кривой типа III принять другую характеристику распределения силы света IIIa. Эта кривая наиболее пригодна для освещения широких улиц, а также в

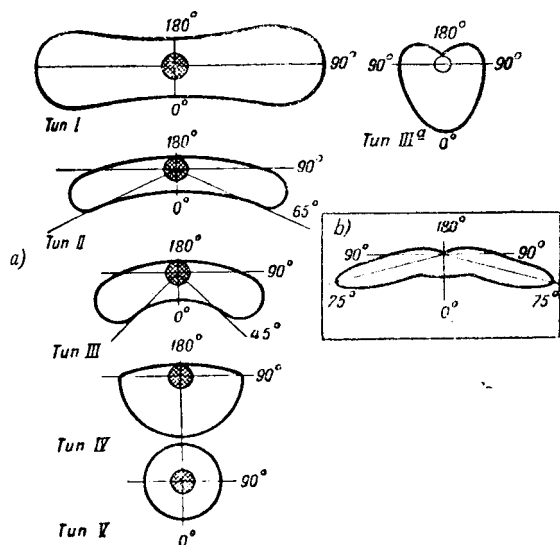


Рис. 5. Типовые характеристики распределения силы света.

a — в горизонтальной плоскости; b — в вертикальной плоскости.

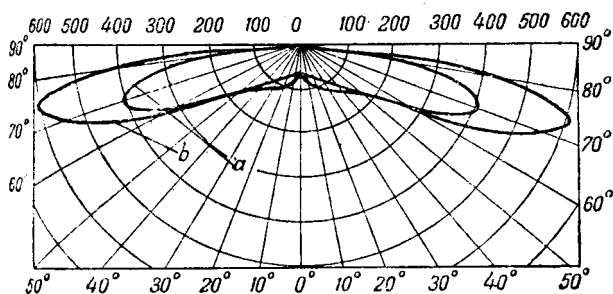


Рис. 6. Кривые распределения силы света в вертикальной плоскости.

a — светильника рефлекторно-дефлекторного типа; b — светильника рефлекторно-рефракторного типа.

случае шахматного расположения осветительных приборов.

Светильники, приближающиеся по своим характеристикам к описанным типам кривых, должны иметь наиболее широкое применение для освещения улиц и дорог. Естественно, нельзя предположить, что практика освещения улиц должна ограничиваться приведенными характеристиками распределения силы света. Нельзя также предположить, что при проектировании осветительных приборов будут созданы характеристики, в точности соответствующие приведенным типовым кривым, но необходимо, чтобы расхождения между ними были, по возможности, минимальными.

Кроме характера распределения потока большое значение имеет абсолютная величина максимальной силы света в области наибольшего усиления. Наибольшее применение в городских осветительных установках имеют светильники, характеристики которых изображены на рис. 6. Кривая a относится к светильнику рефлекторно-дефлекторного типа, оптическая система которого состоит из верхнего симметричного отражателя и одной или нескольких боковых зеркальных вставок. Кривая b относится к светильнику рефлекторно-дефлекторного типа с оптической си-

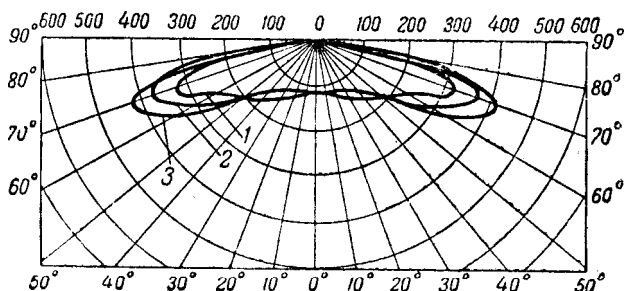


Рис. 7. Кривые распределения силы света в вертикальной плоскости.

1 — зеркальной лампы типа ВЭИ; 2 — зеркального светильника типа АКХ бокового подвеса; 3 — зеркального светильника типа АКХ центрального подвеса.

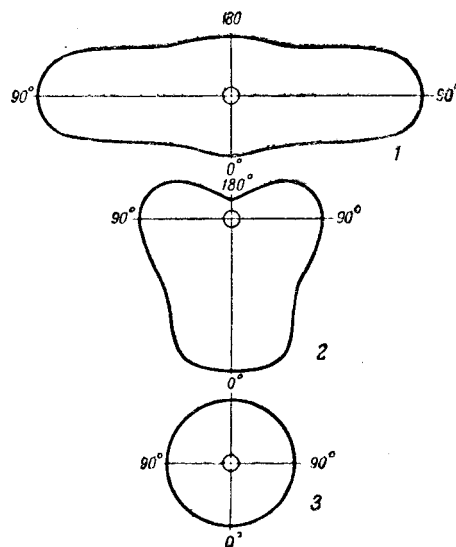


Рис. 8. Характеристики распределения силы света в горизонтальной плоскости серии светильников типа АКХ.

1 — несимметричное вдоль улицы; 2 — несимметричное поперек улицы; 3 — симметричное распределение.

стемой, состоящей из верхнего симметричного отражателя и нижнего рефрактора. Как видно из этих кривых, первый тип светильника имеет максимальную силу света 400 sb при  $\alpha = 70^\circ$ ; во втором светильнике — 600 sb при  $\alpha = 75^\circ$ .

В Советском Союзе в настоящее время освоены в производстве и частично выпускаются следующие типы рациональных светильников для наружного освещения: зеркальные светильники типа ВЭИ, серия зеркальных светильников типа АКХ, зеркальные лампы типа ВЭИ.

Характеристики этих осветительных приборов в вертикальной плоскости приведены на рис. 7.

На рис. 8 приведены характеристики распределения силы света в горизонтальной плоскости серии светильников типа АКХ. Эта серия состоит из трех размеров зеркальных светильников для ламп мощностью в 150 ÷ 200, 300 ÷ 500 и 750 ÷ 1000 W. Светильники имеют сменную оптику, определяющую характер распределения силы света: 1 — несимметричный отражатель дает преимущественное направление потока вдоль улицы; 2 — симметричный отражатель совместно с плоским боковым отражателем направляет по-

ток преимущественно поперек улицы; 3—снямая боковой отражатель, получаем светильник с симметричным распределением потока; таким образом, эта серия по характеру распределения силы света соответствует типовым кривым I, III a и V (рис. 5). В настоящее время эти светильники, конструктивно оформленные Мосгорсветом, применяются для освещения ряда улиц Москвы (ул. Фрунзе, ул. Калинина, Кузнецкий мост и т. д.). Измерения освещенности, произведенные Мосгорсветом, показали, что минимальная горизонтальная освещенность проезжей части этих улиц составляет 3,5—12,5 лк при средней равномерности 1:3.

Однако, работа по созданию рациональных осветительных приборов этим не может ограничиться, так как указанные типы светильников не включают всю серию типовых характеристик, необходимую для освещения улиц различных профилей. Кроме того, перераспределение светового потока в этих светильниках производится исключительно отражающими системами, при которых направление максимальной силы света  $\alpha$  равно 70°. При этом шаг светильников в осветительных установках не может практически превышать четырехкратной высоты их подвеса, что снижает эффективность отдельных установок. Лучшими характеристиками как светотехническими, так и эстетическими обладают светильники с призматической оптикой. Возможность получения в этих светильниках максимального угла излучения в 75—80° позволяет в отдельных случаях увеличить шаг светильников до шестикратной и восьмикратной высоты их подвеса. Призматическая оптика также необходима для создания рациональных светильников венчающего типа. Возможность получения фотометрического тела любой формы, хорошие эксплуатационные качества и красивый внешний вид делают этот тип светильников наиболее приемлемым для освещения центральных улиц городов.

Весьма важной задачей являются также изучение и освоение новых отражающих и рассеивающих материалов, как альзак, рифленые стекла и т. п., имеющих большое значение для повышения экономичности и улучшения качества зеркальных осветительных приборов. Скорейшее

решение этих задач и налаживание нашей промышленностью выпуска рациональных осветительных приборов являются непременным условием для возможности коренного улучшения и реконструкции городского освещения.

Большое значение имеют также работы, проводимые по линии улучшения архитектурного оформления осветительных установок. Комитетом по делам архитектуры разработан ряд типовых опор для осветительных установок улиц, площадей, городских парков и садов. Установлена классификация фонарей и опор и в настоящее время продолжают работы по архитектурному оформлению установок.

В решениях упомянутого выше научно-технического совещания намечены реальные мероприятия по улучшению городского освещения. Организация в городах эксплуатационно-ремонтной службы уличного освещения, разработка пятилетнего плана развития уличного освещения, организация производства рациональных осветительных приборов, выпуск технических указаний по проектированию и устройству осветительных установок и ряд других организационно-технических мероприятий, проводимых в этой области, обеспечивают коренное улучшение городского электрического освещения.

Начатая в настоящее время реконструкция городского освещения должна быть проведена на основах последних достижений науки и техники в этой области. Некоторые вопросы еще требуют дополнительного изучения, однако основные положения эффективности освещения улиц выяснены в достаточной степени. Реализация промышленностью и городскими организациями разработанных в настоящее время предложений позволит в значительной степени улучшить освещение наших городов.

#### Литература

1. Решения республиканского научно-технического совещания по вопросам уличного освещения. Издательство Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1946.
2. ГОСТ 1002—41. Городское электрическое освещение, 1941.
4. Б. Ф. Федоров, С. Н. Федоткин, Я. Б. Зильберblatt. Зеркальные светильники типа АКХ для освещения улиц. Издательство МКХ, 1947.



# Экспериментальное определение параметров электрической системы, влияющих на процесс автоматического регулирования частоты и мощности

Доктор техн. наук **И. М. МАРКОВИЧ** и кандидат техн. наук **С. А. СОВАЛОВ**

Мосэнерго и Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Для выбора и правильной настройки автоматических устройств по регулированию частоты и мощности необходимо знать величину некоторых параметров системы: а) скорость изменения суммарной нагрузки системы и характер колебаний этой нагрузки; б) колебания частоты в нерегулируемой системе; в) результирующий «статизм» системы с учетом частотной характеристики нагрузки; г) наклон частотной характеристики нагрузки в зоне нормальной частоты; д) скорость и характер изменения частоты при резких (мгновенных) нарушениях баланса мощностей в системе (сбросы нагрузок, отключения генераторов и т. п.). В мае — августе 1947 г. по программе, предложенной Энергетическим институтом Академии наук СССР, были проведены испытания в энергосистеме, позволившие в ряде случаев определить некоторые из параметров количественно, а некоторым параметрам дать предварительную оценку.

**Исследование колебаний суммарной нагрузки системы.** При анализе условий работы устройств, осуществляющих автоматическое регулирование частоты и экономического распределения нагрузки между станциями, необходимо знать характер изменения суммарной нагрузки системы более подробно, чем по часовым записям нагрузок отдельных станций.

Исследование колебаний суммарной нагрузки системы проводилось следующим образом. Перед испытанием все станции системы, за исключением гидроэлектростанции, которая регулировала частоту, получали указания о том, чтобы в промежутке времени, отведенном для испытаний, персонал станций не регулировал нагрузку агрегатов; на тепловых станциях персонал должен был лишь поддерживать постоянство параметров пара. Персонал частотной станции (гидроэлек-

*Освещаются результаты проведенных в одной из энергосистем испытаний по определению колебаний суммарной нагрузки и скоростей ее изменения, по определению характера колебаний частоты, полного статизма системы, частотной характеристики нагрузки и характера изменения частоты при резких нарушениях баланса в системе. Результаты проведенных испытаний представляют интерес как для установления рациональных требований к автоматическому регулированию частоты, так и для диспетчерской эксплуатации энергетических систем.*

тростанции) получал указание регулировать частоту в системе от руки — с возможной максимальной точностью. Перед началом испытаний на частотной станции создавался необходимый регулировочный резерв (с учетом ожидаемого изменения суммарной нагрузки). В процессе испытаний проводилось наблюдение за частотой на диспетчерском пункте системы, с помощью точного стрелочного частотомера, и за изменением нагрузки агрегатов, регулирующих частоту, — на щите управления частотной станции. Нагрузка агрегатов, регулирующих частоту, записывалась каждые 1—2 мин в момент, когда частота была равна 100 переманам.

На рис. 1 даны результаты одного из испытаний, проведенного в период вечернего подъема нагрузки 23 июня 1947 г. Как видно из кривой изменения нагрузки, рост нагрузки системы происходит с большой неравномерностью. Сред-

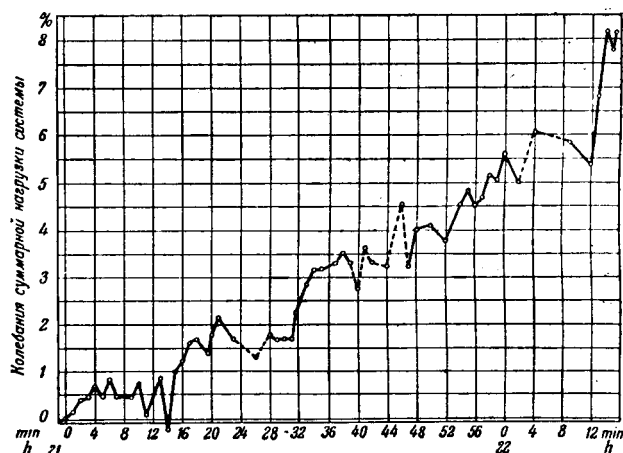


Рис. 1. Колебания суммарной нагрузки системы (23 июня 1947 г.).

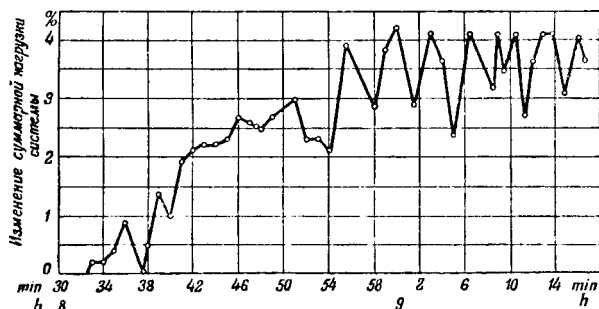


Рис. 2. Колебания суммарной нагрузки системы (24 июня 1947 г.).

няя часовая скорость подъема нагрузки в период времени от 21 до 22 часа составляет 5,6% в час, порядка 0,1% в минуту. Того же порядка и средняя скорость за весь период испытаний. Однако, максимальная скорость подъема нагрузки во много раз больше средней скорости и достигает значения порядка 1,5% в минуту. При величине роста нагрузки за весь рассматриваемый период (1 час. 17 мин.) 8%, в течение 2 мин. нагрузка увеличилась на 2,85%. Момент наиболее интенсивного роста нагрузки совпал с моментом быстрого потемнения.

Из кривой изменения суммарной нагрузки видно также, что рост нагрузки сопровождается довольно значительными нерегулярными колебаниями. При общей тенденции к росту нагрузка в отдельные моменты снижается. Длительность снижения составляет 1—3 мин, а величина снижения доходит до 1—1,3%. Снижение это происходит со скоростями, сравнимыми с максимальными скоростями подъема нагрузки; наибольшая скорость временного снижения нагрузки—1,3% в минуту.

Проведенные испытания устанавливают изменение нагрузки с точностью порядка 0,1—0,2%. При проведении испытаний некоторые станции временами не выдерживали строго условия поддержания постоянной мощности. В этих случаях изменения мощности этих станций фиксировались и учитывались в виде поправок при построении результирующей кривой изменения суммарной нагрузки системы; пунктирные части кривой соответствуют интервалам, для которых вносились указанные поправки.

На рис. 2 даны результаты аналогичного испытания, проведенного 24 июня 1947 г. в часы утреннего подъема нагрузки. Из рисунка видно наличие значительных нерегулярных колебаний нагрузки как в период роста, так и в период стабильной средней нагрузки. При почти постоянной средней нагрузке размах этих колебаний достигает 1,7%, скорости и снижения нагрузки при колебаниях доходят до 1,3—1,6% в минуту. Частота колебаний—7 колебаний за 20 мин (1 колебание в 2—5 мин).

Наблюдения за колебаниями нагрузки проводились и при других испытаниях. Они подтвердили приведенные выше результаты.

**Колебания частоты в энергосистеме.** Особое внимание было уделено наблюдениям за коле-

баниями частоты в нерегулируемой системе, так как характер этих колебаний определяет основные требования к автоматическим регуляторам частоты.

Испытания для нерегулируемой системы проводились как в часы стабильной нагрузки, так и в часы подъема нагрузки. Был принят следующий порядок испытаний. За некоторое время до испытаний персонал станций предупреждался о том, что в течение промежутка времени, отведенного для испытаний, запрещается регулировать нагрузку агрегатов. Персоналу тепловых станций было указано на необходимость поддерживать постоянство пара в котельных. Для испытаний выбирался промежуток времени, на протяжении которого тепловые электростанции системы должны были по графику нести стабильную нагрузку. При необходимости изменить нагрузку какой-либо из электростанций испытания прекращались и возобновлялись лишь после установления постоянного режима на всех станциях системы. Непосредственно перед испытанием частота в системе регулировалась с помощью одной из мощных гидростанций.

В момент начала испытаний частотная станция получала команду—прекратить регулирование частоты и возобновить регулирование только в том случае, если частота выйдет за допустимые пределы 99—101 перемен. С момента прекращения регулирования на центральном диспетчерском пункте системы проводилась запись значений частоты каждые 2 сек. по показаниям стрелочного частотомера, сверенного с эталонным прибором.

Первая группа испытаний проведена 30 мая 1947 г. после утреннего максимума нагрузки. За время испытаний (от 11 до 12 час. 20 мин.) нагрузка объединенной системы изменилась всего на 3%. Для интервала 5—10 мин нагрузку системы можно считать стабильной. Следующая группа испытаний проведена в тот же день в часы дневного провала нагрузки системы—также в период, когда нагрузка системы была практически постоянной<sup>1</sup>.

Чтобы наблюдения не носили случайного характера, испытания были повторены в другие дни, в те же и в другие часы дневного периода времени.

На рис. 3 и 4 в качестве примера даны графики колебаний частоты, отображающие часть проведенных наблюдений (точному значению 100 перемен соответствует показание прибора 50,25).

Анализ результатов записи колебаний частоты в нерегулируемой системе в часы стабильной дневной нагрузки приводит к следующим выводам. Прежде всего следует отметить, что в рассматриваемые часы стабильной (средней) нагрузки системы средняя частота нерегулируемой системы поддерживалась практически постоянной. В период стабильных нагрузок система дли-

<sup>1</sup> Речь идет о постоянстве средней нагрузки. Наблюдающиеся нерегулярные колебания нагрузки около среднего значения могут быть оценены по приведенным в предыдущем разделе данным.



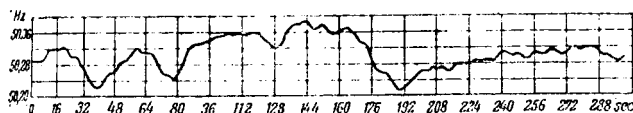


Рис. 3. Колебания частоты нерегулируемой системы (11 час. 19 мин. 13 июня 1947 г.).

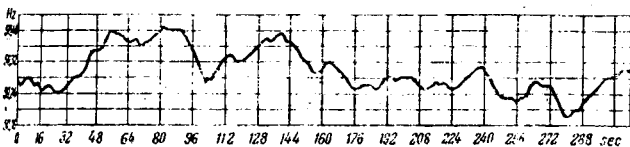


Рис. 4. Колебания частоты нерегулируемой системы (15 час. 24 мин. 13 июня 1947 г.).

тельно работала без всякого регулирования и обычные требования к частоте при этом не нарушались.

Анализ графиков показывает, что наблюдаемые колебания частоты не являются регулярными. С достаточной достоверностью можно говорить только о величинах наблюдаемых отклонений от среднего значения и длительности этих отклонений. Величина отклонений обычно достигает значения 0,2% и в редких случаях несколько превышает это значение. Количество отклонений от среднего значения при величине отклонения 0,1–0,2 от 5 до 15 отклонений в 10 min—при неравномерном их распределении во времени. Длительность незакономерных отклонений той же величины изменяется в весьма широких пределах—от нескольких секунд до 1,5 min.

Следующая серия испытаний проводилась в вечерние часы. Часть наблюдений относится к периоду, предшествующему максимуму нагрузки; часть к периоду наиболее интенсивного роста нагрузки (10% за час), и, наконец, остальные—к периоду почти стабильной нагрузки (медленный спад).

Результаты испытаний в период медленного роста нагрузки показывают, что на плавное медленное изменение частоты системы накладываются перегрузочные колебания частоты, имеющие в общем тот же характер, что и наблюдавшиеся при предыдущих испытаниях. Однако, величина нерегулярных отклонений в некоторых случаях больше, чем указанная выше, и достигает 0,25–0,30%.

При испытаниях, проводившихся в период роста нагрузки (рис. 5), наблюдалась картина медленного снижения средней частоты системы с наложенными нерегулярными колебаниями того же характера. Для характеристики изменения частоты в период роста нагрузки укажем, что от наивысшего значения 50,40 Hz она упала до 49,80 Hz за время порядка 10 min.

Характеризуя колебания частоты в нерегулируемой системе, следует отметить также наблюдавшиеся скорости изменения частоты при ее колебаниях—они достигали наибольшего значения 0,02% в секунду.

Для сопоставления колебаний частоты в нерегулируемой системе с колебаниями частоты

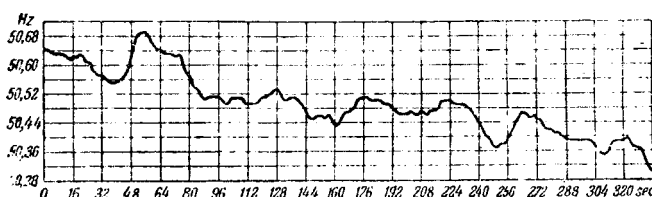


Рис. 5. Колебания частоты нерегулируемой системы (22 час. 6 мин. 13 июня 1947 г.).

при ручном и автоматическом регулировании были произведены наблюдения: а) при ручном регулировании на тепловой электростанции и б) при автоматическом регулировании на гидроэлектростанции (регулятор Острога, действовавший на два генератора). Эти наблюдения, проводившиеся в часы относительно стабильной нагрузки, показали, что незакономерные колебания частоты имеют тот же характер, что и в нерегулируемой системе и иногда даже несколько увеличиваются при автоматическом регулировании, видимо, за счет незначительного «перерегулирования».

**Определение статизма системы.** Под статизмом системы понимается выраженное в процентах отношение двух относительных величин: изменения частоты и изменения мощности, вызвавшего это изменение частоты. Статизм системы, следовательно, определяет относительное изменение частоты, вызванное относительным небалансом активной мощности в системе (отнесенным к суммарной номинальной мощности включенных генераторов или к суммарной нагрузке системы). Например, статизм в 12% означает, что при возникновении небаланса системы в 1% частота изменится на 0,12%.

Статизм системы зависит, как известно, как от статизма характеристик регуляторов скорости всех работающих первичных двигателей (в точках их фактической работы) и их номинальной мощности, так и от статизма суммарной частотной характеристики нагрузки потребителей электроэнергии (включая потери в сетях). Он также зависит от знака изменения частоты, так как статизм регуляторов скорости отдельных агрегатов зависит от этого знака. Так, например, агрегат, работающий при полном впуске энергоносителя, имеет бесконечно большой статизм при понижении частоты.

Ввиду сказанного статизм системы не является величиной постоянной, а может изменяться в зависимости от того, какие агрегаты включены в работу, и от величины их нагрузки, а также от величины и характера суммарной нагрузки потребителей (доля промышленной нагрузки, характеристики привода электродвигателей и т. д.). Заметим, что вызванное изменением частоты и некомпенсированное действием автоматических устройств изменение напряжения также влияет на частотную характеристику системы.

Величина статизма системы, входящей в объединение систем, определяет степень участия системы в покрытии возникающих небалансов на-



грузки всего объединения и, следовательно, существенно влияет на величину обменных потоков мощности (пока не сказалось действие автоматических регуляторов частоты и мощности).

Знание статизма системы позволяет по оценке возможных изменений суммарной нагрузки судить об изменениях частоты нерегулируемой системы и, наоборот, по изменениям частоты судить о возникающих «небалансах» активной мощности в системе.

Испытания по определению статизма системы производились следующим образом. За 15—20 минут до испытаний персонал всех станций предупреждался, что в течение отведенного для испытаний промежутка времени частота в системе будет изменяться в пределах 99—101 перем. Персонал всех электростанций кроме частотной не должен регулировать нагрузку агрегатов. Устанавливалась предельная (максимальная или минимальная) нагрузка частотных агрегатов. После этого в течение 1—2 мин проводилась запись значений частоты (через каждые 5—10 сек.) для того, чтобы охарактеризовать колебания частоты при неизменной мощности частотной электростанции. Затем по команде быстро до предела изменялась нагрузка частотных агрегатов, фиксировалось значение частоты в момент подачи команды и изменение частоты (также через 5—10 сек) в процессе изменения нагрузки частотных агрегатов. Отмечался момент установки заданной нагрузки частотных агрегатов, и частота вновь фиксировалась в течение нескольких минут.

Точность результатов испытания была ограничена тем обстоятельством, что даже при полном использовании регулировочной способности частотных агрегатов изменение мощности частотной электростанции составляло величину порядка 3—4% от суммарной нагрузки системы и при сравнительно небольших изменениях частоты, обусловленных изменением нагрузки частотной станции, искажающее влияние существующих в системе нерегулярных колебаний частоты, не могло быть полностью устранено.

Статизм системы определялся по значениям частоты в момент подачи команды на изменение мощности и в момент, когда эта команда выполнена и агрегаты загрузились на заданное значение мощности. Так как точность результатов зависит также от того, насколько быстро осуществляется изменение нагрузки частотных агрегатов (в особенности если испытания проводятся в период роста или спада нагрузки), это изменение осуществлялось возможно быстрее.

Для определения статизма следует принимать значение частоты, непосредственно следующее за изменением нагрузки частотной станции. Как показали испытания, после каждого быстрого изменения нагрузки наблюдаются не только нерегулярные колебания частоты, но и медленное изменение ее среднего значения, причем это среднее значение изменяется в ту же сторону, в какую изменяется частота в процессе изменения нагрузки частотной станции. Это продолжающееся изменение частоты не характеризует собой

статизма системы и объясняется последующим вмешательством персонала некоторых электростанций, которое не могло быть вполне устранено в условиях мощной системы с очень большим числом станций. Это вмешательство персонала не влияет на точность определения статизма, так как использовались значения частоты, непосредственно следующие за изменением нагрузки частотной станции.

Таблица 1

Определение статизма системы (испытание 23 июня 1947 г. 15 час. 42 мин. Запись частоты каждые 5—10 сек. по показаниям стрелочного частотомера)

Нагрузка частотных агрегатов в % от нагрузки системы	Частота, Hz
6,65	50,27; .27, .36, .38, .28, .26, .24, .35, .38, .42, .38, .36 —
Снижение от 6,65 до 3,1	50,37, .41, .35, .29, .23, .17
3,1	50,14, .11, .11, .11, .08, .09, .11, .07, .05, .08, .10, .09, .14, .08 +
Увеличение от 3,1 до 6,65	50,07, .05, .08, .12, .15
6,65	50, .29, .31, .33, .36, .40, .44, .45, .45, .45, .46, .44, .45, .48, .53, .54, . . .41, .42, .42, .43 —
Снижение с 6,65 до 3,1	50,48, .45, .37, .30
3,1	50,17, .11, .10, .07, .09, .16, .14, .08, .07, .08, .05, .05 +
Увеличение от 3,1 до 6,65	50,06, .05, .09, .18, .22, .25
6,65	50, .30, .35, .33, .40, .39, .35, .32, .38, .41, .38, .35, .35

Примечания:

1. Моменты подачи команды отмечены знаками + и — соответственно для команды увеличить и уменьшить нагрузку частотных агрегатов.

2. Для упрощения таблицы целое число герц не повторяется.

3. Нагрузка объединения составляла 81% от суммарной включенной мощности.

Часть результатов испытания, проводившегося в дневные часы 23 июня 1947 г., дана в табл. 1.

Значения статизма системы (за вычетом частотной станции), определенные по результатам испытаний, оказались в пределах 15,3—18% при снижении частоты и 14,6—17,4% при повышении частоты (среднее значение 16,3%), если относить изменение мощности к суммарной номинальной мощности включенных агрегатов, и в пределах 12,4—14,6% при снижении частоты и 11,8—14,1% при повышении частоты (среднее значение 13,2%), если относить изменение мощности к суммарной нагрузке системы.

Испытания проводились при наличии довольно значительного вращающегося резерва; в этих условиях значения статизма при увеличении и уменьшении частоты оказались близкими.

Величина статизма системы была определена также по результатам ряда других проведенных в системе испытаний. К таким испытаниям в первую очередь относятся испытания измене-

ния частоты при мгновенных сбросах мощности в системе.

Все проводившиеся наблюдения за изменением частоты в системе при мгновенном сбросе мощности (отключение нагруженного генератора) показали, что частота системы изменяется весьма быстро — в течение нескольких секунд после мгновенного изменения мощности — и через 3—5 сек достигает наименьшего значения.

Изменение частоты от начального до этого наименьшего значения характеризует статизм системы, так как действия персонала, естественно, запаздывают и к этому времени проявляется только саморегулирование системы (работа регуляторов скорости, влияние частотной характеристики нагрузки).

Таблица 2

Дата опыта	Величина сброса мощности			Статизм, %	
	от суммарной мощности включенных генераторов (за вычетом отключаемого генератора)	от суммарной нагрузки системы (за вычетом нагрузки отключенного генератора)	Изменение частоты от начального до минимального значения (непосредственно после сброса), %	изменение мощности отнесено к суммарной включенной мощности	изменение мощности отнесено к суммарной нагрузке
15 июня 1947 г. 12 час. 45 мин.	1,72	2,12	0,28	16,3	13,2
24 июня 1947 г. 0 час. 18 мин.	3,16	4,00	0,46	14,5	11,5
15 июля 1947 г. 1 час. 40 мин.	3,05	4,52	0,46	15,1	10,2
23 августа 1947 г. 11 час. 37 мин.	2,71	3,2	0,38	14,0	11,9
23 августа 1947 г. 22 час. 34 мин.	6,00	7,50	0,94	15,7	12,5

В табл. 2 приведено определение статизма из опытов сброса мощности.

Среднее из полученных значений соответственно: 15,1% (изменение мощности отнесено к суммарной включенной мощности) и 11,9 (изменение мощности отнесено к суммарной нагрузке). Резюмируя, можно сказать, что порядок величины статизма исследуемой системы составляет 15—17%, если изменение мощности относить к суммарной включенной мощности, и 12—14%, если относить это изменение к суммарной нагрузке.

Полученные значения являются средними для различных часов суток сезона, в течение которого проводились испытания.

**Определение наклона частотной характеристики нагрузки.** Испытания для определения частотной характеристики нагрузки проводились следующим образом. За некоторое время до испытаний персонал всех электростанций (кроме частотной) предупреждался о том, что с момента начала испытаний частота в системе будет изменяться через каждые 3—5 мин. и в течение

3—5 мин интервалов будет поддерживать неизменной. При этих изменениях частоты персонал должен поддерживать нагрузку генераторов неизменной на заданном уровне, т. е. при изменении частоты быстро восстанавливать прежнюю исходную нагрузку генераторов. Изменение частоты системы осуществлялось изменением нагрузки частотной электростанции. После быстрого изменения частоты персонал частотной электростанции в соответствии с полученными указаниями поддерживал постоянство частоты. В течение промежутка времени 3—5 мин. пока частота поддерживалась постоянной, записывалась нагрузка частотных агрегатов; запись производилась в момент, когда при регулировании частота была точно равна заданному значению.

Испытания были проведены в дневные часы.

Практически оказалось возможным изменять частоту системы только на одну перемену в сторону снижения (табл. 3). Как видно из таблицы, при изменении частоты от 100 до 99 перемен, также и при обратном переходе, первая запись мощности при новом значении частоты значительно отличается от последующих. Это объясняется тем, что к этому времени персонал электростанций системы не успевает полностью восстановить прежнюю нагрузку генераторов и величина изменения мощности на одну перемену

Таблица 3

#### Определение частотной характеристики нагрузки (испытания 23 июня 1947 г.)

Время час., мин.	Частота (перемен)	Суммарная нагрузка частотных агрегатов в % от суммарной нагрузки системы	Примечание
12 ч. 10 мин.	99	4,23	Среднее значение 5,85%
	100	6,35	
	100	4,81	
	100	5,70	
	100	5,92	
	100	6,00	
	100	5,92	
	100	6,00	
	100	5,92	
	100	6,22	
11 мин.	99	3,03	4,0%
13 мин.	99	3,85	
14 мин.	99	3,92	
15 мин.	99	3,85	
16 мин.	99	3,92	
17 мин.	99	4,07	
18 мин.	99	4,22	
21 мин.	100	6,45	
22 мин.	100	6,48	
23 мин.	100	5,18	5,4%
24 мин.	100	5,70	
24 мин.	100	5,92	
26 мин.	100	5,34	
26 мин.	100	5,18	
27 мин.	100	5,11	
27 мин.	100	5,11	
28 мин.	100	5,33	

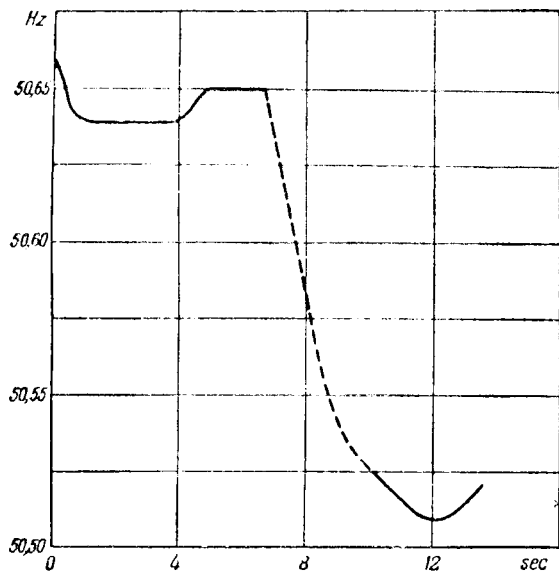


Рис. 6. Изменения частоты при мгновенном сбросе мощности генератора 1,72% (15 июня 1947 г.).

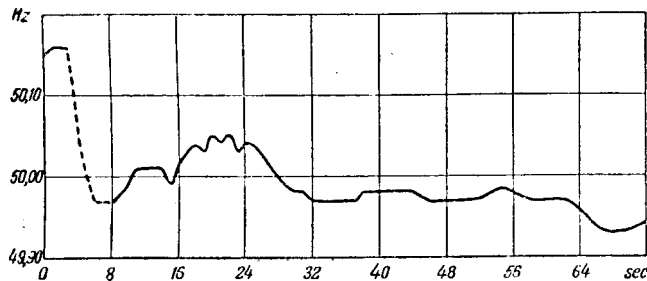


Рис. 7. Изменения частоты при мгновенном сбросе мощности генератора 2,71% (23 августа 1947 г.).

ну является промежуточной между значением, соответствующим результирующему статизму системы, и значением, определяемым только статизмом нагрузки. Последующие записи определяют изменения мощности, обусловленные уже только статизмом нагрузки; однако, величина мощности станции, поддерживающей постоянство частоты, колеблется из-за отмеченных выше нерегулярных колебаний нагрузки системы и в условиях такого испытания трудно рассчитывать на значительную точность результатов. Поэтому произведенные испытания рассматриваются нами, как предварительные. Произведенные испытания определяют только наклон характеристики в интервале 100—99 перем.

Полученные значения, выраженные изменением нагрузки (в процентах от суммарной нагрузки системы) на одну переменную, оказались в пределах 1,4—1,85% на переменную.

**Определение скорости изменения частоты при резких изменениях баланса мощности.** Для определения скорости изменения частоты при резких нарушениях баланса мощностей в системе были выполнены два специальных опыта сброса мощности путем отключения генераторов. Сбрасываемая мощность составляла 1,72% и 3,16% от суммарной нагрузки объединения. Кроме того, были использованы специальные наблюде-

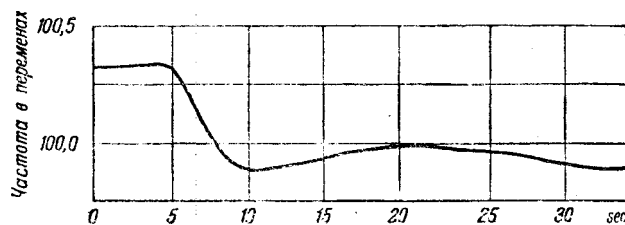


Рис. 8. Изменения частоты при мгновенном сбросе мощности генератора (1 час 40 мин. 15 июля 1947 г.) По регистрирующему частотомеру.

ния в четырех опытах сброса, имевших другое целевое назначение: испытание агрегатов, испытание регулирования, испытание динамической устойчивости и т. п. Сбрасываемая мощность определялась величинами 2,71, 3,03, 6,00 и 12,03%.

Во всех этих испытаниях наблюдалось относительно быстрое понижение частоты в течение 3—5 сек, после чего наступал период нерегулярных колебаний частоты с последующим медленным снижением частоты. Малая длительность периода снижения частоты на первом этапе объясняется быстрым вступлением в работу скоростных регуляторов паровых турбин объединения, которые успевают в течение 3—5 сек загрузить турбины, а также быстрым снижением нагрузки потребителей при снижении частоты. Определенная по этим опытам величина статизма (см. выше) близка к среднему значению статизма по другим испытаниям.

Если разделить величину сброса мощности, отнесенного к суммарной мощности генераторов, на наблюдаемую относительную скорость изменения частоты в начальный момент, то определенные в результате этих испытаний значения инерционной константы всей системы окажутся порядка 10—20 сек, что соответствует среднему значению постоянной механической инерции системы.

На рис. 6—11 представлены кривые изменения частоты, полученные в этих испытаниях. На рис. 6, 7, 9, 10 даны результаты наблюдений по показаниям стрелочного частотомера, на рис. 8 и 11 дана запись регистрирующего частотомера. Некоторое расхождение между показаниями стрелочного прибора и записью регистрирующего (рис. 10 и 11) обусловлено инерцией регистрирующего прибора.

На основании проведенных испытаний можно прийти к выводу, что процесс изменения частоты при внезапном возникновении значительного небаланса активной мощности протекает следующим образом. После быстрого первоначального изменения частоты через 3—5 сек наступает баланс, обусловленный работой регуляторов скорости и частотными характеристиками нагрузки; величина изменения частоты в конце первоначальной, «быстрой» стадии процесса определяется статизмом системы: чем меньше статизм системы, тем меньше отклонение частоты.

За этой стадией следует стадия более медленного изменения частоты, обусловленная вос-

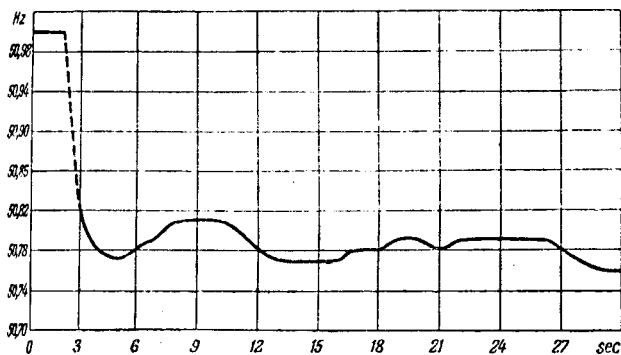


Рис. 9. Изменения частоты при мгновенном сбросе мощности генератора 3,16% (0 час. 18 мин. 24 июня 1947 г.).

становлением нагрузки отдельных турбоагрегатов, автоматически изменившейся из-за работы регуляторов скорости на первой стадии процесса, а также возможным аналогичным регулирующим действием персонала в промышленных установках (частичное восстановление мощности привода). Вторая стадия процесса длится, как правило, не менее нескольких минут.

Следовательно, при аварийном отключении какой-либо мощности быстро — в течение нескольких секунд — установится определяемое статизмом системы уменьшение частоты, после чего в течение нескольких минут частота будет продолжать снижаться за счет снятия перегрузки персоналом станций. Наоборот, при увеличении нагрузки на каком-либо генераторе для повышения частоты системы (например, после ее снижения) или при отключении части нагрузки системы частота быстро поднимается, причем, так как статизм системы при повышении частоты весьма невелик, то подъем частоты на первой стадии процесса окажется очень небольшим (остальные агрегаты системы будут сбрасывать нагрузку), и лишь на второй стадии по мере восстановления нагрузки агрегатов частота будет медленно повышаться.

**Заключение.** Результаты проведенных испытаний представляют интерес не только для установления рациональных требований к автоматическому регулированию частоты, но и для диспетчерской эксплуатации энергетических систем,

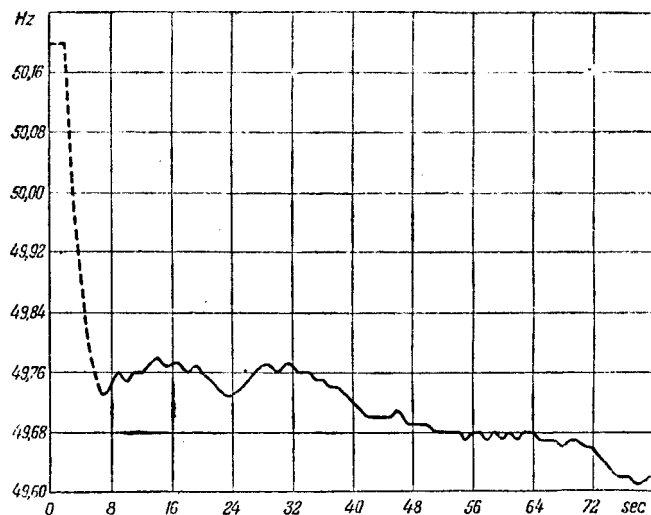


Рис. 10. Изменения частоты при мгновенном сбросе мощности генератора 6,0% (23 августа 1947 г.).

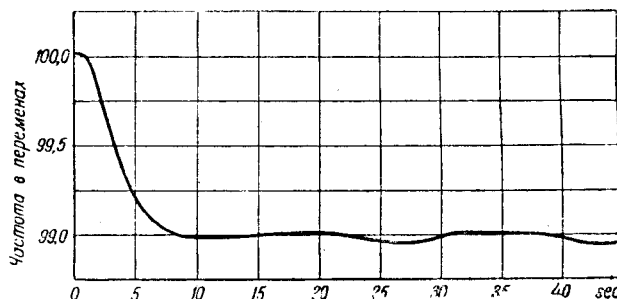


Рис. 11. Изменения частоты при мгновенном сбросе мощности генератора 6,0% (22 час. 34 мин. 23 августа 1947 г.). По регистрирующему частотомеру.

так как определяют весьма важные, до сих пор мало известные характеристики мощных энергосистем, знание которых для диспетчера системы обязательно. Повторение испытаний в зимних условиях с этой точки зрения весьма желательно.

Авторы считают своим долгом отметить оказанное им содействие Д. Г. Чижовым, М. М. Белоусовым, К. Т. Нахпетяном и В. К. Мешковым в проведении этих испытаний. Член-корр. Академии наук СССР И. С. Брук дал авторам ряд ценных указаний по программе испытаний.



# Неискажающий делитель импульсных напряжений

Кандидат техн. наук **С. А. НАЗАРОВ**

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

**Современное состояние вопроса.** Делитель импульсных напряжений является весьма распространенным в высоковольтной технике аппаратом, без которого невозможно осциллографирование высоких напряжений.

Весьма важен вопрос об искажении, вносимом делителем в форму и величину измеряемого напряжения. Идеальный делитель должен иметь коэффициент деления (т. е. отношение напряжений на входе и выходе делителя), не зависящий в широких пределах ни от частоты, ни от величины и полярности измеряемого напряжения.

Как известно, существует три типа делителей: чисто емкостный, чисто омический и емкостно-омический [Л. 1].

Чисто емкостный делитель (цепочка из последовательно соединенных конденсаторов) обладает большим преимуществом — его коэффициент деления не зависит от частоты напряжения. Однако, у него имеются и серьезные недостатки: а) трудность вследствие электростатических связей с элементами делителя,

После краткого обзора современного состояния вопроса об искажении, вносимом делителем в величину и форму измеряемого напряжения, теоретически и экспериментально обосновывается новый способ получения практически неискажающего делителя при высокой частоте. Идея способа заключается в том, что в емкостно-омической цепочке с распределенными параметрами на участке, где приключен измерительный прибор, производится такой подбор емкости и сопротивления, при котором, в случае включения схемы на постоянное напряжение, начальное значение напряжения равно или больше конечного.

экранировки его при высоком напряжении от влияния посторонних объектов, искажающих электрическое поле делителя; б) зависимость показаний делителя от полярности и амплитуды напряжения в том случае, когда на обкладках конденсаторов возникает корона; в) искажения, возникающие при

присоединении делителя к осциллографу через кабель, вследствие колебаний из-за отражений у концов, а также из-за сглаживания волны демпфирующими сопротивлениями. Из-за этих недостатков чисто емкостный делитель не получил большого распространения.

Чисто омический делитель (цепочка из последовательно соединенных сопротивлений) и смешанный делитель (цепочка из конденсаторов, шунтированных сопротивлениями) свободны от этих недостатков, однако их коэффициент деления зависит от частоты напряжения и, таким образом, они искажают форму импульса. Зависимость эта обуславливается тем, что емкостно-омические цепочки обладают собственным временем разряда, а также и тем, что при высоких частотах следует учитывать распределенную емкость и самоиндукцию омического сопротивления. В связи с этим при изготовлении делителей этого типа встает вопрос уменьшения создаваемого ими искажения, которое является предметом многочисленных исследований.

Большое внимание уделяется вопросу уменьшения самоиндукции сопротивления. В результате экспериментов были получены практически безиндукционные сопротивления. Если пренебречь самоиндукцией сопротивлений, то в качестве схемы обоих типов делителей может рассматриваться цепочка их распределенных сопротивлений  $r_1$ , емкостей между элементами  $K_1$  и емкостей на землю  $C_1$  (рис. 1). В случае чисто омического делителя в этой схеме  $K_1 = 0$ .

Решение дифференциального уравнения для схемы, составленной из бесконечно большого числа элементов при включении ее на постоянное напряжение  $U_A$ , весьма нетрудно [Л. 8—11],

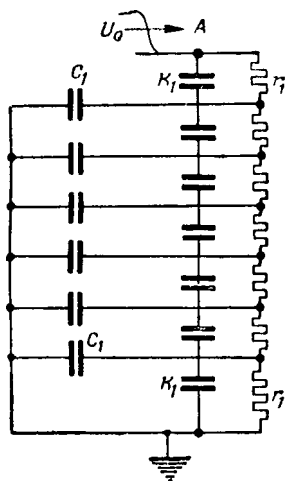


Рис. 1. Схема замещения емкостно-омического делителя.

Когда число элементов  $N$  ограничено, решение остается приближенно верным. Оно имеет вид:

$$u_n = U_A \left[ \frac{n}{N} + \frac{2}{\pi} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{s\pi n}{N} e^{-p_s t}}{s \cos s\pi \left( 1 + \frac{s^2 \pi^2}{\alpha^2} \right)} \right], \quad (1)$$

где

$$p_s = \frac{s^2 \pi^2}{RC \left( 1 + \frac{s^2 \pi^2}{\alpha^2} \right)}; \quad s = 1, 2, 3 \dots; \quad \alpha = \sqrt{\frac{C}{K}};$$

$R = Nr$  — полное сопротивление делителя;  $C = NC_1$  — емкость на землю;  $K = \frac{K_1}{N}$  — продольная емкость;  $N$  — полное число элементов;  $n$  — число элементов относительно земли в рассматриваемой точке.

Подсчеты показывают, что даже при  $N = 5$  получаются практически одинаковые результаты со случаем  $N = \infty$  [Л. 8].

При  $\alpha \leq 1$  и  $\frac{n}{N} \leq 1$  можно принять:

$$u_n \approx U_A \frac{n}{N} \left[ 1 - \frac{\alpha^2}{6} e^{-\frac{\alpha^2}{RC} t} \right]. \quad (2)$$

Отсюда вытекает условие для получения небольшого искажения:  $\frac{\alpha^2}{6} \leq 1$  или  $\frac{C}{K} \leq 6$ . Выполнены омическо-емкостные делители, у которых  $\alpha \leq 0,6$ , т. е.  $\frac{C}{K} \leq \frac{1}{3}$ ; при этом ошибка в начальном значении при прямоугольной волне составит только 5%.

Пслагая  $\alpha \rightarrow \infty$ , из формулы (1) получаем выражение для чисто омического делителя:

$$u_n = U_A \left[ \frac{n}{N} + \frac{2}{\pi} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{s\pi n}{N} e^{-p_s t}}{s \cos s\pi} \right]. \quad (3)$$

Подсчеты по формуле (3) показывают, что при  $T_1 = \frac{1}{p_1} = \frac{RC}{\pi^2} = 0,5 \mu\text{с}$  прямоугольный фронт превращается во фронт длительностью  $2T_1 = 1 \mu\text{с}$  (под длиной фронта понималась величина, определяемая согласно старым нормам [Л.1]). При волне

$$u = U_A (1 - e^{-\beta t}) \quad (4)$$

формула (3) с помощью интеграла Дюамеля приобретает вид:

$$u_n = U_A \left[ \frac{n}{N} (1 - e^{-\beta t}) + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2 \sin \frac{s\pi n}{N} (e^{-p_s t} - e^{-\beta t})}{s\pi \cos s\pi (1 - \frac{p_s}{\beta})} \right]. \quad (5)$$

Подсчеты по формуле (5) показывают, что если при работе с омическим делителем выдержано соотношение

$$T_1 = \frac{RC}{\pi^2} \leq 0,125 T_0, \quad (6)$$

где  $T_0$  — длина фронта измеряемой волны, то искажение фронта достигает 10%.

Таким образом, величина допустимого сопротивления омического делителя ограничивается условием (6). Поскольку, однако, сопротивление омического делителя часто служит одновременно и разрядным сопротивлением ударного контура для получения стандартной длины волны, то его величина не всегда может быть уменьшена ниже определенного значения (при неизменной емкости ударного контура). Низкая величина сопротивления делителя, кроме того, снижает коэффициент использования импульсного генератора.

Емкостно-омический делитель напряжения свободен от ограничений в отношении его сопротивления. Однако, при его применении необходимо обеспечивать низкие значения  $\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}$ , что приводит к увеличению продольных емкостей.

В связи с этим, а также вследствие своей простоты на практике чаще применяются омические делители. Поскольку вносимое ими искажение вызывается емкостью на землю, было сделано много попыток ослабить вредное действие этой емкости. Весьма распространено применение кольцевого экрана, соединенного с высоковольтным концом делителя.

Известно осуществление делителя в масле с устройством экрана по типу нерезонирующего трансформатора [Л. 11]. Хорошие результаты получены [Л. 9] при изготовлении сопротивлений делителя из электролита в виде двух стеклянных труб, вставленных одна в другую, причем жидкость в пространстве между внешней и внутренней трубками и являлась экраном делителя. Такой делитель, составленный из трех сопротивлений, при общей их величине 20 200  $\Omega$ , позволил без искажения осциллографировать фронт длительностью до десятых долей микросекунды [Л. 12]. Был изготовлен делитель в виде двух цилиндрических катушек, вставленных одна в другую и электрически соединенных параллельно [Л. 2]. В ВЭИ исследовалось применение экранов в виде зонтов над каждым элементом делителя, а также в виде столба кольцевых сопротивлений и конденсаторов (защита по типу нерезонирующего трансформатора со встроенными конденсаторами).

В основе всех этих способов лежит идея компенсации токов на землю емкостными токами, притекающими к каждой точке делителя от его высоковольтного конца. Однако, на практике достижение полной компенсации затруднительно из-за сложности ее точного расчета и вследствие громоздкости получающихся сооружений.

Л. И. Иванов [Л. 3] для того, чтобы приблизить распределение напряжения по сопротивлениям к распределителю напряжения, обуслови-

ваемому электрическому полю экрана, исследовал омический делитель, снабженный кольцевым экраном и имеющий различную величину отдельных сопротивлений. При этом возникали трудности, связанные с расчетом делителя. При высоких напряжениях могут быть также затруднения из-за неравномерности конечного распределения напряжения.

Из приведенного краткого обзора видно, что, несмотря на достигнутые весьма существенные успехи, вопрос о создании делителя, не искажающего напряжение при весьма высоких частотах, практически нельзя считать решенным. Между тем, в связи с успехами катодной осциллографии [Л. 4], а также ввиду того, что высоковольтные исследования углубляются еще далее в область малых времен разряда, эта проблема приобретает известную актуальность. Было установлено, что имеется принципиальная возможность разрешить ее сравнительно простыми средствами.

**Теоретические условия неискажаемости.** Для схем с концентрированными постоянными, у которых каждый конденсатор шунтирован своим сопротивлением, в случае равенства постоянных времени каждого элемента ( $R_1 C_1 = R_2 C_2 = \dots$ ) распределение напряжения не зависит от частоты. В этом легко убедиться, написав операционные уравнения для включения таких схем на постоянное напряжение. При этом оператор сокращается, т. е. напряжение выражается постоянной величиной [Л. 5]. Исходя из этого условия, Цинке [Л. 13] рекомендует в емкостно-омическом делителе подбирать величины сопротивлений и емкостей так, чтобы постоянные времени всех элементов, на которые можно разбить схему замещения, были бы равны друг другу. Однако, при этом не может быть получено полной неискажаемости, так как напряжение в любой точке делителя выражается в виде суммы пространственных и временных гармонических [формула (1)].

Общее теоретическое условие неискажаемости для любой емкостно-омической схемы делителя сводится к тому, чтобы распределение напряжения по емкостям совпадало с распределением по сопротивлениям. При этом в случае включения схемы на постоянное напряжение начальное распределение напряжения равно конечному, и нестационарный процесс отсутствует. Действительно, например, для делителя по схеме рис. 1, у которого сопротивления изменяются по гиперболическому закону, напряжение в точке  $x$  относительно заземленного конца может быть в этом случае представлено в виде:

$$U(x, t) = U(x, \infty) + \sum_{s=1}^{\infty} A_s X_s e^{p_s t}, \quad (7)$$

где  $U(x, \infty)$  — напряжение при установившемся состоянии;  $X_s$  — функция величины  $x$  (пространственная гармоника);  $p_s$  — корень характеристического уравнения;  $A_s$  — постоянная, определяемая из начальных условий;  $s=1, 2, 3, \dots$

Справедливость уравнения (7) вытекает из того обстоятельства, что схема, в которой сопротивления изменяются по гиперболическому закону, эквивалентна схеме с постоянными шунтирующими сопротивлениями и наличием утечек на землю. Эта схема приводит к линейному дифференциальному уравнению в частных производных с постоянными коэффициентами. При  $t=0$  имеем

$$\sum_{s=1}^{\infty} A_s X_s = U(x, 0) - U(x, \infty). \quad (8)$$

Коэффициенты  $A_s$  могут находиться посредством разложения в ряд Фурье разности между начальным и конечным распределениями по функциям  $X_s$ . Если на всем протяжении делителя начальное и конечное распределение

совпадает, то разлагаемая функция тождественно равна нулю, а следовательно, и коэффициенты разложения также равны нулю, т. е.  $A_s = 0$ . При этом нестационарный член в выражении (7) также становится равным нулю, и деление напряжения при любой частоте будет происходить без всякого искажения.

Таким образом, для неискажаемости необходимо, чтобы сопротивления изменялись по закону, аналогичному емкостному распределению:

$$R_x = R \frac{\text{sh } \alpha \frac{x}{l}}{\text{sh } \alpha}, \quad (9)$$

где  $R_x$  — сопротивление относительно земли в точке  $x$ ;  $R$  — суммарное сопротивление (при  $x=l$ );

$\alpha = \sqrt{\frac{C}{K}}$  — параметр емкостного распределения.

Схемой замещения делителя при этом служит контур, состоящий из входной емкости  $C_{ex} = \sqrt{CK} \cdot \text{cth } \alpha$ , шунтированной сопротивлением. Если к такому делителю в какой-либо точке приключить конденсатор, шунтированный сопротивлением, то для неискажаемости необходимо, чтобы было сохранено совпадение начального и конечного распределений с учетом приключенного контура. В реальных условиях осуществление точного совпадения распределений по всей длине делителя представляет некоторые затруднения практического характера. В связи с этим интересно рассмотреть вопрос об искажении при совпадении начального и конечного распределений только на участке приключения осциллографа. Из (7) следует, что при этом

$$\sum_{s=1}^{\infty} A_s X_s \neq 0, \text{ поскольку разность между начальным и}$$

конечным напряжением равна нулю, только на некотором участке.

Таким образом, в этом случае произойдет искажение. Оно обуславливается тем, что через компенсированную часть делителя протекает ток, создаваемый переходными процессами в его некомпенсированной части. Строгое решение вопроса может быть получено посредством рассмотрения схемы емкостно-омического делителя, состоящего из двух частей, в каждом из которых сопротивления изменяются в функции  $x$  по различным законам. Конкретный анализ такого решения для включения на постоянное напряжение несколько затрудняется его громоздкостью и тем, что аргументом пространственных гармоник при этом являются корни трансцендентного уравнения. Весьма наглядно вопрос об искажении в этом случае иллюстрируется приближенным решением схемы емкостно-омического делителя, приключенного на конце к концентрированной емкости  $C_0$ , шунтированной сопротивлением  $r_0$  (рис. 2),

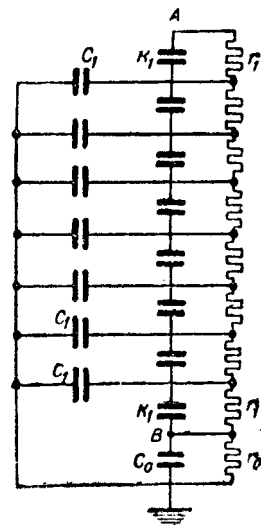


Рис. 2

при условии, что ток в этой точке  $B$  ( $x=0$ ) равен току на конце глухозаземленного делителя.

Подсчеты показывают, что для  $\alpha=3$  при коэффициенте деления, равном 1000, максимальная ошибка, вносимая таким приближением, не больше 0,3%.

Напряжение согласно этому приближенному решению (см. приложение) равно:

$$U_B = \frac{r_0}{R} U_A + \left[ U_B(0) - \frac{r_0}{R} U_A \right] \cdot e^{-b_0 t} + \frac{r_0}{R} U_A \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\alpha^4}{(\alpha^2 + s^2 \pi^2)^2} \frac{1}{\cos s\pi} \frac{e^{-b_0 t} - e^{-p_s t}}{\frac{p_s}{b_0} - 1}, \quad (10)$$

где  $U_B(0)$  — начальное значение напряжения в точке  $B$ ;  $\frac{r_0}{R} U_A$  — приближенное конечное значение напряжения в точке  $B$  (точное значение установившегося напряжения равно  $\frac{r_0}{R_1 + r_0} U_A$ );

$b_0 = \frac{1}{C_0 r_0}$ ; остальные обозначения — те же, что в (1).

В случае равенства начального и конечного значений

$$U_B = \frac{r_0}{R} U_A \left[ 1 + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\alpha^4}{(\alpha^2 + s^2 \pi^2)^2} \times \frac{1}{\cos s\pi} \frac{e^{-b_0 t} - e^{-p_s t}}{\frac{p_s}{b_0} - 1} \right]. \quad (11)$$

Выражение, стоящее под знаком суммы, определяет искажение. При  $t=0$  оно также равно нулю и имеет максимум вблизи максимума первой гармоники.

Начальное значение напряжения

$$U_B(0) = \frac{\alpha K}{\alpha K \chi + C_0 \chi a} \quad (12)$$

(это значение легко находится из операционного уравнения при  $p = \infty$  или посредством решения емкостной схемы замещения).

Подсчет для случая  $\frac{r_0}{R} = 0,001$  и  $\alpha = 3,14$  по формуле

(10) показывает, что максимум искажения имеет место при  $b_0 t \approx 1,35$  и по абсолютной величине сумма нестационарных членов при этом равна 11,5% от установившегося напряжения.

Если, например,  $C_0 = 1340 \mu\text{F}$ ,  $r_0 = 50 \Omega$ ,  $K = 5 \mu\text{F}$  и  $R = 5000 \Omega$ , то  $b_0 = 1,49 \cdot 10^7$  и  $t_m = 0,006 \mu\text{sec}$ .

При времени, равном  $0,5 \mu\text{sec}$ , ошибка меньше 0,15%. При меньших значениях  $\alpha$  искажение будет еще меньше. Рассмотрение формулы (10) показывает, что если сделать начальное значение напряжения больше конечного, то искажение может быть сделано практически весьма малым. Действительно, знак ряда, определяющего искажение, не зависит от величины  $b_0$ , а его абсолютная величина определяется, главным образом, первым членом ( $s=1$ ). Поэтому,

если  $U_B(0) > \frac{r_0}{R} U_A$ , то суммарная величина искажения будет меньше по сравнению со случаем  $U_B(0) = \frac{r_0}{R} U_A$ , и даже возможно получение искажения с другим знаком.

При конечной длине фронта волны, воздействующей на делитель, этот последний случай будет соответствовать укорачиванию длины фронта вместо его удлинения.

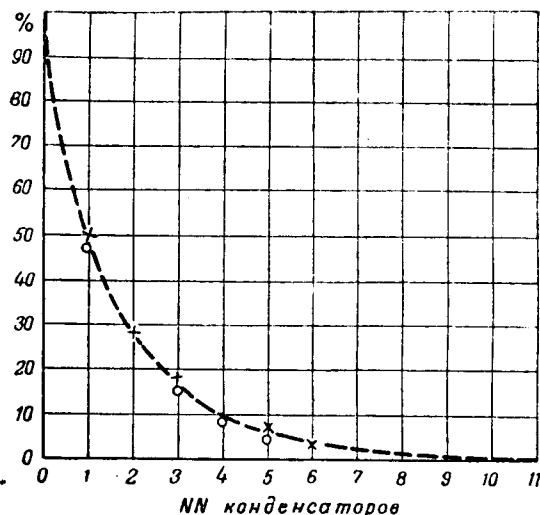


Рис. 3. Распределение напряжения по емкостям макета.

**Результаты опытов<sup>1</sup>.** Для проверки теоретических положений были произведены опыты с макетами емкостно-омических делителей при напряжении порядка 1 кВ. Измерения осуществлялись посредством катодного осциллоскопа, собранного по схеме с тиратронами [Л. 6]. Осциллограммы зарисовывались на прозрачном экране.

В связи с тем, что емкость пластин осциллоскопа относительно земли оказалась равной  $40 \mu\text{F}$ , а входная емкость макета —  $150 \mu\text{F}$ , включение пластин осуществлялось посредством двухступенчатого делителя с приблизительно одинаковой постоянной времени обоих элементов

$$R_1 C_1 \approx R_2 C_2 = 4 \cdot 10^5 \cdot 10^{-11} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ sec.}$$

Контрольными измерениями было установлено, что при тех параметрах цепочек, которые употреблялись в опытах, такое подключение осциллоскопа практически не искажает распределения напряжения вдоль макета.

На рис. 3 показано распределение напряжения по емкостям макета, состоящего из 11 элементов; крестики — измерения осциллоскопом при импульсах; кружки — измерения электростатическим вольтметром при 50 Гц. Принципиальная схема цепочки аналогична рис. 1 (в действительности емкости на землю были образованы из десяти последовательно соединенных конденсаторов, расположенных на поверхности цилиндра). При  $\alpha=7,3$  теоретическая кривая распределения по емкостям расположена близко от экспериментальной. При величине шунтирующего сопротивления  $11 \times 500 = 5500 \Omega$  в такой цепочке наблюдается значительное искажение. Так, напряжение с амплитудой, равной 17,8% от амплитуды напряжения на всей цепочке, приобретает фронт длительностью около  $2 \mu\text{sec}$  вместо  $0,44 \mu\text{sec}$  у падающей волны (измерено по международным нормам [Л. 1]), т. е. получаем искажение почти в 4,5 раза (рис. 4).

После того как шунтирующие сопротивления были сделаны переменными вдоль цепочки (при общей величине, равной  $5070 \Omega$ ) и были рассчитаны с точностью  $\pm 4\%$  по кривой начального распределения, фронт напряжения, равного 13,6% от измеряемой волны, в пределах точности измерений записан без искажений (на рис. 5 кружочками отмечена форма волны без искажения). Однако, полной неискажаемости по всей цепочке не было получено, так, например, напряжение, равное 30%, показало искажение фронта. Практическое отсутствие искажения для меньших коэффициентов деления получено после закорачивания первого элемента, при сохранении всех остальных параметров неизменными. Осциллограммы для этого случая при полной волне и при срезе приведены на рис. 6. На нижних элементах здесь даже наблюдается уменьшение длины фронта вследствие того, что распределение по соп-

<sup>1</sup> Опыты проводились совместно с М. И. Сысовым.



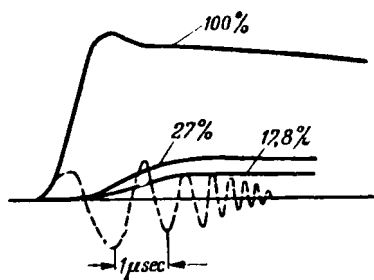


Рис. 4. Искажение, вносимое делителем по схеме рис. 1 при  $R = 5\,500\ \Omega$  и  $\alpha = 7,3$ .

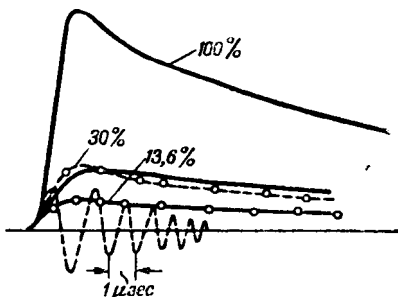


Рис. 5. Распределение напряжения в схеме делителя, когда начальное и конечное распределения совпадают с точностью до  $\pm 4\%$ .

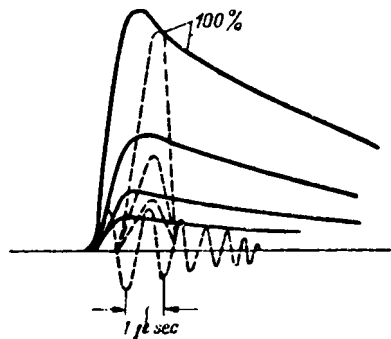


Рис. 6.

противлениям в этом случае располагается ниже распределения по емкостям. Эти опыты показывают, что для получения неискажаемости вдоль всей цепочки требуется достаточно точное совпадение распределений по емкостям и по сопротивлениям. Из опытов следует также, что в согласии с теоретическими предположениями, для измерительных целей нет необходимости достигать совпадения распределений по всей цепочке. Подтверждение этого вывода было получено также в ряде опытов с макетами, имеющими другие параметры.

На рис. 7 показано изменение формы напряжения  $U_{4-0}$  на четырех нижних элементах (считая от заземленного конца), когда параллельно им включались сопротивления различной величины. Макет делителя состоял из 10 элементов с продольной емкостью каждого элемента, равной  $K_1 = 2\,000\ \mu\text{F}$ , и емкостью на землю  $C_1 = 517\ \mu\text{F}$ . Суммарная величина сопротивления равнялась  $10 \cdot 1000 = 10\,000\ \Omega$ . Параметр емкостного распределения  $\alpha = 1,61$ .

Для сравнения на осциллограмме также приведена форма напряжения  $U_{10-0}$  на всем делителе, снятая без искажения с помощью безиндукционного омического делителя с сопротивлением  $600\ \Omega$ , включенного во время всех опытов параллельно макету. Измерение распределения напряжения по емкостям (при отключенных шунтирующих сопротивлениях) показало, при этом  $U_{4-0} = 0,0110 U_{10-0}$ .

Из рис. 7 видно, что при сопротивлении  $800\ \Omega$  напряжение  $U_{4-0}$  записывается практически без искажения.

При увеличении сопротивления длина фронта увеличивается, при уменьшении — уменьшается. При  $R_{4-0} = 800\ \Omega$  расчет распределения напряжения по сопротивлениям дает значение  $U_{4-0} = 0,0117 U_{10-0}$ . Таким образом, момент записи без искажения в пределах точности измерений соответствует совпадению обоих распределений.

Совпадение теоретических заключений с опытными данными позволяет сделать вывод, что и в реальных условиях посредством регулирования параметров на участке цепи, к которой присоединен осциллограф, возможно получение неискажаемости записи с требуемой точностью.

Теоретически осуществление неискажающего делителя по описываемому способу возможно при любом значении сопротивления, отличном от бесконечности. При высоких напряжениях необходимо применять для устранения коронирования и уменьшения  $\alpha$  экранирующее кольцо. Условия в отношении изоляции делителя здесь такие же, как и в обычном омическом делителе. Величины емкости и сопротивления, которые необходимо приключить в конце делителя, можно определить расчетным путем. Для этого необходимо знать параметр емкостного распределения  $\alpha$ , а также начальное и конечное напряжение в точке приключения осциллографа. Точный подбор параметров должен производиться экспериментальным путем. Если параллельно сопротивлениям делителя включить небольшие продольные емкости в виде, например, подвесных изоляторов, то начальное распределение достаточно точно может быть измерено при разомкнутых сопротивлениях, а конечное при нормальном их приключении при токе 50 Гц. Неискажаемости можно добиваться изменением как емкости, так и сопротивления. Возможно применение вспомогательного неискажающегося делителя, рассчитанного на меньшее напряжение, но с одинаковым коэффициентом деления.

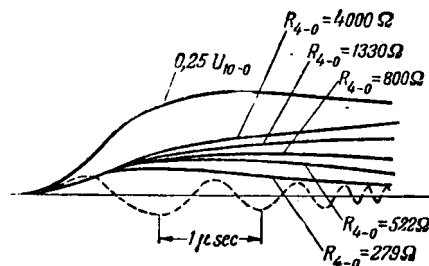
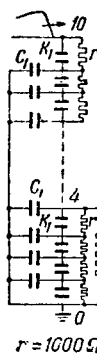


Рис. 7.

Такой делитель можно составить из двух конденсаторов, шунтированных сопротивлениями, при условии равенства постоянных времени обоих контуров. Приключив его параллельно основному делителю, можно посредством подбора емкости или сопротивления добиться одинаковой формы (или хотя бы величины) напряжения обоих делителей. Можно соединить нижние ступени обоих делителей через какой-либо чувствительный индикатор напряжения и по отсутствию в нем показаний заключить о достигнутой практически неискажаемости.

Как в теоретической, так и в экспериментальной части данной работы имелось в виду, что сопротивления практически безиндукционны. А. М. Залесским теоретически рассмотрен способ получения неискажаемости (для делителя с учетом самоиндукции) посредством подключения параллельно осциллографу компенсирующего шунта из последовательно соединенных конденсатора и сопротивления [Л. 7]. Эти выводы, однако, нуждаются в экспериментальной проверке. В случае приключения осциллографа к неискажающему делителю через кабель необходимо принять обычные меры по предотвращению колебаний из-за отражений. Вопрос об искажениях при весьма больших крутизнах и высоких напряжениях, когда необходимо считать с временем распространения заряда вдоль делителя, требует специального рассмотрения.

**Выводы.** В существующих омических и емкостно-омических делителях уменьшение искажаемости достигается с помощью уменьшения разницы между распределением напряжения по емкостям и по сопротивлениям делителя. Это мероприятие осуществляется посредством воздействия на емкости или на сопротивления вдоль всего делителя. При этом получение малой искажаемости связано с рядом практических затруднений и приводит к громоздким сооружениям.

Теоретический анализ, а также опыты, проведенные на макетах делителя, показывают, что

малая искажаемость может быть также достигнута за счет такого подбора емкости и сопротивления на участке приключения измерительного прибора, при котором в случае включения схемы на постоянное напряжение начальное значение напряжения равно или больше конечного.

С этой точки зрения весьма хорошие результаты можно ожидать от омического делителя, снабженного кольцевым экраном, у которого распределение напряжения по сопротивлениям имеет вид ломаной прямой, причем на участке приключения осциллографа осуществлены указанные выше условия.

#### Приложение

Рассмотрим схему рис. 2, когда в конце цепочки с постоянными распределенными емкостями  $C_1$  и  $K_1$  и сопротивлениями  $r_1$  (на единицу длины) включена концентрированная емкость  $C_0$ , шунтированная сопротивлением  $r_0$ .

Строгое решение может быть получено или классическими способами или посредством применения трансформации Лапласа. Поскольку решение выражается в виде тригонометрического ряда, необходимо рассмотреть соотношение ли непрерывность разлагаемой функции на конце цепочки. Однако, форма решения получается громоздкой и при его исследовании приходится пренебрегать малыми величинами. При больших коэффициентах деления емкость  $C_0$  и сопротивление  $r_0$  мало влияют на величину продольного тока в точке  $x=0$ . Поэтому можно принять, что этот ток равен току при глухом заземлении делителя. Продольный ток в емкостно-омическом делителе равен:

$$I_x = K_1 \frac{\partial^2 U_x}{\partial x \partial t} + \frac{1}{r_1} \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (1)$$

Подставляя вместо  $U_x$  его значение из (1), после простых преобразований можно получить:

$$I_x = \frac{U_A}{R} \left[ 1 + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2x^4}{(a^2 + s^2 \pi^2)^2} \frac{\cos s \pi \frac{x}{l}}{\cos s \pi} e^{-p_s t} \right]. \quad (2)$$

Рассматриваем цепочку из бесконечно большого числа элементов и поэтому в формуле (1) полагаем  $\frac{n}{N} = \frac{x}{l}$ .

Здесь обозначения аналогичны приведенным в тексте. В точке  $B$  ( $x=0$ )

$$I_B = \frac{U_A}{R} \left[ 1 + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{D_s}{\cos s \pi} e^{-p_s t} \right], \quad (3)$$

где

$$D_s = \frac{2x^4}{(a^2 + s^2 \pi^2)^2}.$$

Кроме того, при принятом условии

$$I_B = C_0 \frac{dU_B}{dt} + \frac{1}{r_0} U_B. \quad (4)$$

Пусть  $u$  и  $w$  — изображения напряжения и тока в трансформации Лапласа. Тогда согласно (3)

$$w_B = \frac{U_A}{R} + \frac{U_A}{R} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{D_s}{\cos s \pi} \cdot \frac{p}{p + p_s} \quad (5)$$

и с учетом (4)

$$u_B = \frac{w_B}{C_0(p+b_0)} + \frac{p}{p+b_0} U_B(0), \quad (6)$$

где  $b_0 = \frac{1}{C_0 r_0}$  и  $U_B(0)$  — начальное значение напряжения. Из (5) и (6) имеем:

$$u_B = \frac{U_A}{R C_0 (p+b_0)} + \frac{U_A}{R} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{D_s}{C_0 \cos s \pi} \frac{p}{(p+p_s)(p+b_0)} + U_B(0) \frac{p}{p+b_0}. \quad (7)$$

Отсюда, переходя к оригиналам, можно получить:

$$U_B = \frac{r_0}{R} U_A + \left[ U_B(0) - \frac{r_0}{R} U_A \right] e^{-b_0 t} + \frac{r_0}{R} U_A \sum_{s=1}^{\infty} \frac{D_s}{p_s - 1} \frac{1}{\cos s \pi} (e^{-b_0 t} - e^{-p_s t}). \quad (8)$$

Оценим ошибку, совершенную вследствие того, что ток в схеме рис. 2 был допущен равным току глухозаземленного делителя. Поскольку эта схема описывается линейным дифференциальным уравнением, точное значение тока можно представить в виде суммы двух токов — одного ( $I_A$ ), вызываемого напряжением  $U_A$  при заземленной точке  $B$ , и другого ( $I_B$ ) — напряжением  $U_B$  при заземленной точке  $A$ . Напряжение  $U_B$  имеет форму аperiodического импульса. Если его представить в виде бесконечной волны с отвесным фронтом, то нестационарная составляющая тока  $I_B$  будет большей истинной. При этом

$$I_{x=0} = \frac{U_A}{R} \left[ 1 + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{D_s}{\cos s \pi} e^{-p_s t} \right] + \frac{U_B}{R} \left[ 1 + \sum_{s=1}^{\infty} D_s e^{-p_s t} \right]. \quad (9)$$

Максимальное значение нестационарной части тока  $I_B$  будет при  $t=0$ . Таким образом, действительная абсолютная ошибка

$$\Delta I < \frac{U_B}{R} \left[ 1 + \sum_{s=1}^{\infty} D_s \right].$$

Подсчет показывает, что для  $t=0$  относительная ошибка при  $\alpha = 3,14$  и  $\frac{U_A}{U_B} = 1000$  меньше 0,3%.

#### Литература

1. Л. И. Сиротинский и др. Техника высоких напряжений, т. 2. ГОНТИ, 1939.
2. И. Е. Балыгин. О делении высокого напряжения импульсной формы. Электричество, № 4, 1940.
3. Л. И. Иванов, А. С. Нудина. Замечания к измерениям с помощью катодного осциллографа. Труды ВЭИ, вып. 53, "Вентильные разрядники". Госэнергоиздат, 1941.
4. И. С. Стекольников. Современное состояние катодной осциллографии. Электричество, № 10, 1946.
5. А. И. Лурье. Операционное исчисление в приложениях к задачам механики. ОНТИ, 1938.
6. М. Ф. Пашин. Осциллограф с регистрацией периодически возникающих волн. Научно-технический бюллетень ВЭИ, № 9, 1940.
7. А. М. Залесский. Неискажающий делитель импульсных напряжений. Труды ЛПИ, № 1, 1946.
8. Elsneg. A. f. E., т. 33, № 1, стр. 23, 1939.
9. Raske. A. f. E., т. 31, № 10, стр. 653; № 11, стр. 732, 1937.
10. Bellaschi. Tr. AIEE, т. 52, № 2, стр. 544, 1933.
11. Hagenguth. El. Eng., № 1, стр. 67, 1937.
12. Hohl. A. f. E., т. 35, № 11, стр. 663, 1941.
13. Zinke. ETZ, № 31, стр. 927, 1939.



# Электрические модели физических явлений

Доктор техн. наук, проф. Л. И. ГУТЕНМАХЕР

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

*Единство природы обнаруживается в «поразительной аналогичности» дифференциальных уравнений, относящихся к разным областям явлений.*

В. И. ЛЕНИН.

*Материализм и эмпириокритицизм*

В настоящее время создается и быстро развивается новая область электротехники—область, охватывающая электрические модели физических явлений, счетно-решающие устройства, математические машины и т. п.

Это новое направление имеет весьма важное значение. Современные технические и физические проблемы требуют выполнения огромного количества вычислений в короткий срок. Без новых скоростных и точных методов исследования и расчета не может успешно развиваться ни одна из областей науки, техники и военного дела. В связи с этим наблюдается необычайно быстрое и успешное развитие устройств, автоматически «анализирующих» сложные процессы, а также воспроизводящих непрерывно операции, выражающиеся сложными математическими формулами.

Как известно, вычислительная работа является одной из самых древних форм умственной деятельности человека. В популярной литературе автоматические устройства для вычислений часто называются роботами, «думающими машинами», «электрическими мозгами» и т. п.

В данном очерке рассмотрен только один важный раздел этой новой области — электрические многомерные модели, состоящие из сосредоточенных элементов электрических цепей — индуктивностей, емкостей, сопротивлений.

Теория электрических многомерных моделей представляет собой синтез теории цепей из сосредоточенных элементов и теории подобия физических явлений.

Основным отличительным признаком и главным достижением теории электрического моделирования является возможность моделирования процессов во времени и в пространстве.

*Дана характеристика новой области электротехники — электрического моделирования и машинной математики. Указана связь между теорией электрических цепей из сосредоточенных постоянных и теорией моделирования. Дан краткий обзор результатов работы по развитию этой области электротехники.*

Введение специальных обобщенных координат, представляющих собой числа узловых точек электрической цепи, отсчитанные в определенном по-

рядке, позволило ввести новую своеобразную «геометрию» электрических моделей и интерпретировать процессы в электрических цепях, как физические процессы в многомерных областях. Число обобщенных координат в электрических моделях принципиально не ограничено. В связи с этим такие модели условно названы нами многомерными.

Идея обобщенных координат, зародившаяся еще в эпоху Лагранжа, впервые была использована для электротехники Максвеллом, который принял в качестве обобщенных координат  $q_i$  электрические заряды  $Q_i$ . При этом роль обобщенной скорости  $v_i$  играет электрический ток в элементе цепи ( $i_i = \frac{dQ_i}{dt}$ ;  $v_i = \frac{dq_i}{dt}$ ), а роль

обобщенной силы  $p_i$  — напряжение  $u_i$  ( $u_i = = L \frac{d^2 Q_i}{dt^2}$  по аналогии, с  $p_i = m \frac{d^2 q_i}{dt^2}$ ). Этим установилась первая система электрических аналогий, которая позволяет во многих случаях построить электрическую цепь, эквивалентную в математическом отношении некоторой механической цепи.

Сравнительно недавно была развита вторая система электромеханических аналогий, отличающаяся от первой тем, что в качестве обобщенных координат приняты магнитные потоки  $\psi$ . При этом роль обобщенной скорости играет напряжение ( $u = \frac{d\psi}{dt}$ ), а роль обобщенной силы —

электрический ток ( $i = \frac{d\psi}{dt} = c \frac{d^2 \psi}{dt^2}$ ) [Л. 4, 24, 29].

Введение нового элемента — электронной лампы (усилителя) в электрические цепи позво-

лило нам развить новую систему электромеханических аналогий, в которой роли всех переменных величин (перемещения, скорости, силы) играют напряжения в различных точках цепи [Л. 13,20].

Использование в качестве обобщенных координат электрических зарядов и магнитных потокоцеплений оказало большое влияние, с одной стороны, на развитие теории электрических цепей, а с другой стороны, на создание важного раздела — электрических аналогий.

Это позволило с успехом использовать уже готовый математический аппарат векторного и тензорного анализа для описания сложных цепей, содержащих большое число контуров и узловых точек (соответствующих большому числу степеней свободы механических систем).

Электромеханические аналогии сыграли большую роль в развитии смежных с электротехникой областей, например электроакустики [Л. 29].

Однако, многомерная «геометрия» здесь сыграла только формальную роль, так как основным постулатом теории цепей с сосредоточенными параметрами является именно отрицание влияния геометрических размеров электрических цепей на происходящие в них процессы.

Электротехника давно имеет в своем арсенале элементы — конденсаторы, дроссели и катушки сопротивления, в которых энергия проявляется практически раздельно в одной из ее форм. Энергия в цепи конденсатора (емкости  $C$ ), запасается в форме энергии электрического поля  $W_C = \frac{Cu^2}{2}$ . Энергия в цепи дроссельной катушки (ин-

дуктивности  $L$ ) запасается в форме энергии магнитного поля  $W_L = \frac{Li^2}{2}$ , а в катушке сопротивления электрическая энергия переходит в тепловую благодаря нагреванию проводника:  $W_g = Ri^2$ .

При больших значениях параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$  (порядка  $10^3 \Omega$ ,  $10^1 \text{ H}$ ,  $10^{-6} \text{ F}$ ) время распространения электромагнитной энергии вдоль отдельных ветвей цепи ничтожно мало ( $10^{-8} \div 10^{-5} \text{ sec.}$ ) по сравнению с временем перехода энергии из одной формы в другую в цепях из этих элементов ( $10^{-3} \div 10 \text{ sec.}$ ). Это обстоятельство позволило в теории цепей пренебречь влиянием геометрических размеров элементов и соединительных проводников и рассматривать элементы, как некоторые двухполюсники или четырехполюсники, сосредоточенные геометрически в точке. Принятое допущение значительно упростило анализ электрических цепей. Токи, напряжения, заряды рассматриваются относительно некоторых фиксированных полюсов цепи; при этом сознательно пренебрегают распределением электромагнитного поля в пространстве между этими полюсами.

Теория моделирования также использует понятия о двухполюсниках и вообще  $n$ -полюсниках, но, наоборот, вкладывает в их содержание определенный геометрический смысл. Значения

параметров  $n$ -полюсников связываются при этом с некоторыми геометрическими размерами элементарных (относительно малых) объемов — параллелепипедов. Моделируемая область (место, среда), в которой происходят интересующие нас физические явления, рассматривается как совокупность большого, но конечного числа отдельных частиц — элементарных объемов. Каждая элементарная частица и ее связи с другими замещаются электрической схемой из  $n$ -полюсников, в которой распределение токов и напряжений математически описываются таким же образом, как и явления в каждой данной частице моделируемой области. В этом случае полная электрическая схема, состоящая из всех источников тока, совокупности всех схем замещения элементарных частиц и всех связей представляет собой в относительных координатах модель (электроаналогию) физических явлений в заданной области.

При этом используется также учение о подобии физических явлений. Теория электрического моделирования базируется на теории подобия, ведущей свое начало от работ Ньютона.

Теория подобия дает возможность широко обобщать результаты изучения «пространственно-временного поля некоторых величин (напряжений и токов) электрической модели для групп аналогичных задач из самых различных областей науки и техники. Результаты измерения искомых величин выражаются в виде зависимости от характерных для каждой данной группы явлений безразмерных сочетаний так называемых характеристических параметров. Так, например, при моделировании тепловых процессов напряжения являются функциями параметров  $\left[\frac{RC}{T}\right] = \nu_1$ , где

$R$  и  $C$  — сопротивление и емкость элементарной частицы,  $T$  — выбранный масштаб времени.

**Геометрическое подобие.** Искусственно свяжем значения параметров наших  $n$ -полюсников с некоторыми геометрическими размерами элементарных объемов — параллелепипедов.

Экспериментальным или расчетным путем можно определить свойства элементарного параллелепипеда (рис. 1), как источника или при-

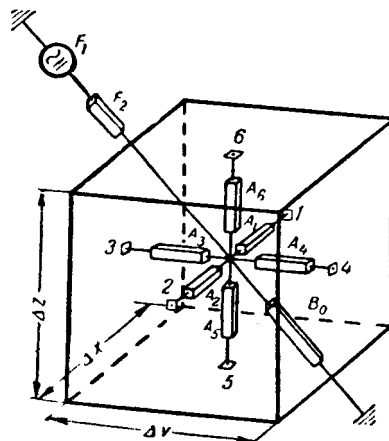


Рис. 1. Схема замещения (модель) элементарного объема исследуемого тела.

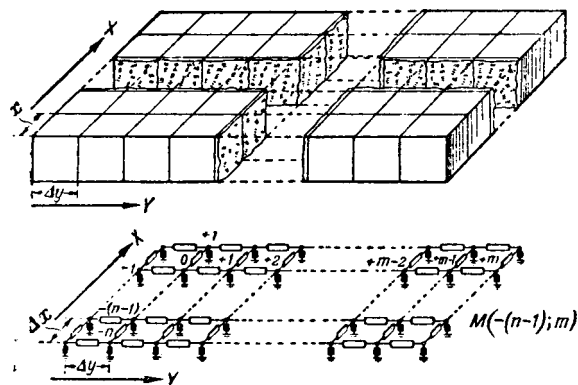


Рис. 2. Схема замещения (модель) исследуемого тела, разбитого на элементарные объемы—параллелепипеды.

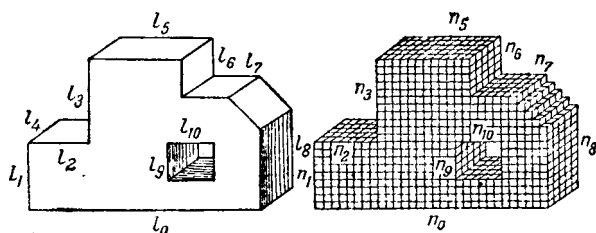


Рис. 3. Исследуемое тело, разбитое на элементарные объемы — параллелепипеды.

емника энергии. По этим данным нетрудно установить структуру соединений и параметры основных элементов модели — параллелепипедов. Практически можно раз навсегда составить альбом наиболее часто встречающихся схем и уравнений для них.

Соединяя отдельные элементарные схемы между собой, можно составить модель любого сооружения. Геометрическое подобие модели и образца получается (рис. 2 и 3) при соблюдении условия, что отношение соответствующих линейных размеров образца  $l_0, l_1, l_2, \dots, l_m$  к числу наших  $n$ -полюсников в соответствующих сходственных частях модели должны быть постоянным числом—константой подобия  $C_e$ :

$$\frac{l_0}{n_0} = \frac{l_1}{n_1} = \dots = \frac{l_m}{n_m} = C_e.$$

Для соблюдения условий геометрического подобия требуется только чертеж моделируемого образца.

Пренебрегая параметрами соединительных проводов, малыми по сравнению с параметрами сосредоточенных элементов, что мы практически почти всегда вправе сделать, можно элементы схемы располагать в различных местах пространства. Таким образом, можно трехмерную область «расположить» на отдельных панелях, представляющих «образцы» заданной области.

В этом случае любая внутренняя точка модели доступна для изучения. Отпадает крайне трудная проблема «проникновения внутрь» из-

мерительным зондом, которая всегда стоит при экспериментальном исследовании реальных сооружений.

Электрическая модель может быть представлена в любой системе криволинейных ортогональных координат. Форма модели удобно видоизменяется применительно к любым условиям.

После нахождения решения для заданной области можно выделить особо интересующую часть области и воспроизвести ее на этой же сетке в большем масштабе.

Принципиально можно составить  $n$ -мерные области, замкнутые  $n$ -мерные области, поверхности Римана и другие сложные геометрические построения.

В результате синтеза таких  $n$ -мерных электрических моделей разработаны методы, которые дают принципиальную возможность моделировать явления, описывающиеся приближенно всеми известными линейными системами дифференциальных, интегральных и интегродифференциальных уравнений в частных производных математической физики.

В табл. 1 приведены несколько уравнений для которых нами составлены схемы.

Теория многомерных моделей впервые докладывалась президиуму Академии наук СССР в мае 1940 г. [Л. 9, 10]. С тех пор на электронном интеграторе опытной конструкции из элементов  $R$  и  $C$  было решено значительное число задач. Перечислим некоторые из них: 1) расчеты напряженности магнитного поля в различных частях машин и аппаратов (задачи по определению векторного потенциала); 2) распределение вектора плотности тока в проводниках сложного сечения (изучение поверхностного эффекта и эффекта близости); 3) расчеты напряженности электрического поля между электродами сложной формы при наличии объемных зарядов (вакуумная техника и электроника); 4) распределение магнитной индукции и плотности тока в шестерне и других металлических деталях, помещенных в коаксиальное магнитное поле различной частоты (задачи индукционной закалки); 5) нагревание и охлаждение различных тел, однородных и неоднородных, при различных граничных и начальных условиях; 6) определение прогиба пластин, изгиба балок и напряжений возникающих в стержнях различного сечения при кручении.

Разработанная техника моделирования — составление схемы, способы задания истоков, граничных и начальных условий, измерений — позволяет сейчас надеяться на то, что эта новая методика получит широкое применение в исследовательской и расчетной практике во всех областях техники и физики.

Работы в этой области начали позднее проводиться и за рубежом (например, работы американских ученых Г. Крона, С. Рамо и др. [Л. 8]).

**Новые модели с усилителями.** Выполненные в ЭНИН Академии наук СССР за последние годы синтез цепей позволил составить так называемые матричные схемы с усилителями, кото-

Таблица 1

Уравнение	Некоторые области применения
1. Уравнение Лапласа $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0.$	1. Почти во всех областях физики
2. Уравнение Фурье в одномерной области $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = RC \frac{\partial u}{\partial t}.$	1. Нагрев и охлаждение в одномерных областях
3. Уравнение Пуассона (уравнение векторного потенциала) $\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ A_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \frac{\partial u}{\partial x_i} \right] = F(x_1, x_2, x_3).$	1. Электрические поля в электронных и ионных лампах с учетом объемных зарядов 2. Магнитные поля в машинах, аппаратах и приборах 3. Кручение стержней
4. Уравнение теплопроводности, (уравнение диффузии газов). Уравнение распространения электромагнитных волн в металлическом теле и др. $\frac{\partial}{\partial x} \left( A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A \frac{\partial u}{\partial y} \right) = B_1 \frac{\partial u}{\partial t} + B_0 u.$	1. Нагрев и охлаждение сооружений, отливок и проката металла и др. 2. Переходные электромагнитные процессы в металлах 3. Диффузия газов
5. Уравнение с комплексными величинами $\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ A_i \frac{\partial}{\partial x_i} (U_a + jU_b) \right] = j\omega c (U_a + jU_b).$	1. Индукционный нагрев и закалка металлов 2. Скин-эффект и эффект близости в электрических установках
6. Бигармоническое уравнение $\frac{\partial^4 V}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 V}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 V}{\partial y^4} = F(x, y).$	1. Расчет балок, плит безбалочных перекрытий (строительная механика, теория упругости)
7. Телеграфное уравнение (в частности уравнение Шредингера) $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = B_2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + B_1 \frac{\partial u}{\partial t} + B_0 u.$	1. Распространение волн в пространстве: электромагнитных (радиотехника), звуковых, упругих в сплошной среде (маханика) и др.
8. Уравнение для более сложных моделей $\sum_{k=0}^k a_k \frac{\partial^k}{\partial t^k} \nabla^2 u = \sum_{k=0}^{n_2} b_k \frac{\partial^k u}{\partial t^k}.$	1. Различные отделы физики. Многие уравнения еще не встречались
9. Интегральные уравнения многомерных моделей $V(x, y) = \int_{(G)} \int Z(x, y; \bar{x}, \bar{y}) B(\bar{x}, \bar{y}) u(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} \cdot d\bar{y} + F(x, y).$	1. Физика (определение собственных чисел и функций)

рые обладают новыми, более общими свойствами [Л. 13, 15, 16, 18, 19, 20]. Переходные процессы в этих искусственно составляемых цепях описываются системами обыкновенных дифференциальных уравнений первого или второго порядка при любых начальных условиях. На рис. 2 статьи Г. Л. Полисар и Н. В. Королькова [Л. 26] приведена фотография выполненной установки — универсальной электрической модели, в которой распределение напряжений определяется полной системой из 6 обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка с постоянными коэффициентами.

Универсальна она потому, что 72 коэффициента этой системы могут быть произвольно установлены от нуля до 100% (наибольшего значения коэффициента) через 0,1%.

Приведем несколько примеров применения этих моделей — аналогий, сведенные в табл. 2.

В большом числе случаев на основе метода исследования малых колебаний системы (Лагранж, Ляпунов) можно задачу о переходных процессах свести к системам линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффици-

циентами. Из-за крайней трудоемкости вычислений инженеры редко пользуются таким способом анализа. Даже само определение устойчивости динамических систем по критериям Рауса, Гурвица или Найквиста является очень трудоемким делом при большом числе уравнений.

На показанной установке эта задача решается практически мгновенно. После набора коэффициентов и задания начальных условий на осциллографе можно наблюдать, получается ли при данных условиях сходящийся или расходящийся колебательный процесс. По кривым можно видеть степень нарастания или декремент затухания колебаний.

Это дает возможность конструктору или расчетчику, подобрав, пользуясь моделью, такие параметры и знаки связей, чтобы система стала устойчивой.

На этой установке при помощи осциллографа можно наблюдать и фотографировать переходные процессы при различного рода возмущениях и разных начальных условиях, соответствующих аварийным и другим режимам работы системы.

Таблица 1

Уравнение	Некоторые примеры применения
<p>1. <math display="block">\sum_{j=1}^n (a_{ij}u_j + b_{ij}) \cdot \frac{du_j}{dt} = F_i(t)</math>  <math>(i = 1, 2, \dots, n)</math></p> <p>Система обыкновенных линейных дифференциальных уравнений 1-го порядка с постоянными коэффициентами при произвольных начальных условиях.</p> <p>2. <math display="block">C_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} + b_i \frac{du_i}{dt} + a_i u_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} u_j + F_i(t)</math>  <math>(i = 1, 2, \dots, n)</math></p> <p>Система обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка с постоянными коэффициентами.</p> <p>3. <math display="block">\frac{\partial i}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri</math>  <math display="block">\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial u}{\partial t} + Gu</math></p> <p>Система двух дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка, в частности волновое уравнение и уравнение Шредингера.</p> <p>4. Уравнение колебания балок</p> $\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] = B_2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + B_1 \frac{\partial u}{\partial t} + B_0 u.$ <p>5. <math display="block">\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( Z_{11} \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} \right) + B_{11} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + C_{11} \frac{\partial u_1}{\partial t} + B_{12} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} + C_{12} \frac{\partial u_2}{\partial t} + D_{12} u_2 = 0</math>  <math display="block">\frac{\partial}{\partial x} \left( Z_{21} \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) + B_{21} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} + C_{21} \frac{\partial u_2}{\partial t} + D_{21} u_1 + B_{22} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + C_{22} \frac{\partial u_1}{\partial t} + D_{22} u_2 = 0</math></p>	<p>1. Динамические процессы в системах регулирования  2. Динамическая устойчивость самолетов с автопилотами</p> <p>1. Уравнения динамики</p> <p>1. Распространение волны тока и напряжения в линиях  2. Колебания струн, нитей и т. п.</p> <p>1. Колебания балок, стержней, рельсов и др.  2. Колебания корабля  3. Вибраторы всех типов</p> <p>1. „Флаттер“ крыла самолета</p>

Необходимо подчеркнуть, что это устройство, которое в рассматриваемом применении может быть названо электроинтегратором, пригодно в основном для решения технических задач, для которых погрешность в 2—5%, а часто и больше, является вполне приемлемой.

Второе важное применение таких динамических моделей заключается в создании стендов для испытания аппаратуры автоматического управления, регулирования и защиты. Зачастую некоторые звенья сложной динамической системы имеются в готовом, действующем виде, а некоторые элементы рационально заменить моделями.

Зачем, например, составлять модель для регулятора, со всеми его нелинейностями, зоной нечувствительности, сухим трением и тому подобными свойствами, когда сам регулятор весит несколько килограмм и имеется в готовом для испытания виде. Однако, модель стенда, на которой этот регулятор испытывается, составить весьма рационально [Л. 10, 12, 16, 25].

В электрических моделях весьма наглядно отображаются сложные понятия математической физики. Скалярные, векторные и тензорные поля, многомерные и криволинейные системы координат, конформные преобразования, понятия дивергенции, ротора, фундаментальных чи-

сел и функций и др. — все это может быть изучено непосредственно измерениями и исследованиями в электрических моделях.

Краткая история вопроса. Электрические счетнорешающие устройства известны давно. К ним относятся столы для расчета сетей постоянного и переменного тока, на которых фактически решаются системы алгебраических уравнений.

Большой интерес представляют схемы взаимной индуктивности (трансформаторами тока и напряжения), т. е. пассивными четырехполюсниками. Особо следует отметить работы Мэллока и Буша, которые показали возможность решения с помощью этих схем линейных алгебраических уравнений.

Известные в электротехнике схемы замещения длинных линий, гирлянд изоляторов, обмоток трансформаторов, можно причислить к одномерным моделям, в которых распределение напряжений описывается разностным уравнением с одной независимой координатой. Бойкен применял такую одномерную модель для решения тепловой задачи.

Если говорить о решении хотя бы двумерных краевых задач, то все известные способы, начало которых положено еще во времена Кирхгофа, были практически пригодны лишь для решения уравнения Лапласа (зада-

Дирихле). Они были основаны на свойствах электролитических ванн, пластинок из металла и графита. В 1929 г. для решения уравнения Лапласа профессор С. А. Гершгорин предложил сетку из активных сопротивлений [Л. 6]. Эта принципиально важная и оригинальная идея осталась незамеченной и неиспользованной в течение 10 лет. Повидимому, это объясняется тем, что для решения уравнения Лапласа уже существовали весьма совершенные электролитические ванны с тщательно разработанной техникой.

На основе всех этих известных методов в Энергетическом институте Академии наук СССР (1939 г.) была развита теория и практика метода электрического моделирования с помощью произвольных сочетаний  $R$ ,  $L$  и  $C$  в двух, трех и принципиально  $n$ -мерных областях. Многие практически важные вопросы: составление схем моделей, способы задания истоков, граничных и начальных условий, методика измерения и др. были решены на специально построенных электроинтеграторах в Лаборатории электрического моделирования Энергетического института Академии наук СССР. Работы в этой области также начали вестись с 1943 г. и за рубежом (работы американцев Г. Крона, С. Рамо и др. [Л. 14]).

В последнее время в Энергетическом институте Академии наук СССР разработана теория и практика моделирования явлений с помощью схем из сопротивления, емкости и электронных ламп. Построена установка для решения системы из шести обыкновенных линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами.

Метод электрического моделирования, основанный на идеях, впервые зародившихся в Советском Союзе, может и должен сыграть большую роль в подъеме культуры исследований и расчетов, а также в развитии автоматических и управляющих счетнорешающих устройств.

**Выводы.** Теория о физических аналогиях, или иначе теория искусственного моделирования физических явлений, принципиально позволяет уподобить огромное число разнообразных процессов процессам в электрических цепях, состоящих из сочетаний всего лишь пяти сосредоточенных в пространстве элементов: сопротивлений, емкостей, индуктивностей, взаимоиндуктивностей, усилителей.

Искусственное воспроизведение физических явлений при помощи электрических схем полезно для решения следующих задач:

1. Исследование и расчет сложных систем, сооружений, машин, приборов и аппаратов на основе определенных исходных данных — уравнений, начальных и граничных условий, чертежа области и т. п. Большая скорость решения таких задач позволяет применять этот метод для качественного и количественного анализа влияния различных условий на характер решения, для выбора оптимальных режимов работы, формы сооружения и т. п.

2. Создание стендов моделей, заменяющих сложные объекты при испытании регуляторов,

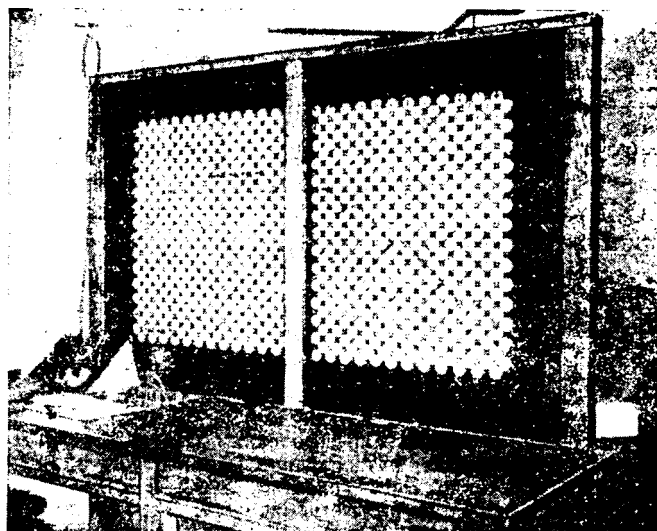


Рис. 4. Установка для решения дифференциальных уравнений эллиптического типа, изготовленная Энергетическим институтом Академии наук СССР.

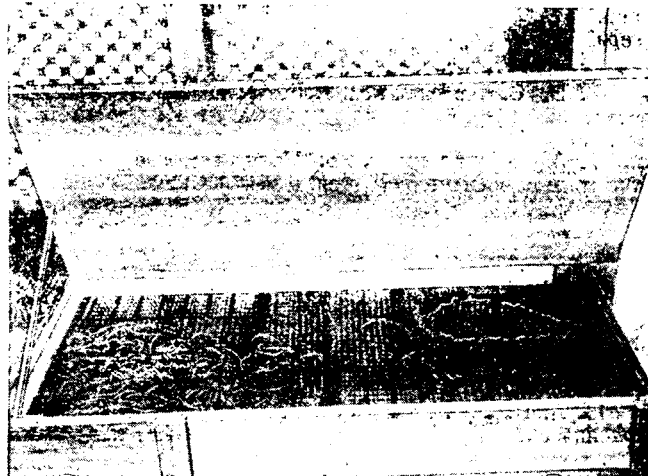


Рис. 4а. Устройство для задания граничных условий.

систем автоматического управления, защиты и другой аппаратуры.

3. Предвидение поведения реальной системы путем наблюдения за ходом процесса в электрической модели этой системы в другом масштабе времени.

4. Установление «взаимозаменяемости» устройств различной физической природы, что дает возможность научно решить проблему замены механических, электромеханических и других механизмов и устройств чисто электрическими (и наоборот). Этим самым разрабатываемый метод способствует созданию и развитию более совершенных счетнорешающих устройств и систем автоматики.

Теория и практика моделирования физических явлений имеет большое научное и учебно-педагогическое значение, так как она обобщает разрозненные и оторванные ныне дисциплины по теории механических, электрических и других цепей из сосредоточенных постоянных.



В развитии работ по моделированию следует отметить роль наших советских ученых: А. Н. Крылова, Г. М. Кржижановского, Н. Г. Бруевича, Л. И. Мандельштама, Л. С. Лейбензона, С. А. Гершгорина, Л. А. Люстерника, Д. Ю. Панова, В. С. Лукьянова, а также активное участие в этой работе сотрудников Энергетического института им. Кржижановского Академии наук СССР и ряда других научно-исследовательских институтов СССР.

### Литература

1. Д. И. Азарьев. Модель электрических систем. *Электричество*, № 5, 1947.
2. Г. И. Бабат. Моделирование электромагнитных полей систем индукционного нагрева. *Журнал технической физики*, т. 41, № 5, 1941.
3. П. М. Белаш. Электрические модели для приближенного решения интегральных и интегродифференциальных уравнений. *Электричество*, № 23—24, 1945.
4. Варшавский, Федорович. Электромеханические аналогии. *Известия электропромышленности слабого тока*, № 3, 1936.
5. Г. Гамбурцев. О составлении электромеханических аналогий. *Доклады Академии наук СССР*, т. 4 (9) № 8—9.
6. С. А. Гершгорин. Об электрических сетках для приближенного решения дифференциального уравнения Лапласа. *Журнал прикладной физики*, т. IV, вып. 3—4, 1929.
7. А. Л. Гофлин. Электрическая модель балки, лежащей на упругом основании. *Электричество*, № 5, 1947.
8. И. С. Градштейн. Решение систем линейных уравнений на электрических моделях Л. И. Гутенмахера. *Изв. ОН АН СССР*, № 5, 1947.
9. Л. И. Гутенмахер. Искусственные электрические модели многомерных тел. *ДАН СССР*, т. XXVII, № 3, 1940.
10. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование физических явлений. *Электричество*, № 5, 1940.
11. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование физических явлений для решения краевых задач математической физики (электроанalogии) *ЖТФ*, т. 12, вып. 2 (3) 1942.
12. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование. Изд. АН СССР, 1943.
13. Л. И. Гутенмахер. Электрические схемы для решения систем уравнений. *Докл. АН СССР*, т. 47, вып. 4, 1945.

14. Л. И. Гутенмахер. Интегральные уравнения многомерных электрических моделей. *Электричество*, № 1/2 1945.

15. Л. И. Гутенмахер, Н. И. Корольков и В. А. Тафт. Электрические схемы для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений. *Электричество*, № 4, 1945.

16. Л. И. Гутенмахер. Искусственное воспроизведение физических явлений для решения технических проблем. *Изв. ОН АН СССР*, № 4/5, 1945.

17. Л. И. Гутенмахер, А. Г. Коган и И. Н. Попов. Электромагнитные расчеты на интеграторе. *Электричество*, № 11, 1945.

18. Л. И. Гутенмахер, И. С. Градштейн и В. А. Тафт. Электрическое моделирование физических процессов при помощи матричных схем с усилителями. *Электричество*, № 3, 1946.

19. Л. И. Гутенмахер. Электрические модели и их применение для приближенного решения математических проблем. *Изв. ОН АН СССР*, № 8, 1946.

20. Л. И. Гутенмахер. Электрические многомерные модели с усилителями. *Изв. ОН АН СССР*, № 5, 1947.

21. Н. В. Корольков. Результаты разработки и испытаний опытной установки для решения системы дифференциальных уравнений. *Изв. ОН АН СССР*, № 5, 1947.

22. Л. А. Люстерник. Нахождение собственных значений и функций на электрической схеме. *Электричество*, № 11, 1946.

23. Р. Мэллок. Электрическая счетная машина. *Успехи математических наук*, вып. IV, 1938.

24. Г. Олсон. Динамические аналогии. Изд. И. Л., 1947.

25. Г. Л. Полисар. Электрические методы решения некоторых задач динамики самолета. *Техника воздушного флота*, № 7, 1947.

26. Г. Л. Полисар и Н. В. Корольков. Осуществление матричных схем с усилителями и решение при их помощи систем дифференциальных уравнений. *Электричество*, № 7, 1948.

27. И. М. Тетельбаум. Электромоделирование крутильных колебаний валов поршневых двигателей. *Труды ЦИАМ*, № 87, 1945.

28. Ю. Г. Толстов. Применение метода электрического моделирования физических явлений к решению некоторых задач подземной гидравлики. *Журнал технической физики*, т. 12 и 11, 1942.

29. А. А. Харкевич. Эквивалентные электрические схемы преобразователей. *Журнал технической физики*, т. 15, № 7, 1945.



# К теории преобразования фильтров релейной защиты

Доктор техн. наук, проф. Г. И. АТАБЕКОВ и кандидат техн. наук Я. М. СМОРОДИНСКИЙ  
Москва

Современный этап развития техники релейной защиты характеризуется тенденцией все возрастающего применения фильтров симмет-

*Описан метод преобразования фильтров напряжений фазовых последовательностей в фильтры токов тех же последовательностей (и обратно), основанный на теории дуальных цепей. При помощи этого метода авторы получили ряд новых схем фильтров, которые могут найти применение в новой технике релейной защиты.*

ричных составляющих различных фазовых последовательностей или их комбинаций. Известные из литературы схемы фильтров, предложенные отдельными авторами [Л. 1], не исчерпывают всего многообразия фильтров. Ощущается необходимость в более общем подходе к анализу фильтровых схем и в создании обобщенной теории преобразования фильтров. В основу такой теории, по мнению авторов статьи, могут быть положены принцип замены источников напряжений источниками тока (или наоборот) и принцип дуальных цепей.

Действительно, трансформаторы напряжения, питающие фильтры напряжения фазовых последовательностей, могут рассматриваться в качестве источников напряжений, отличающихся неизменной величиной и формой кривой э. д. с. при различных нагрузках.

Внутренние сопротивления таких источников напряжений малы в сравнении с последовательно соединенными с ними сопротивлениями внешней цепи и могут быть отнесены к последней или с достаточной для практики точностью могут вовсе не учитываться.

В свою очередь трансформаторы тока могут рассматриваться в качестве источников тока,

поддерживающих примерно неизменную величину и форму кривой тока при различных значениях напряжения на их зажимах. Сопротив-

ление ветви намагничивания трансформатора тока, приведенное к числу витков вторичной обмотки, обычно велико по сравнению с соединенными параллельно с ветвью намагничивания сопротивлениями вторичной обмотки и нагрузки. Отсюда, естественно, возникает мысль о целесообразности использования указанных выше двух принципов для преобразования фильтров одного рода в фильтры другого рода.

**Эквивалентные и дуальные цепи.** Пусть задана электрическая цепь, содержащая  $n$  независимых контуров и питаемая одним источником напряжения  $\dot{U}$  (рис. 1, а). Замена источника напряжения источником тока в этой цепи может быть осуществлена двумя методами: заменой заданной цепи эквивалентной цепью или дуальной.

В первом случае все пассивные элементы остаются неизменными и сохраняются условия (напряжение, ток) на входных зажимах цепи. При этом источник напряжения с внутренним сопротивлением  $Z_0$  заменяется источником тока  $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z_0}$  с параллельно соединенным сопротивлением  $Z_0$  [Л. 2].

Следует заметить, что при сохранении неиз-

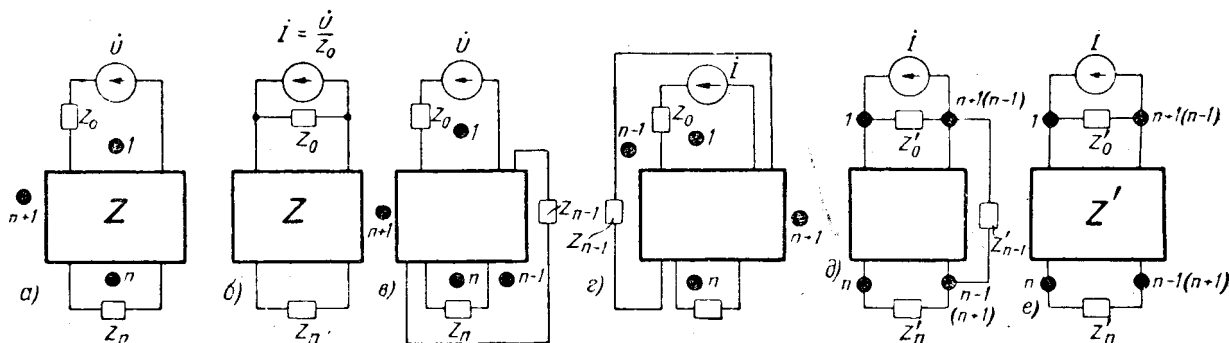


Рис. 1. Замена источника напряжения источником тока методом эквивалентных и дуальных цепей.

а — заданная цепь, питаемая источником напряжения; б — эквивалентная цепь, питаемая источником тока; в, г — заданные цепи, питаемые источником напряжения, с вынесенной за пределы четырехполюсника одной из диагональных ветвей с элементом  $Z_{n-1}$ ; д — дуальная цепь по отношению к цепи в и г; е — дуальная цепь по отношению к цепи а (ветвь  $Z'_{n-1}$  внесена внутрь четырехполюсника).

менными как самого четырехполюсника  $Z$ , так и электрических величин тока  $I'$  и напряжения  $U' = U - I'Z_0$  на его входных зажимах, параллельно источнику тока  $I$  может быть приключено произвольно выбранное сопротивление  $Z_k$  при условии, что ток  $I$  удовлетворяет уравнению

$$I = \frac{U'}{Z_k} + I'. \quad (1)$$

При этом, однако, одинаковые условия на зажимах обеих цепей, питаемых источниками напряжения и тока, будут иметь место только при стационарном режиме и некоторой фиксированной частоте, удовлетворяющей уравнению (1).

Сохранение равенства условий на зажимах обеих цепей при произвольных режимах и частотах возможно в общем случае только при  $Z_k = Z_0$ .

Во втором случае заданная цепь заменяется дуальной. Закон изменения напряжений между узлами новой цепи соответствует закону изменения контурных токов в заданной цепи. Иначе говоря, дифференциальные уравнения заданной цепи, записанные для контурных токов по второму закону Кирхгофа, аналогичны дифференциальным уравнениям дуальной цепи, записанным для узловых напряжений по первому закону Кирхгофа. Каждой области, ограниченной независимым контуром заданной цепи, с учетом также и области, внешней по отношению ко всей цепи, соответствует определенный узел дуальной цепи. Таким образом, число областей заданной цепи равно числу узлов дуальной.

При построении дуальной цепи по отношению к заданной планарной цепи удобно пользоваться следующим графическим приемом [Л. 2, 3]: в каждой из областей, ограниченной независимым контуром заданной цепи, наносится точка, рассматриваемая в качестве будущего узла дуальной цепи. Узлы, соответствующие каждой паре смежных областей, соединяются между собой параллельными ветвями, число которых равно числу элементов, последовательно включенных в цепь, граничащую с указанными областями. Элементами параллельных ветвей служат «аналоги» элементов заданной цепи (аналогом источника напряжения служит источник тока, аналогом индуктивности — емкость, аналогом сопротивления — проводимость). Таким образом, результирующее сопротивление ветви, соединяющей непосредственно два узла дуальной цепи, получается обратно пропорциональным сопротивлению заданной цепи, разграничивающей две смежные области, которым соответствуют означенные узлы. При этом коэффициент пропорциональности для всех пассивных элементов схемы одинаков.

Рис. 1, в, г, д, е иллюстрируют построение цепи, дуальной по отношению к цепи рис. 1, а. Ради общности рассуждений принимается, что четырехполюсник  $Z$ , рис. 1, а содержит две диагональные ветви. Для получения областей, ограниченных независимыми контурами, одна из диагональных ветвей, например, содержащая эле-

мент  $Z_{n-1}$ , выносится за пределы четырехполюсника (рис. 1, в и г). При этом вся заданная электрическая цепь становится планарной.

Как видно из рис. 1, в, область  $n+1$  не граничит с областью  $n$ . Это означает, что между узлами  $n$  и  $n+1$  дуальной цепи, соответствующими этим областям, не будет непосредственной связи.

На основании вышеописанного графического приема получена дуальная цепь (рис. 1, д), которая после внесения внутрь четырехполюсника ветви  $Z'_{n-1}$  представлена на рис. 1, е. При этом четырехполюсник рис. 1, е, условно обозначенный  $Z'$ , представляет собой электрическую цепь, дуальную по отношению к четырехполюснику  $Z$  рис. 1, а. Можно показать, что если четырехполюсник  $Z$  имеет параметры Брейзига  $A, B, C, D$ , то четырехполюсник  $Z'$  будет соответственно иметь параметры, пропорциональные  $D, C, B, A$ .

Следует заметить, что на рис. 1, в диагональная ветвь с элементом  $Z_{n-1}$  была вынесена из четырехполюсника  $Z$  так, что она охватила область  $n$ . Однако эту ветвь можно было бы изобразить охватывающей область 1 (рис. 1, г). В этом случае внешняя область  $n+1$  стала бы смежной с областью  $n$  и не имела бы границы с областью 1. В последнем случае дуальная цепь рис. 1, е сохранилась бы без изменений, а номера узлов  $n-1$  и  $n+1$  поменялись бы местами (см. обозначения узлов, заключенные в скобки на рис. 1, д и е).

При отсутствии в четырехполюснике  $Z$  перекрещивающихся ветвей ( $Z_{n-1} = \infty$ ) узлы  $n-1$  и  $n+1$  дуальной цепи соединяются накоротко ( $Z'_{n-1} = 0$ ).

**Преобразование фильтров фазовых последовательностей.** Пользуясь изложенными выше приемами преобразования цепей, легко показать их применимость для преобразования фильтра напряжений фазовой последовательности в фильтр токов той же последовательности, или наоборот.

Пусть задан фильтр напряжения, изображенный в виде пятиполюсника на рис. 2, а. Можно показать, что при замене заданной цепи рис. 2, а дуальной цепью получается фильтр токов той же последовательности (рис. 2, б). Рис. 2, б соответствует случаю, когда фильтр напряжения рис. 2, а содержит пересекающиеся ветви, одна из которых, принадлежащая к контуру, обозначенному  $n-1$ , вынесена так, что она охватывает область  $n$ . При отсутствии диагональных ветвей узлы  $n+1$  и  $n-1$  оказываются закороченными.

Напряжение между узлами  $n$  и  $n-1$  в дуальной цепи (т. е. напряжение на зажимах приемника  $Z'_n$ ) изменяется по тому же закону, что и контурный ток в выходной цепи (контур  $n$ ) заданного фильтра, т. е. они являются электрическими величинами одноименной фазовой последовательности.

Из этого следует, что полученный пятиполюсник является фильтром токов одноименной фазовой последовательности с исходным фильт-

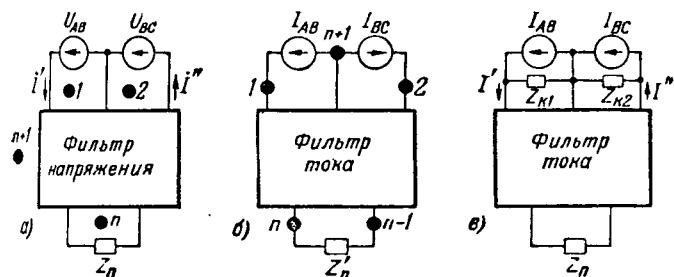


Рис. 2. Преобразование фильтров симметричных составляющих.

а — заданный фильтр напряжения; б — фильтр тока, полученный методом дуальных цепей; в — фильтр тока, полученный методом эквивалентных цепей.

ром напряжения. Следует иметь в виду, что пятиполюсник остается фильтром независимо от характера подключаемой нагрузки  $Z'_n$ . При выборе характера  $Z'_n$  целесообразно исходить из условия максимальной отдачи мощности. Как уже указывалось выше, наряду с заменой источников напряжений (рис. 2, а) источниками токов (рис. 2, б), сопровождающейся переходом пятиполюсника  $Z$  в дуальный пятиполюсник  $Z'$ , возможна также замена источников напряжений источниками тока с сохранением неизменными как самого пятиполюсника  $Z'$ , так и токов  $i'$  и  $i''$  и напряжений  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{BC}$  на его зажимах (рис. 2, в) при стационарном режиме и заданной частоте. В этом случае параллельно источникам токов должны быть подключены сопротивления  $Z_{k1}$  и  $Z_{k2}$ , удовлетворяющие уравнениям

$$Z_{k1} = \frac{\dot{U}_{AB}}{i'_{AB} - i''}, \quad (2)$$

$$Z_{k2} = \frac{\dot{U}_{BC}}{i'_{BC} - i''}. \quad (3)$$

При этом представленная на рис. 2, в схема пятиполюсника с шунтирующими входные зажимы сопротивлениями  $Z_{k1}$  и  $Z_{k2}$  может служить фильтром токов той же последовательности, что и схема рис. 2, а, при условии, что  $\frac{i'_{AB}}{i'_{BC}} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{U}_{BC}}$ . Естественно, что свойства филь-

тра токов будут также сохранены в том случае, если все сопротивления, входящие в схему рис. 2, в, будут изменены в одинаковое число раз.

**Фильтры нулевой последовательности.** В качестве простейшей иллюстрации применения метода дуальных цепей к фильтрам на рис. 3 показано преобразование схем фильтров напряжений нулевой последовательности в схемы фильтров токов. На рис. 3, а изображена так называемая схема включения трансформатора напряжения разомкнутым треугольником, на рис. 3, б — схема замещения ее (внутреннее сопротивление источника напряжения принято равным нулю). Пользуясь графическим приемом, указанным выше, легко получить дуальную цепь, изображенную на схеме рис. 3, в. Последняя является схемой замещения фильтра токов нулевой последовательности, известного под названием схемы Холмгрена — рис. 3, г.

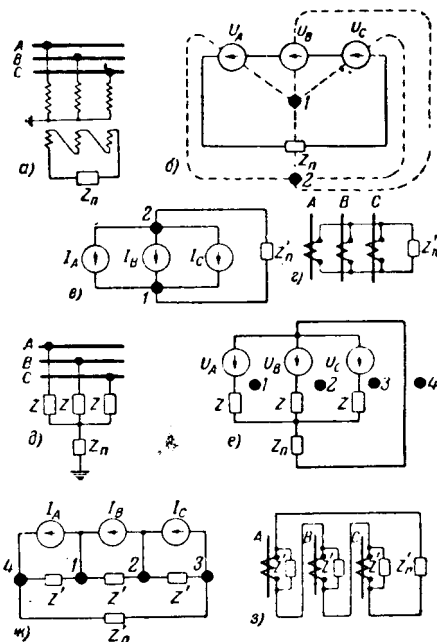


Рис. 3. Преобразование фильтров напряжения нулевой последовательности в фильтры токов методом дуальных цепей.

а — схема соединения трансформатора напряжения разомкнутым треугольником (фильтр напряжения нулевой последовательности); б — схема замещения рис. 3, а; в — цепь, дуальная по отношению к рис. 3, б; г — схема Холмгрена (фильтр токов нулевой последовательности); д — схема для выделения напряжения нулевой последовательности; е — схема замещения рис. 3, д; ж — цепь, дуальная по отношению к рис. 3, а; з — схема фильтра токов нулевой последовательности.

Аналогичным образом рис. 3, з иллюстрирует дуальную цепь по отношению к заданной схеме рис. 3, д, представляющую известную из литературы разновидность фильтра токов нулевой последовательности [Л. 4].

**Фильтры положительной и отрицательной последовательности.** Системы симметричных составляющих положительной и отрицательной последовательностей отличаются друг от друга порядком следования во времени амплитуд фазных (или соответственно) междофазных электрических величин. Всякая схема, используемая для выделения составляющих положительной последовательности, может быть поэтому путем перестановки любых двух фаз превращена в схему для выделения составляющих отрицательной последовательности. С этой точки зрения является достаточным рассмотреть схемы только одной из указанных фазовых последовательностей, распространив затем полученные результаты на вторую систему симметричных составляющих.

Нижеприведенный анализ дан применительно к системе отрицательной последовательности. В качестве исходных схем приняты схемы фильтров напряжений отрицательной последовательности, известные из литературы. Фильтры токов получены как дуальные по отношению к заданным.

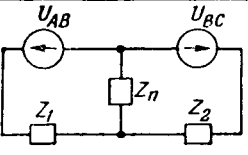
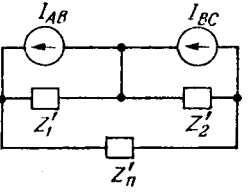
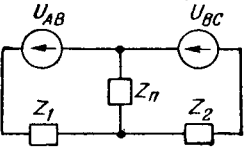
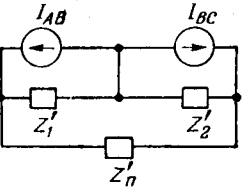
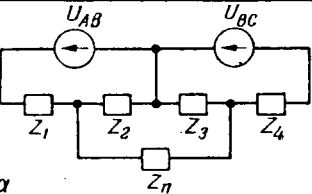
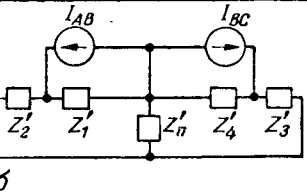
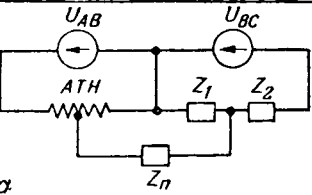
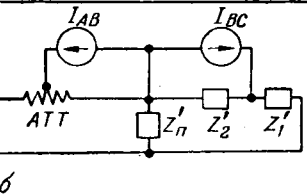
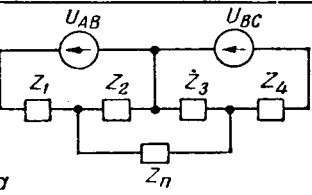
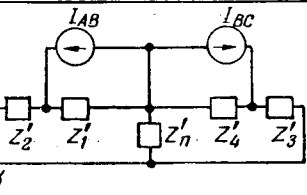
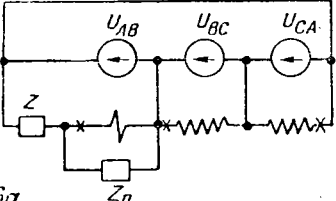
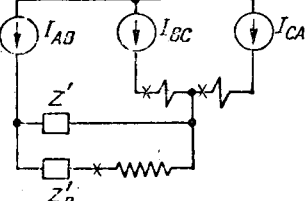
В основе проектирования фильтров напряжений отрицательной последовательности лежит формула:

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} [\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C], \quad (4)$$

где  $a = e^{j120^\circ}$  — фазный оператор.

Таблица 1

## Основные типы фильтров напряжений и токов отрицательной последовательности

Автор или наименование схемы фильтра	Фильтры напряжения	Фильтры тока	Основные соотношения
Олкатт	 1a	 1б	$\frac{Z_1}{Z_2} = e^{-j60^\circ}$ $\frac{Z'_1}{Z'_2} = e^{j60^\circ}$
Олкатт (модификация)	 2a	 2б	$\frac{Z_1}{Z_2} = e^{j120^\circ}$ $\frac{Z'_1}{Z'_2} = e^{-j120^\circ}$
Жанкен	 3a	 3б	$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} = e^{-j60^\circ}$ $\frac{Z'_1}{Z'_2} = \frac{Z'_3}{Z'_4} = e^{j60^\circ}$
Схема с делителем	 4a	 4б	$\frac{Z_1 \sqrt{3}}{Z_2} = e^{-j90^\circ}$ $\frac{Z'_1}{Z'_2 \sqrt{3}} = e^{j90^\circ}$
Смординский	 5a	 5б	$\frac{Z_1 \sqrt{3}}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4 \sqrt{3}} = e^{-j90^\circ}$ $\frac{Z'_1}{Z'_2 \sqrt{3}} = \frac{Z'_3 \sqrt{3}}{Z'_4} = e^{j90^\circ}$
Вестингауз	 6a	 6б	$Z = R$ $M = \sqrt{3} \frac{R}{\omega}$ $Z' = R'$ $M' = \frac{R'}{\omega \sqrt{3}}$

Практически наиболее рациональными являются схемы, основанные на использовании линейных напряжений, так как при этом исключаются составляющие нулевой последовательности и для выделения напряжений отрицательной последовательности становится возможным пользоваться двумя линейными напряжениями [вместо трех фазных по формуле (4)]

В связи с этим формула (4) может быть преобразована следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \frac{1}{3} [\dot{U}_A + a^2 \dot{U}_B + a \dot{U}_C - a \dot{U}_B + a \dot{U}_C] = \\ &= \frac{1}{3} [\dot{U}_{AB} + a \dot{U}_{CB}]. \end{aligned}$$

Отсюда

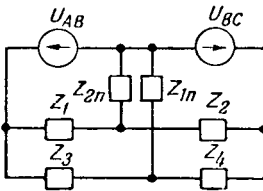
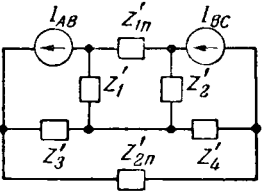
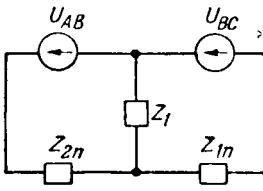
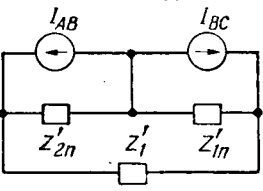
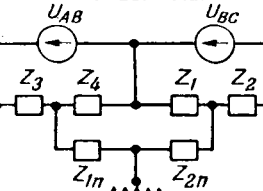
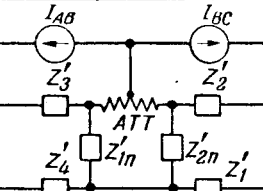
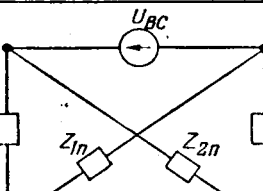
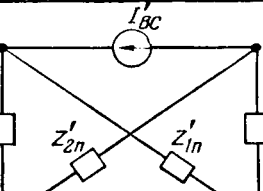
$$e^{-j\alpha} \dot{U}_2 = \frac{1}{3} [e^{-j\alpha} \dot{U}_{AB} + e^{j(120-\alpha)} \dot{U}_{CB}], \quad (5)$$

$$e^{j\alpha} \dot{U}_2 = \frac{1}{3} [e^{j\alpha} \dot{U}_{AB} + e^{-j(60-\alpha)} \dot{U}_{BC}]. \quad (6)$$

Эти и аналогичные им формулы кладутся обычно в основу применяемых на практике фильтров напряжений отрицательной последовательности: на выходе фильтров получаются напряжения, пропорциональные  $\dot{U}_2$  и отстающие от вектора  $\dot{U}_2$  [уравнение (5)] или опережающие его [уравнение (6)] на угол  $\alpha$ .

Таблица 2

Основные типы сдвоенных фильтров напряжений и токов положительной и отрицательной последовательностей

Автор или наименование схемы фильтра	Фильтры напряжения	Фильтры тока	Основные соотношения
Олкатт	 <p>1а</p>	 <p>1б</p>	$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_4}{Z_3} = e^{-j60^\circ}$ $\frac{Z_1'}{Z_2'} = \frac{Z_4'}{Z_3'} = e^{j60^\circ}$
Олкатт (модификация)	 <p>2а</p>	 <p>2б</p>	$\frac{Z_{2n}}{Z_1} = \frac{Z_{1n}}{Z_1} = e^{j120^\circ}$ $\frac{Z_{2'n}}{Z_1'} = \frac{Z_{1'n}}{Z_1'} = e^{-j120^\circ}$
Схема с делителем	 <p>3а</p>	 <p>3б</p>	$\frac{Z_1}{Z_2 \sqrt{3}} = \frac{Z_4 \sqrt{3}}{Z_3} = e^{-j90^\circ}$ $\frac{Z_1' \sqrt{3}}{Z_2'} = \frac{Z_4'}{Z_3' \sqrt{3}} = e^{j90^\circ}$
Фортеस्कью	 <p>4а</p>	 <p>4б</p>	$\frac{Z_2}{Z_1} \frac{Z_1 + Z_n}{Z_2 + Z_n} = e^{-j60^\circ}$ $\frac{Z_2' + Z_n'}{Z_1' + Z_n'} = e^{j60^\circ}$ $Z_{1n}' = Z_{2n}' = Z_n'$

В табл. 1 приведены основные типы фильтров напряжений и токов отрицательной последовательности [Л. 1, 5, 6]: 1) фильтр Олкатта и 2) его модификация; 3) Жанкена; 4) фильтр с делителем (автотрансформатором) напряжения; 5) фильтр Я. М. Смородинского; 6) Вестингауза. Всего в табл. 1 даны 6 схем фильтров напряжений и столько же схем фильтров токов. В таблице также приведены основные расчетные соотношения, связывающие сопротивления элементов фильтров<sup>1</sup>.

В табл. 2 приведены основные разновидности сдвоенных фильтров напряжений и токов (положительной и отрицательной последовательностей [Л. 1, 5]). Как и в предыдущей табл. 1, фильтры, обозначенные одинаковыми номерами, получены методом дуальных цепей.

Следует иметь в виду, что в сдвоенном фильтре напряжений по модифицированной схеме Олкатта (2а) сопротивления нагрузок  $Z_{1n}$  и  $Z_{2n}$  одновременно служат в качестве элементов самого фильтра. В связи с этим сопротивления нагрузок в фильтре токов  $Z_{1'n}$  и  $Z_{2'n}$  должны являться „аналогами“ соответствующих сопротивлений в фильтре напряжений.

Применение метода дуальных цепей в мостовой схеме сдвоенного фильтра токов Фортеस्कью (4б) позволило получить новую схему сдвоенного фильтра напряжений (4а), являющуюся также мостовой, так как согласно теории дуальных цепей мостовые схемы в геометрическом отношении являются автодуальными. Наряду со схемой 4а новой схемой сдвоенного фильтра является схема с автотрансформатором тока (3б). К числу новых схем, полученных методом дуальных цепей, относятся так же приведенные в табл. 1 схемы фильтра тока с делителем (4б) и фильтра напряжения по типу 6а.

<sup>1</sup> Обмотки фильтра напряжения схемы 6а, табл. 1 должны располагаться на разных сердечниках магнитопровода.

Схемы двоянных фильтров табл. 2 за исключением фильтров по модифицированной схеме Олкатта 2а и б могут быть легко приведены к простым схемам фильтров путем размыкания соответствующих цепей напряжения или шунтирования накоротко цепей тока.

**Выводы.** Предлагаемый метод преобразования фильтров, дает общий подход к анализу существующих и созданию новых типов фильтров и является поэтому весьма эффективным средством исследования и разработки фильтровых защит. Получение указанными выше путями новых фильтров не ограничивается приведенными примерами и могло бы быть иллюстрировано многочисленными схемами. В отличие от субъективного метода разработки фильтровых схем, носящего в значительной мере характер случайного изобретательства, описанный выше метод базируется на определенных теоретических положениях и автоматически безошибочно приводит к решению задачи. Расчет, произведенный для какого-либо одного фильтра, может быть использован для другого, являющегося дуальным по отношению к известному. Напряжение холостого хода на выходных зажимах одного из них соответствует току короткого за-

мыкания на выходе второго.

Приведенный метод особенно полезен в тех случаях, когда по условиям поставленной задачи требуется обеспечить определенный характер протекания процессов в цепях напряжений токов нагрузки<sup>2</sup>.

#### Литература

1. К. Ф. Вагнер, Р. Д. Эванс, Метод симметричных составляющих. ОНТИ, 1936.
2. Gardner, Barnes. Transients in Linear Systems, т. 1, 1942.
3. A. Bloch. Electromechanical Analogies and Their Use For the Analysis of Mechanical and Electromechanical Systems. JIEE, p. 1, т. 92. № 2, 1945.
4. Н. Н. Щедрин. Измерение симметричных составляющих несимметричных токов. Дополнения к переводу книги Вагнера и Эванса „Метод симметричных составляющих“. Госэнергоиздат, стр. 178, 1933.
5. П. Л. Калантаров. Теория переменных токов. Госэнергоиздат, 1940.
6. Г. И. Атабеков, Я. М. Смородинский. Быстродействующая фильтровая высокочастотная защита. Электричество, № 1, 1946.

<sup>2</sup> После представления статьи в редакцию журнала авторам стало известно, что В. Л. Фабрикантом независимо была прочтена лекция в Мосэнерго о возможности преобразования фильтра напряжения в фильтр тока способом, аналогичным принципу дуальных цепей.



## О КОНКУРСЕ НА СОИСКАНИЕ ЗОЛОТОЙ МЕДАЛИ ИМЕНИ А. С. ПОПОВА

Президиум Академии наук СССР объявляет о конкурсе на соискание золотой медали имени А. С. Попова, присуждаемой за выдающиеся научные работы и изобретения в области радио.

Право на соискание медали им. А. С. Попова имеют советские, а также зарубежные ученые.

Работы, законченные в 1948 г., могут представляться научными обществами, научно-исследовательскими институтами, высшими учебными заведениями, ведомствами, общественными организациями и отдельными гражданами на любом языке в трех экземплярах, напечатанных на пишущей машинке или типографским способом.

К работе должны быть приложены отзывы организаций, представляющих работу на соискание медали, о научной ценности и значении работы для развития радио и краткие биографические сведения об авторе с перечнем его основных научных работ и изобретений.

Срок представления работ — не позже 1 февраля 1949 г.

Работы с надписью «На соискание золотой медали имени А. С. Попова» направлять в Совет по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР — г. Москва, 3-я Миусская ул., 3.

Справки по телефону Д 1—03—68.

Президиум Академии наук СССР

## Снятие кривых моментов вращения асинхронных двигателей

Инж. А. И. ВОЛЬДЕК

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Непосредственное экспериментальное определение моментов вращения асинхронных двигателей представляет большой практический интерес, так как пользование круговой диаграммой не дает достаточно точных результатов даже для нормальных короткозамкнутых двигателей. Кроме того, круговая диаграмма не отображает искажений кривой момента высшими гармониками. Разработаны весьма изящные методы снятия кривых моментов вращения, как, например, метод осциллографирования разбега двигателя при пуске вхолостую. Однако эти методы часто неприменимы, либо они требуют дефицитного специального оборудования, как например, осциллографы, либо позволяют исследовать только область двигательного режима, либо же не обнаруживают всех искажений кривой момента, например от синхронных моментов. Большое значение имеют схемы, позволяющие обеспечить устойчивую работу асинхронной машины при любой скорости вращения. Н. А. Киклевич предложил<sup>1</sup> для этой цели две схемы с использованием серийного генератора постоянного тока и двигателя Рихтера-Шраге в режиме коллекторного генератора переменного тока. Наряду с простотой, эти схемы, однако, обладают некоторыми недостатками: 1) требуются мощные реостаты с плавным регулированием сопротивления в широких пределах; 2) скорость исследуемого двигателя нельзя довести до нуля, хотя наибольший практический интерес представляет именно область скольжений, близких к единице; 3) исследование области тормозного режима невозможно; 4) наличие в цепи якоря нагрузочной машины реостата, сопротивление которого велико по сравнению с сопротивлением якоря машины, уменьшает крутизну нагрузочного момента.

Можно указать простую схему (рис. 1), которая является более гибкой и не имеет этих недостатков. Схема рис. 1 легче осуществима на базе наличного оборудования любой лаборатории, так как не требует специальных реостатов и мало распространенных типов машин.

При двигательном режиме работы исследуемого двигателя 1 (рис. 1) машина постоянного

тока 2 работает генератором, машина постоянного тока 3 — двигателем, а асинхронная машина 4 — генератором, отдающим энергию в сеть. Включение машин 2 и 3 на параллельную работу производится рубильником 5 при холостом ходе машин 1 и 4, когда напряжения машин 2 и 3 выравнены и имеют одинаковую полярность. При уменьшении тока возбуждения машины 3 при помощи реостата 8 скорость двигателя 1 будет уменьшаться и достигнет минимума, когда

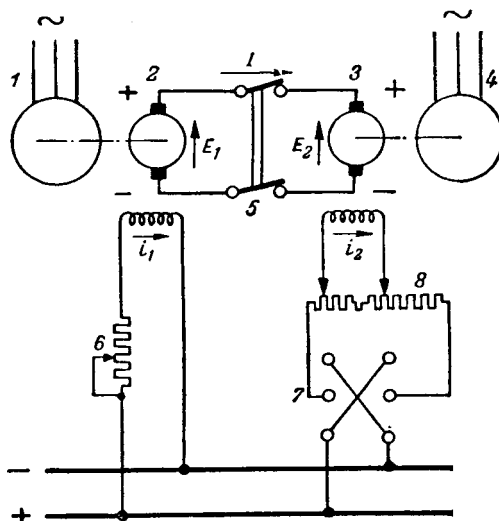


Рис. 1.

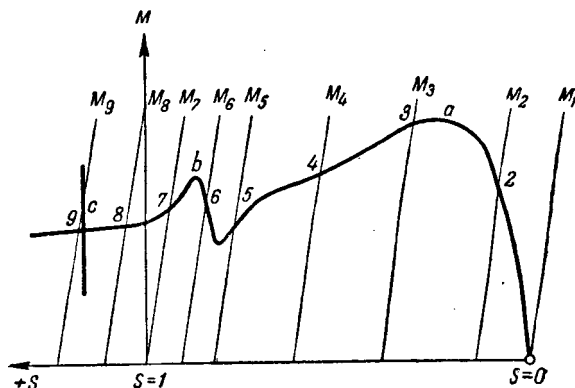


Рис. 2.

<sup>1</sup> Электричество, № 2, 1941; № 10, 1945.



ток возбуждения станет равным нулю. Если теперь переключить обмотку возбуждения машины 3 при помощи переключателя 7 и начать вновь увеличивать ее ток возбуждения, то двигатель 1 может быть доведен до останова и приведен во вращение в обратном направлении. При этом машина 1 будет работать в режиме тормоза, машины 2 и 4 — в двигательных режимах и машина 3 — в генераторном.

На рис. 2 изображена кривая моментов вращения исследуемого двигателя. Если машина 2 имеет только обмотку независимого возбуждения, то создаваемые ею нагрузочные моменты изображаются на рис. 2 прямыми 1, 2, 3 и т. д., соответствующими различным токам возбуждения машины 3. Чтобы иметь возможность обнаружить все возможные провалы в кривой момен-

тов вращения исследуемого двигателя, кривые на грузочных моментах машины 2 должны обладать возможно большей крутизной. В случае, когда машина 2 имеет только независимое возбужде-

ние, обычно достигаемая крутизна  $\frac{dM}{ds} = 12 \dots 18$

Для достижения большей крутизны могут быть применены следующие меры: 1) замена машины 2 независимого возбуждения машиной компаундного возбуждения; 2) установка машин 2 и 3 большей мощности, чем требует опыта; 3) использование возможностей перегрузки машины 2 по току возбуждения и скорости вращения.



## Универсальные кривые для определения мешающего действия ртутных выпрямителей

Кандидат техн. наук М. А. ЧЕРНЫШЕВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта

Влияние электрических железных дорог на проходящие вдоль них линии связи определяется рядом факторов, одним из которых является так называемый влияющий ток, создаваемый уравнительным мешающим напряжением, действующим в контактной сети и зависящим от условий нагрузки тяговых подстанций. Вопрос этот не получил должного освещения в технической литературе. В большинстве статей, опубликованных на эту тему, приведены лишь значения отдельных замеров, без их теоретической интерпретации, позволяющей делать пересчеты для других условий. Установление теоретических закономерностей, дающих возможность выполнять практические расчеты, и является целью настоящей статьи.

**Уравнительное эквивалентное мешающее напряжение подстанций с неуправляемыми выпрямителями.** Наиболее общая схема воздействия электрической железной дороги на провода связи, встречающаяся на практике, представлена на рис. 1. Электрифицированный участок питается  $k$  параллельно работающими тяговыми подстанциями, напряжения которых содержат переменные составляющие  $U_{(1)}, U_{(2)}, \dots, U_{(k)}$ . Между подстанциями произвольным образом распо-

жены нагрузки. Детальное рассмотрение условий образования токов в отдельных контурах и их взаимодействия с линией связи приводит к заключению<sup>1</sup>, что для гармоник влияющего тока частоты  $\nu$  продольная результирующая э. д. с., индуктированная в проводах связи, будет:

$$\dot{E}_\nu = \lambda \frac{M_{cp}}{L} (\dot{U}_{\nu(1)} - \dot{U}_{\nu(k)}), \quad (1)$$

где  $\lambda$  — коэффициент экранирования рельсов;  
 $M_{cp}$  — средняя величина взаимной индуктивности между контактным проводом и линией связи 1 км параллельного сближения;  
 $L$  — индуктивность 1 км контактной сети;  
 $U_{\nu(1)}, U_{\nu(k)}$  — величины гармоник с частотой  $\nu$  в переменной составляющей напряжения крайних тяговых подстанций.

Промежуточные подстанции и места расположения нагрузок не отражаются, как оказывается, на результатах суммарного взаимодействия. Для определения влияния, таким образом, нужно знать значения гармонических составляющих пульсации напряжения крайних подстанций, или, так как мы имеем здесь дело только с разностью одноименных гармоник, необходимо знать непосредственно величину гармонических составляющих разности мгновенных значений напряжений этих подстанций.

<sup>1</sup> М. И. Михайлов. Определение влияющего тока контактной сети электрифицированной железной дороги с питанием от ртутных выпрямителей. Электро-связь, стр. 77, № 4, 1941.

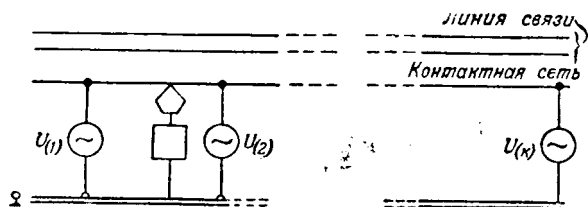


Рис. 1.

На рис. 2 приведены формы выпрямленного напряжения, соответствующие различным нагрузкам. Верхняя кривая  $u_{d(1)}$  соответствует некоторой нагрузке подстанции 1, при которой угол перекрытия анодных токов выпрямителей составляет  $\gamma_1$ , нижняя кривая  $u_{d(k)}$ , изображающая напряжение подстанции  $k$ , соответствует большей нагрузке, при которой угол перекрытия равен  $\gamma_k$ . Разность мгновенных значений напряжений  $\Delta u = u_{d(1)} - u_{d(k)}$ , показанная внизу, составляется из отрезков соответствующих синусоид в интервалы времени от  $\vartheta = \gamma_1$  до  $\gamma_k$  и аналогичные им через периоды  $\frac{2\pi}{6}$ . В основу подсчетов влияния кладется уравнивающее эквивалентное мешающее напряжение

$$\Delta U_{\text{эк}} = \sqrt{\Sigma (\Delta U_{\nu} p_{\nu})^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta U_{\nu}$  — эффективные значения гармонических составляющих с частотой  $\nu$  разности мгновенных значений напряжений крайних подстанций;

$p_{\nu}$  — коэффициенты звукового воздействия для данной частоты, установленные Международным консультативным комитетом, приведенные в таблице.

Таблица

$n$	6	12	18	24	30
$\nu$	300	600	900	1 200	1 500
$p_{\nu}$	0,316	0,558	1,412	1,26	0,424

В свою очередь

$$\Delta U_{\nu} = \sqrt{(\Delta U'_{\nu})^2 + (\Delta U''_{\nu})^2}, \quad (3)$$

где

$$\Delta U'_{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{6}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{6}} U_{d0} \cdot \sin \vartheta \sin n \vartheta d\vartheta \quad (4)$$

— эффективное значение синусоидальной составляющей с частотой  $\nu = n \cdot f$ ,  $n = 6, 12, 18, 24, \dots$ , а

$$\Delta U''_{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{6}{\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{6}} U_{d0} \cdot \sin \vartheta \cdot \cos n \vartheta d\vartheta \quad (5)$$

— эффективное значение косинусоидальной составляющей;

$U_{d0}$  — постоянная составляющая прямого напряжения при холостом ходе ( $\gamma = 0$ ).

Выполнение интегрирования и подстановка пределов дает:

$$\Delta U'_{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{d0} \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{n-1} [\sin(n-1)\gamma_k - \sin(n-1)\gamma_1] - \frac{1}{n+1} [\sin(n+1)\gamma_k - \sin(n+1)\gamma_1] \right\}, \quad (6)$$

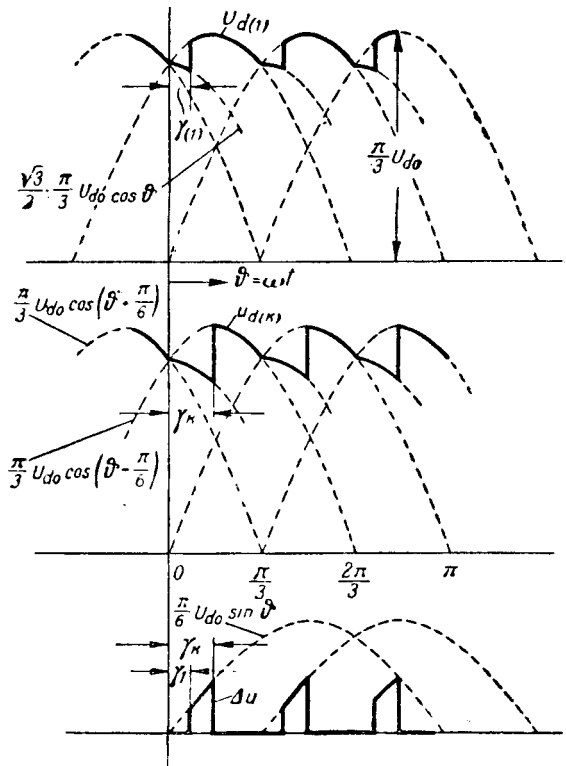


Рис. 2.

$$\Delta U''_{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{d0} \frac{1}{2} \left\{ -\frac{1}{n-1} [\cos(n-1)\gamma_k - \cos(n-1)\gamma_1] + \frac{1}{n+1} [\cos(n+1)\gamma_k - \cos(n+1)\gamma_1] \right\}. \quad (7)$$

Как видно из формул, для подсчета уравнивающего эквивалентного мешающего напряжения, соответствующего определенным нагрузкам подстанций 1 и  $k$  (определенным значениям  $\gamma_1$  и  $\gamma_k$ ), требуется довольно сложное определение тригонометрических функций аргументов  $(n-1)\gamma_1$ ,  $(n+1)\gamma_1$ ,  $(n-1)\gamma_k$ ,  $(n+1)\gamma_k$  для каждой гармоники. Составление расчетных кривых по этим формулам затруднено тем, что если строить их для непрерывных значений одного из аргументов, например  $\gamma_1$ , то значения другого аргумента  $\gamma_k$  придется взять в качестве параметра дискретными, соответствующими лишь каким-то избранному его значениям. Такие кривые были бы непригодны для промежуточных значений  $\gamma_k$ , которые, конечно, могут быть совершенно произвольными.

Можно, однако, как сейчас будет показано, так преобразовать формулы (6) и (7), чтобы один из аргументов перестал зависеть от порядка гармоники  $n$ . Тогда остается лишь однажды подсчитать зависимость уравнивающего мешающего напряжения от другого аргумента и получить универсальные расчетные кривые, пригодные для всех случаев.

С этой целью заменим разности тригономет-

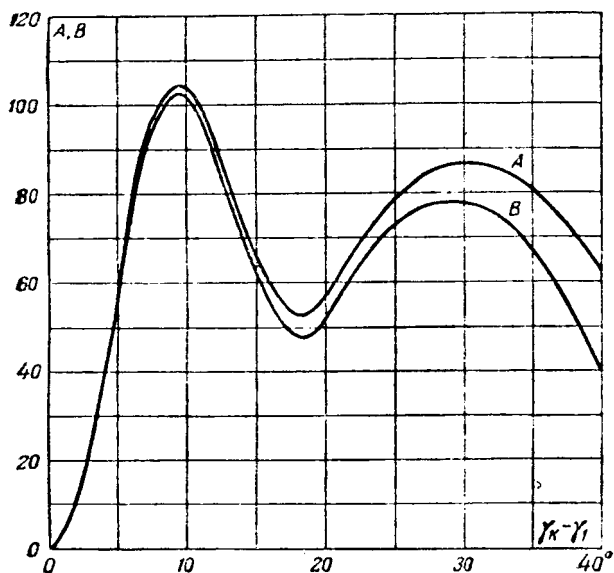


Рис. 3.

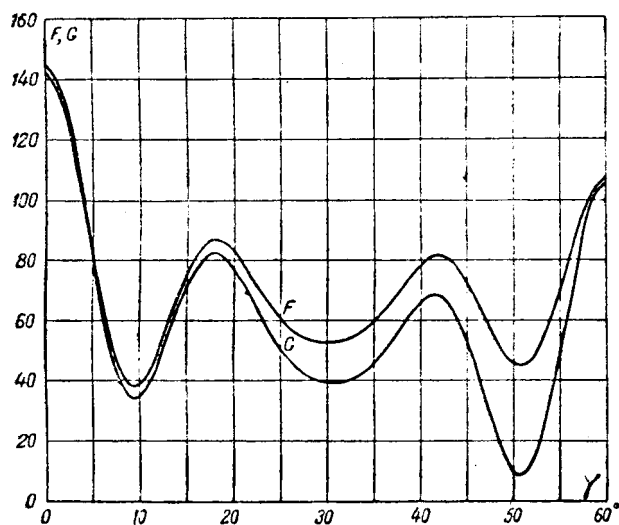


Рис. 4.

рических величин в формулах (6) и (7) по соответствующим формулам произведения. Тогда

$$\Delta U_v' = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{a0} \left\{ \frac{1}{n-1} \cos(n-1) \frac{\gamma_k + \gamma_1}{2} \times \right. \\ \left. \times \sin(n-1) \frac{\gamma_k - \gamma_1}{2} - \frac{1}{n+1} \cos(n+1) \frac{\gamma_k + \gamma_1}{2} \times \right. \\ \left. \times \sin(n+1) \frac{\gamma_k - \gamma_1}{2} \right\} \quad (6')$$

и

$$\Delta U_v'' = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{a0} \left\{ \frac{1}{n-1} \sin(n-1) \cdot \frac{\gamma_k + \gamma_1}{2} \times \right. \\ \left. \times \sin(n-1) \frac{\gamma_k - \gamma_1}{2} - \frac{1}{n+1} \sin(n+1) \frac{\gamma_k + \gamma_1}{2} \times \right. \\ \left. \times \sin(n+1) \frac{\gamma_k - \gamma_1}{2} \right\}. \quad (7')$$

Возводим эти величины в квадрат и суммируем их. Определяем  $\Delta U_v^2$  и подставляем в (2).

Получаем для процентного отношения мешающего напряжения к выпрямленному напряжению  $U_{a0}$  простую формулу

$$\left( \frac{\Delta U_{\text{эп}}}{U_{a0}} \cdot 100 \right)^2 = A - B \cdot \cos(\gamma_k + \gamma_1), \quad (8)$$

где величины

$$A = \sum p_v^2 \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{100 \cdot \sin(n-1) \frac{\gamma_k - \gamma_1}{2}}{n-1} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( \frac{100 \cdot \sin(n+1) \frac{\gamma_k - \gamma_1}{2}}{n+1} \right)^2 \right\},$$

$$B = \sum p_v^2 \frac{100 \cdot \sin(n-1) \frac{\gamma_k - \gamma_1}{2}}{n-1} \cdot \frac{100 \cdot \sin(n+1) \frac{\gamma_k - \gamma_1}{2}}{n+1}$$

подсчитанные для четырех основных гармоник ( $n=6, 12, 18$ , и  $24$ ), представлены в виде расчетных кривых на рис. 3.

**Мешающее напряжение управляемых выпрямителей.** Приведенный выше метод переход от двух аргументов, связанных с порядком высших гармонических, к одному и изображению функций от этого аргумента универсальными расчетными кривыми с успехом может быть применен к другой практически важной задаче — определению мешающего напряжения управляемых выпрямителей.

Как известно, форма выпрямленного напряжения определяется двумя факторами — углом перекрытия  $\gamma$  и углом сеточного регулирования  $\alpha$ . Написав аналитическое выражение этой кривой и сделав преобразования, аналогичные приведенным выше, получаем следующее выражение для отдельных гармоник порядка  $n$ :

$$U_v^2 = \frac{U_{a0}^2}{2} \left\{ \left( \frac{\cos(n-1) \frac{\gamma}{2}}{n-1} \right)^2 + \left( \frac{\cos(n+1) \frac{\gamma}{2}}{n+1} \right)^2 + \right. \\ \left. + 2 \frac{\cos(n-1) \frac{\gamma}{2}}{n-1} \cdot \frac{\cos(n+1) \frac{\gamma}{2}}{n+1} \cos(2\alpha + \gamma) \right\}. \quad (9)$$

Мешающее напряжение в соответствии с формулой

$$U_{\text{эп}} = \sqrt{\sum (U_v \cdot p_v)^2} \text{ получает выражение}$$

$$\left( \frac{U_{\text{эп}}}{U_{a0}} \cdot 100 \right)^2 = F - G \cdot \cos(2\alpha + \gamma), \quad (10)$$

где (рис. 4)

$$F = \sum p_v^2 \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{100 \cdot \cos(n-1) \frac{\gamma}{2}}{n-1} \right)^2 + \right. \\ \left. + \left( \frac{100 \cdot \cos(n+1) \frac{\gamma}{2}}{n+1} \right)^2 \right\},$$

$$G = \sum p_v^2 \frac{100 \cdot \cos(n-1) \frac{\gamma}{2}}{n-1} \cdot \frac{100 \cdot \cos(n+1) \frac{\gamma}{2}}{n+1}.$$

# Регулятор напряжения с подвижным сердечником

Кандидат техн. наук Б. В. БЕЛЯЕВ

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

В настоящее время для плавной и бесконтактной регулировки напряжения под нагрузкой применяются, главным образом, индукционные регуляторы, а также трансформаторы и регуляторы с подвижными сердечниками и обмотками. Дроссельная и реостатная регулировки, как имеющие значительные неудобства, употребляются реже и только для малых мощностей. Из перечисленных типов регуляторов индукционные регуляторы и трансформаторы с подвижным сердечником довольно сложны в изготовлении и имеют ряд конструктивных неудобств (наличие гибких токоведущих соединений и др.). Регуляторы с подвижной короткозамкнутой катушкой имеют относительно большой намагничивающий ток и повышенный расход железа и меди. Описываемый ниже регулятор напряжения проще в изготовлении, чем индукционный регулятор или трансформатор с подвижным сердечником, и не требует токоведущих соединений. По сравнению с регулятором с подвижной короткозамкнутой обмоткой он имеет примерно на 30% меньший расход меди и железа, меньшие размеры и вес и лучшие электрические свойства: меньший намагничивающий ток, большие  $\cos \varphi$  и к. п. д., меньший первичный ток.

Регулятор может быть выполнен в виде двух модификаций: с линейным или с угловым перемещением сердечника.

Принципиально регулятор состоит из неподвижного магнитопровода А и подвижного В (рис. 1). На неподвижном магнитопроводе смонтированы две одинаковые катушки  $B_1$  и  $B_2$ , а в подвижном магнитопроводе находится часть Г из немагнитного материала. Катушки  $B_1$  и  $B_2$  включены последовательно и в магнитном отношении — встречно, к ним различно, в зависимости от нужных пределов регулирования<sup>1</sup>, могут быть присоединены по одной добавочной катушке. Связь основных и добавочных катушек может быть индуктивная или также и электрическая (автотрансформаторная).

Передвижение подвижного магнитопровода с немагнитной частью Г перераспределяет магнитные потоки катушек  $B_1$  и  $B_2$ . При приближении части Г, например к  $B_1$ , поток ее будет уменьшаться, а катушки  $B_2$  увеличиваться в соответствии с изменением их результирующих магнитных сопротивлений и, следовательно, перераспределятся и напряжения на катушках.

Работа описываемого регулятора аналогична работе регулятора с подвижной короткозамкнутой катушкой, с тем различием, что перераспределение магнитных потоков вызывается пе-

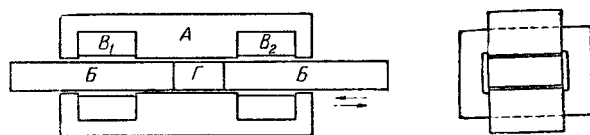


Рис. 1.

А — неподвижный магнитопровод; В — подвижный магнитопровод;  $B_1$  и  $B_2$  — катушки, включенные последовательно одна с другой с противоположным направлением намотки; Г — немагнитная часть сердечника.

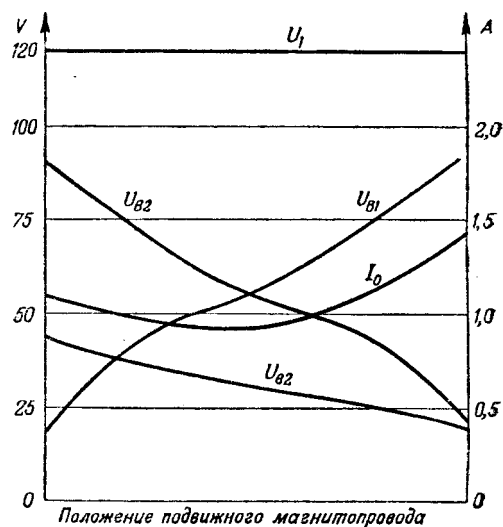


Рис. 2. Зависимость первичного тока и напряжений на обмотках от положения подвижного магнитопровода при холостом ходе.

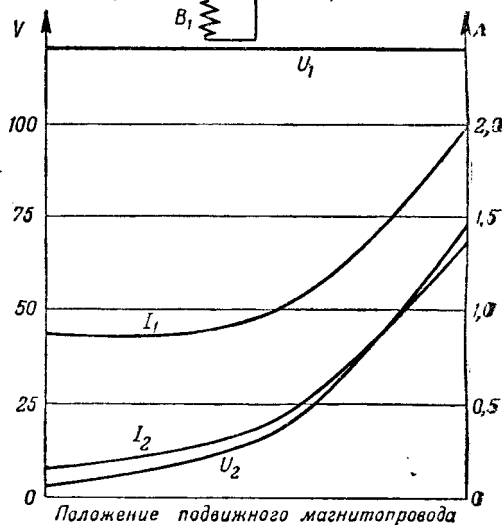
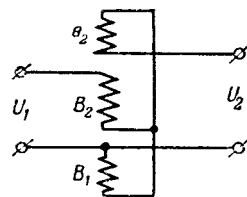


Рис. 3. Зависимость первичного тока  $I_1$  и напряжения и тока нагрузки ( $U_2$  и  $I_2$ ) от положения подвижного магнитопровода при неизменном сопротивлении нагрузки.

<sup>1</sup> А. М. Бамдас, В. В. Беляев. Трансформаторы системы Норриса для плавного регулирования напряжения. Успехи рентгенотехники, № 1, 1938.

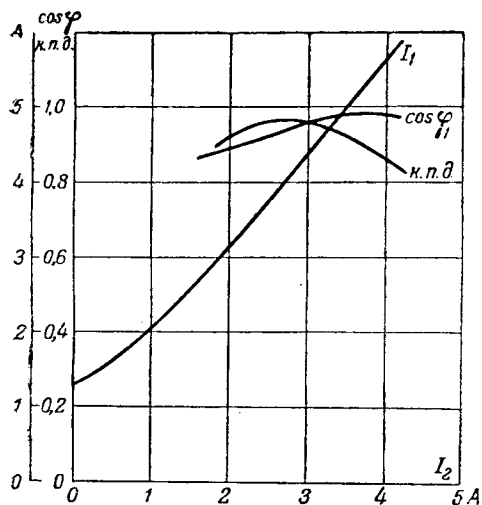


Рис. 4. Зависимость первичного тока  $I_1$ , к. п. д. и  $\cos \varphi_1$  от величины тока нагрузки (активной).

ремещением части  $\Gamma$ , а не короткозамкнутой катушки, которая здесь не нужна. Это дает значительное уменьшение меди, железа и лучшие электрические свойства.

Ниже приведены результаты эксперименталь-

ного исследования опытного образца регулятора на 0,5 kVA.

Оценивая результаты исследования, необходимо учитывать, что данный регулятор выполнен из случайного, имевшегося под руками материала, и это обстоятельство продиктовало ряд особенностей, ухудшающих свойства регулятора.

На рис. 2 показана зависимость тока холостого хода и напряжений на катушках  $B_1$  и  $B_2$  ( $I_0$ ,  $U_{B1}$  и  $U_{B2}$ ) от положения подвижного магнитопровода. Кривая  $U_{B2}$  — напряжение вспомогательной катушки, расположенной вместе с  $B_1$  и имеющей вдвое меньшее число витков.

На рис. 3 показано изменение тока и напряжения нагрузки  $I_2$ ,  $U_2$  и первичного тока  $I_1$  в зависимости от положения подвижного магнитопровода. На том же рисунке показана схема соединений. Активное сопротивление нагрузки — неизменное.

На рис. 4 показаны изменения первичного тока,  $\cos \varphi_1$  и к. п. д. в функции тока нагрузки. Форма кривой вторичного напряжения остается синусоидальной.

Приведенный экспериментальный материал показывает относительно хорошие электрические свойства описываемого регулятора.



## Учет нелинейности реакции якоря при построении характеристик машин постоянного тока

Кандидат техн. наук А. С. ДИМИТРАДЗЕ

Москва

В современных машинах постоянного тока щетки, как правило, устанавливаются в нейтральной зоне и потому продольная реакция якоря отсутствует. Размагничивающее действие реакции якоря на магнитное поле главных полюсов обуславливает поперечную реакцию. Только при больших насыщениях ярма индуктора и спинки якоря появляется еще размагничивающее действие магнитного поля дополнительных полюсов, накладывающегося на главное магнитное поле. Обе эти составляющие зависят не только от тока якоря, но и от степени насыщения магнитной цепи главных полюсов. Поэтому предположение о прямой пропорциональности между током якоря и размагничивающим действием этого тока на главное магнитное поле крайне мало соответствует действительности.

В большинстве современных работ по машинам постоянного тока построение характеристики рекомендуется производить при помощи так называемого характеристического треугольника. Один катет этого треугольника равняется, как известно, омическому падению напряжения в цепи якоря, а другой — размагничивающему действию тока якоря на магнитное поле главных полю-

сов. Стороны характеристического треугольника предполагаются прямо пропорциональными току якоря. Метод характеристического треугольника получил заслуженное распространение в те времена, когда машины постоянного тока строились без дополнительных полюсов, щетки для улучшения коммутации сдвигались с нейтральной зоны, и потому продольная реакция якоря превалировала над всеми другими составляющими размагничивающего действия тока якоря на магнитное поле главных полюсов. Применение этого метода к современным машинам, не имеющим серийных обмоток, дает крайне приближенные результаты. Только в машинах с серийными обмотками на главных полюсах метод характеристического треугольника может быть применен при условии, что размагничивающим действием тока якоря можно пренебречь по сравнению с влиянием компаундной или противокомпаундной обмотки. Однако, и в этом случае правильное применение метода характеристического треугольника в сочетании с изложенной ниже методикой учета нелинейности размагничивающего действия тока якоря.

Построение всех характеристик машины по-

стоянного тока наиболее удобно вести, исходя из внутренних нагрузочных характеристик, дающих зависимость э. д. с. машины от тока возбуждения  $I_f$  или намагничивающей силы (нс) главных полюсов при постоянном токе якоря. Серия таких внутренних характеристик дана ниже, в правой части рис. 3. Она получается из кривой намагничивания машины (кривая  $I=0$  на рис. 3) и кривых размагничивающего действия основного тока якоря, построенных по одному из общеизвестных способов [Л. 1—4]. Кривые рис. 3 будут являться исходными для построения в дальнейшем всех характеристик.

Помимо размагничивающего действия основного тока якоря в современных предельно использованных машинах приходится считаться еще с размагничивающим действием добавочных токов коммутации.

При определенных перегрузках наступает ухудшение коммутации. При этом в короткозамкнутых щетками секциях обмотки якоря появляются значительные добавочные токи. Подобные токи ослабляют главное магнитное поле машины [Л. 1,5—6] при работе ее в качестве генератора. Хотя эта реакция якоря и является продольной, мы будем называть ее коммутационной реакцией для того, чтобы подчеркнуть ее отличие от продольной реакции якоря, вызываемой сдвигом щеток. Кривые размагничивающего действия коммутационной реакции якоря, полученные экспериментально, приведены на рис. 1 в зависимости от произведения  $I \cdot n$  — тока якоря  $I$  на число оборотов  $n$ , характеризующего коммутационные процессы. Из кривых рис. 1 можно видеть, что уже при  $I_n$ , равном 120—160% от номинального, в предельно использованных машинах коммутационная реакция якоря начинает заметно сказываться. Из кривых рис. 1 в дальнейших расчетах использована кривая, соответствующая машине 1, и одновременно предположено, что эта кривая не зависит от насыщения магнитной цепи главных полюсов.

Без учета размагничивающего действия тока якоря характеристический треугольник вырождается в прямую линию, изображенную на рис. 2А. От этого треугольника в данном случае остается только один катет  $I_f$ , соответствующий омическому падению напряжения в цепи тока якоря. Длина этого катета пропорциональна току якоря —  $I$ .

Размагничивающее действие коммутационных токов, начиная с нагрузок, при которых они становятся заметными, вновь вводит второй катет  $\Delta W_{pk}$ , однако характеристического треугольника при этом не получается. Катет  $\Delta W_{pk}$  размагничивающего действия токов коммутации связан с током якоря нелинейно, как это мы видели из кривых рис. 1. При постоянной скорости вращения машины произведение  $I \cdot n$  прямо пропорционально току  $I$ , и в этом случае кривые  $\Delta W_{pk}$ , данные на рис. 1, могут быть непосредственно перенесены на рис. 2, Б, причем ось

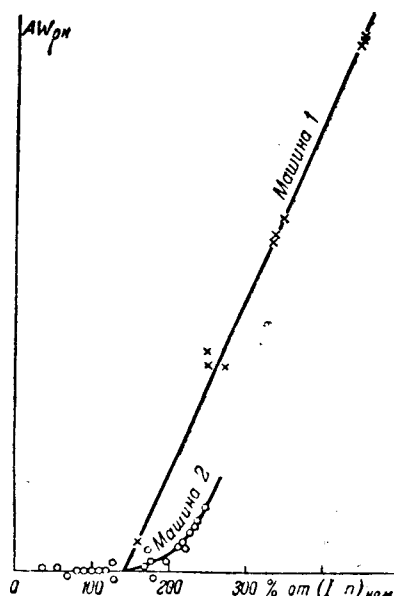


Рис. 1. Характер размагничивающего действия коммутационных токов на главное магнитное поле.

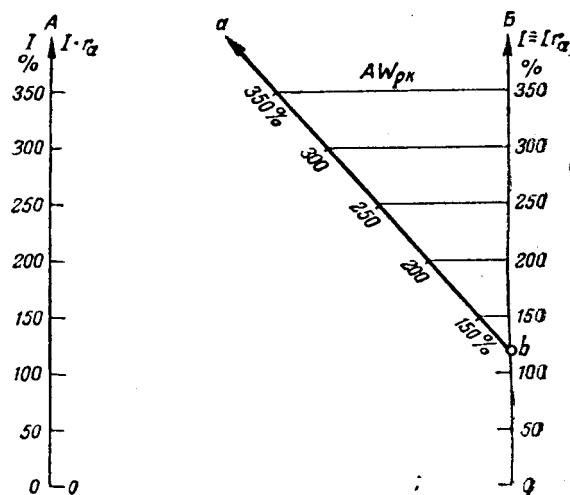


Рис. 2. Искажение характеристического треугольника при положении щеток в нейтральной зоне и при учете поперечной реакции якоря с помощью внутренних нагрузочных характеристик.

А — без учета коммутационных токов; Б — с учетом нелинейности размагничивающего действия  $\Delta W_{pk}$  токов коммутации.

абсцисс рис. 1 должна быть совмещена с катетом  $I_f$ , пропорциональным току  $I$ .

С учетом размагничивающего действия коммутационных токов вместо характеристического треугольника получается уже более сложная фигура.

Методика учета нелинейного размагничивающего действия основного и коммутационного токов излагается на примере шунтового генератора.

Рассмотрим построение характеристик шунтового генератора при постоянной скорости вращения, приведенное на рис. 3. В правой части рисунка построены внутренние нагрузочные характеристики для тока в 100, 150, 200, 240, 300 и 350% номинального, о которых уже говорилось выше. На этой же части рисунка проведе-

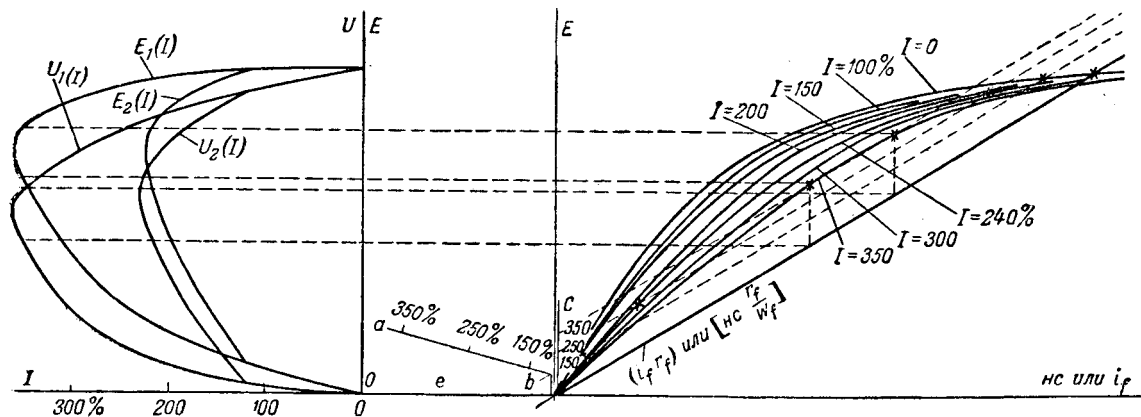


Рис. 3. Построение внешней характеристики шунтового генератора с учетом нелинейности размагничивающего действия как основного тока якоря, так и токов коммутации,  $U_1(I)$  и  $E_1(I)$  — без учета,  $U_2(I)$  и  $E_2(I)$  — с учетом токов коммутации.

на прямая  $od$ , изображающая напряжение на зажимах шунтовой обмотки, равное  $i_f \cdot r_f$  или  $\left[ \text{нс} \left| \frac{r_f}{w_f} \right| \right]$ , где  $r_f$  — омическое сопротивление,  $w_f$  — число витков обмотки шунта. В левый нижний угол этой части рисунка перенесено построение, данное на рис. 2, Б. Ось  $Ir_a$ , изображенная на рис. 3 отрезком  $oc$ , направлена по оси ординат. Масштаб должен совпадать с масштабом э.д.с.  $E$  оси ординат. Масштаб  $AW_{pk}$  должен соответствовать масштабу  $нс$ .

При отсутствии коммутационной реакции якоря внутренние нагрузочные характеристики в косоугольной системе координат  $cod$  дают внешнюю характеристику шунтового генератора  $U(I)$ . Эта же характеристика перестроена в левой части рис. 3 в прямоугольной системе координат. Те же внутренние характеристики в косоугольной системе координат  $eod$  представляют кривую  $E(I)$ . В обоих случаях для каждого значения тока при получении кривых  $U(I)$  и  $E(I)$  необходимо брать точки той внутренней нагрузочной характеристики, которая соответствует этому значению тока  $I$ . Преимуществом перестройки характеристик методом изменения системы координат (предложенного еще в 1923 г. Оллендорфом [Л. 7]), является то, что непосредственно без перестройки внутренние нагрузочные характеристики дают  $U(I)$  и  $E(I)$ , хотя и в косоугольной системе координат. Это очень удобно всегда и особенно тогда, когда необходимо подбирать у машины нужную форму внешней характеристики.

Наличие коммутационной реакции искривляет ось тока  $oc$ . Вместо прямой  $oc$  эта ось стано-

вится ломаной  $oba$ . В результате для получения кривой  $U(I)$  необходимо внутреннюю нагрузочную характеристику рассматривать в криволинейных координатах  $abod$ . В остальном построение остается таким же, как и при отсутствии коммутационной реакции якоря.

Сказанного выше достаточно для уяснения предлагаемого нами использования внутренних нагрузочных характеристик в сочетании с методом Оллендорфа для получения внешних характеристик генератора с учетом нелинейности размагничивающего действия как основного тока, так и добавочного тока коммутации. Этот же принцип может быть использован для построения регулировочных и всех других характеристик не только при шунтовом, но и при компаундном, противокомпаундном и серийном возбуждении, а также для работы машины в режиме электродвигателя.

#### Литература

1. В. Т. Касьянов. Реакция якоря машин постоянного тока. ВЭП, № 2, 1940.
2. Г. Н. Петров. Расчет размагничивающего действия поперечной реакции якоря машин постоянного тока. ВЭП, № 10, 1944.
3. Т. Г. Сорокер и Л. М. Петрова. Определение размагничивающего влияния реакции якоря в машинах постоянного тока. ВЭП, № 3, 1944.
4. Wienhard. Eine analytische Darstellung der Magnetisierungskennlinie und ihre Verwendung zur Bestimmung der Ankerrückwirkung, Е. и М., № 27/28, 1940.
5. Э. Арнольд и И. Л. Ля-Кур. Машины постоянного тока, т. 1. Гостехиздат, стр. 251—253, 1931.
6. Р. Рихтер. Электрические машины, т. 1. Гостехиздат, стр. 460 и 491, 1935.
7. F. Ollendorff. Beitrag zur Geometrie der Gleichstrommaschine. ETZ, № 19, 1923.

# Регулировочные характеристики шунтового двигателя постоянного тока

Кандидат техн. наук Л. И. ПОЛТАВА

Кривой Рог

В аналогичной работе Н. В. Горохова (Электричество, № 9, 1947) дано теоретическое исследование регулировочных характеристик шунтового двигателя для трех режимов регулирования:  $M = \text{const}$ ,  $P = \text{const}$  и  $n = \text{const}$ . В интересах более полного рассмотрения и обобщения рассматриваемого вопроса целесообразно исследовать и другие случаи регулирования. Шунтовые двигатели часто применяются для механизмов, у которых статический момент является некоторой функцией скорости. К таким механизмам относятся: вентиляторы, эксгаустеры, центробежные насосы и др. Для этих механизмов, как известно, статический момент равен:

$$M = M_0 + cn^2.$$

Ниже рассматривается влияние изменения магнитного потока шунтового двигателя именно для этого класса нагрузочных диаграмм. В целях удобства сопоставления исследование произведено в относительных единицах и приняты те же обозначения и допущения, что и у Н. В. Горохова.

Изменение магнитного потока  $\Phi$  при  $M = cn^2$ . Полагая известными номинальные величины  $U_n$ ,  $I_n$ ,  $M_n$ ,  $n_n$  и пренебрегая  $M_0$  по малости при больших скоростях по сравнению с членом  $cn^2$ , момент двигателя можно выразить:

$$M = M_n \left( \frac{n}{n_n} \right)^2,$$

а скорость

$$n = \frac{U_n - I_n \cdot r}{c_E \cdot \Phi_n}.$$

Рассмотрим случай, когда перед регулированием потока момент двигателя

$$M = M_n = c_m \cdot \Phi_n I_n.$$

При изменении потока с  $\Phi_n$  до  $\Phi_1 = \alpha \Phi_n$  ток изменится с  $I_n$  до  $I_1 = j I_n$ . Тогда

$$n_1 = \frac{U_n - I_1 r}{c_E \Phi_1} = \frac{U_n - j I_n r}{c_E \alpha \Phi_n}$$

и

$$M_1 = c_m \Phi_1 I_1 = \alpha j M_n.$$

Так как пограничная скорость

$$n_0 = \frac{U_n}{c_E \Phi_n},$$

а относительное падение напряжения

$$\epsilon = \frac{I_n r}{U_n},$$

то после подстановки  $\epsilon$  и  $n_0$  получим:

$$n_1 = n_0 \frac{1 - j\epsilon}{\alpha}.$$

Из основной формулы для момента, введя относительную скорость  $v = \frac{n}{n_0}$ , имеем:

$$\alpha j = \left( \frac{n_1}{n_0} \right)^2 = \frac{v^2}{(1 - \epsilon j)^2}.$$

Подставляя выражение для  $n_1$  и обозначая  $\epsilon' = \frac{\epsilon}{(1 - \epsilon)^2}$ , получим:

$$v^2 + \frac{\alpha^2}{\epsilon'} v - \frac{\alpha}{\epsilon'} = 0.$$

Решая это квадратное уравнение, найдем закон изменения относительной скорости в функции  $\alpha$ :

$$v = \alpha^2 \left( \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \frac{\epsilon'}{\alpha^3}}}{2 \epsilon'} \right).$$

Физический смысл перед радикалом имеет знак плюс. В отличие от других случаев регулирования при  $\alpha \rightarrow 0$ ,  $v$  стремится к 0, а не к  $\infty$ .

Функция  $v$  имеет максимум при

$$\alpha_{\max} = \sqrt[3]{\frac{\epsilon'}{2}},$$

и для максимальной скорости получается простое выражение

$$v_{\max} = \frac{1}{2 \sqrt[3]{\frac{\epsilon'}{2}}}.$$

Например, для принятых Н. В. Гороховым значений  $\epsilon$ :

$\epsilon$	0,2	0,1	0,05	0,01
$\alpha_{\max}$	0,5	0,395	0,303	0,172
$v_{\max}$	0,92	1,26	1,65	2,9

На рис. 1 построены кривые  $v = f(\alpha)$  и  $j = f(\alpha)$  для различных  $\epsilon$ .

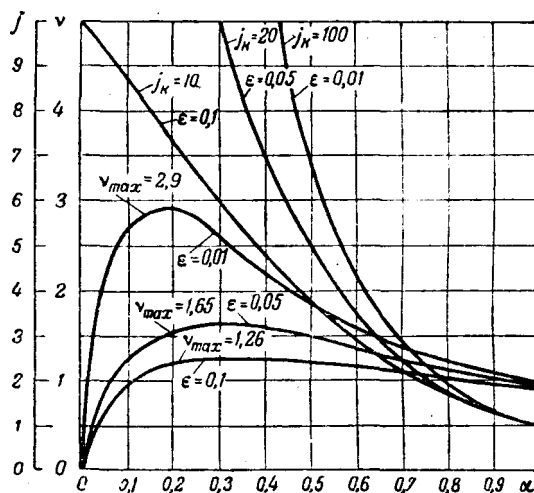


Рис. 1. Регулировочные характеристики при вентиляторном моменте нагрузки.



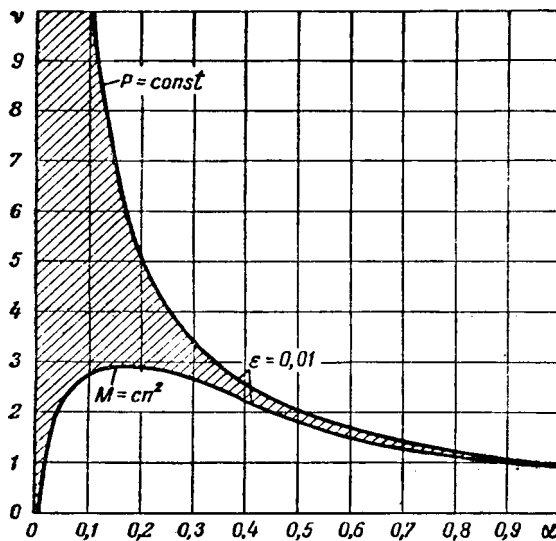


Рис. 2. Регулировочные характеристики при различном моменте нагрузки.

Из рис. 1 видно, что изменение возбуждения в весьма широких пределах очень слабо влияет на изменение скорости, а при  $\epsilon = 0,5$  ослабление поля ведет к снижению скорости. Только у крупных машин с  $\epsilon = 0,01$  возможно повышение скорости до трехкратной при ослаблении поля почти в шесть раз. При этом резко возрастает ток, который в относительных единицах равен:

$$j = \frac{v^2}{\alpha(1-\epsilon)^2}; \quad v = \frac{\alpha}{\alpha^2 + \epsilon'};$$

при  $\alpha = 0$ , раскрывая неопределенность, получим, что

$$j \approx j_k = \frac{1}{\epsilon}.$$

Таким образом, можно сделать вывод, который не отмечался в литературе, что при вентиляционном моменте нагрузки для малых и средних шунтовых двигателей любое ослабление поля в отношении чрезмерного повышения скорости не опасно.

### К автореферату Л. И. Полтавы Доктор техн. наук, проф. Н. В. ГОРОХОВ

В моем автореферате были рассмотрены частные случаи регулировочных характеристик шунтового двигателя постоянного тока. Можно дать более обобщенный вывод, включающий частные случаи, разобранные как в моем автореферате, так и в замечке Л. И. Полтавы.

С этой целью напишем известное уравнение:

$$M = M_0 + (M_n - M_0) \cdot \left(\frac{n}{n_n}\right)^{k-1}.$$

Пренебрегая величиной момента трения  $M_0$ , получим:

$$M = M_n \left(\frac{n}{n_n}\right)^{k-1}$$

или, так как

$$\frac{n}{n_n} = \frac{v}{1-\epsilon},$$

окончательно

$$M = M_n \left(\frac{v}{1-\epsilon}\right)^{k-1}.$$

С другой стороны, выражение для вращающего момента может быть написано в виде:

$$M = \alpha j M_n; \quad (2)$$

отсюда следует выражение для тока

Если двигатель при  $\Phi_n$  недогружен и его момент равен  $M = k M_n$  (при  $k < 1$ ), то относительный максимум скорости будет:

$$v_{\max} = \frac{1}{2\sqrt{0,5k\epsilon'}}.$$

Отсюда видно, что недогрузка двигателя равносильна уменьшению относительного падения напряжения, что повышает несколько пределы регулировки.

Изменение магнитного потока  $\Phi$  при  $M = cn^2$ . Рассмотрим еще случай регулирования, когда момент нагрузки пропорционален скорости:

$$M = M_n \frac{n}{n_n}.$$

При изменении потока с  $\Phi_n$  до  $\Phi_1 = \alpha \Phi_n$  ток изменяется с  $I_n$  до  $I_1 = j I_n$ , а скорость с  $n_n$  до  $n_1$ . Аналогично предыдущему получаем выражения для тока и скорости в относительных единицах в функции  $\alpha$ :

$$j = \frac{v}{\alpha(1-\epsilon)};$$

при  $\alpha = 1 \dots v_n = 1 - \epsilon_n$ , а при  $\alpha = 0 \dots v = 0$ . Функция

$v = f(\alpha)$  имеет при  $\alpha_{\max} = \sqrt{\epsilon'}$  максимум:  $v_{\max} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon'}}$ .

При различных  $\epsilon$ :

$\epsilon$	0,2	0,1	0,05	0,01
$\alpha_{\max}$	0,5	0,33	0,23	0,1
$v_{\max}$	1	1,5	2,18	5

Как видно, изменение потока несколько больше влияет на изменение скорости, чем в первом случае (случай квадратического момента), но все же значительно меньше, чем  $M = \text{const}$ .

Обобщая полученные результаты с результатами Н. В. Горохова, можно сделать вывод, что регулировочные характеристики при  $P = \text{const}$  и  $M = cn^2$  являются пограничными, как это изображено на рис. 2. Все остальные практически имеющиеся место случаи регулирования лежат между ними (заштрихованная область). В начальной стадии регулирования вид нагрузки на регулировочные характеристики практически не влияет.

$$j = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{v}{1-\epsilon} \right)^{k-1}. \quad (3)$$

Выражение для скорости в общем случае имеет вид:

$$v = \frac{1-j\epsilon}{\alpha}$$

или, после подстановки (3):

$$v = \left[ 1 - \frac{\epsilon}{\alpha} \left( \frac{v}{1-\epsilon} \right)^{k-1} \right];$$

отсюда

$$\epsilon' v^{k-1} + \alpha^2 v - \alpha = 0, \quad (4)$$

где

$$\epsilon' = \frac{\epsilon}{(1-\epsilon)^{k-1}}. \quad (5)$$

Уравнения (1), (2), (3), (4) и (5) дают общие решения для статических характеристик привода с шунтовой машиной, причем различным значениям  $k$  соответствуют следующие режимы:

$$k = 0 \dots P_g = \text{const};$$

$$k = 1 \dots M_g = \text{const};$$

$$k = 2 \dots M_g = cn;$$

$$k = 3 \dots M_g = cn^2.$$

# Мультиплицированные измерительные схемы

Кандидат техн. наук, доц. Ф. Е. ТЕМНИКОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В связи с работами в области динамической компенсации [Л. 1] автором найдены возможности множественного совокупного применения элементарных мостовых и потенциометрических измерительных схем. Такие сочетания элементарных измерительных схем названы мультиплицированными измерительными схемами.

Наибольший интерес представляют следующие сочетания: мультиплицированный параллельный мост (рис. 1); мультиплицированный последовательно-параллельный мост; мультиплицированный параллельный потенциометр; мультиплицированный последовательный потенциометр (рис. 2); мультиплицированный последовательно-параллельный потенциометр и т. д.

Перечисленные разновидности мультиплицированных схем работают по методу динамической компенсации. Для этого применены: нереверсивный привод  $\Pi$ , общий для каждой мультиплицированной схемы, уравнивающий реохорд  $K$  и некоторое исполнительное устройство (индикатор, регистратор, регулятор и т. д.)  $P$ , причем ротор привода, подвижный контакт, реохорд и рабочий элемент исполнительного устройства связаны общим валом  $\Pi$ - $K$ - $P$  и, следовательно, двигаются синфазно. Измерительные элементы представлены реостатными датчиками  $M_1 \dots M_n \dots M_k$ , подвижные контакты которых перемещаются подвижными органами первичных измерительных приборов. Состояние электрического равновесия (компенсации) каждой элементарной мостовой или потенциометрической схемы определяется индивидуальными триггерными или фазочувствительными электронными нуль-индикаторами  $H_1 \dots H_n$  и  $H_1 \dots H_k$ , имеющими достаточно большие входные сопротивления. Текущие значения измеряемых величин отмечаются импульсами  $i_1 \dots i_n$  и  $i_1 \dots i_k$  в масштабе угла поворота вала  $\Pi$ - $K$ - $P$  или времени. Эти импульсы образуются нуль-индикаторами  $H$  и направляются к исполнительному устройству  $P$  по общему (с применением трансформатора с многими первичными обмотками) или по индивидуальным каналам. Посылки импульсов  $i$  повторяются при каждом обороте вала  $\Pi$ - $K$ - $P$ .

В телемеханических системах исполнительное устройство  $P$  снабжается отдельным приводом, вращающимся синхронно и синфазно с приводом  $\Pi$ , и относится на расстояние. В этом случае импульсы передаются по проволочной линии связи или по радиоканалу. Практические разновидности мультиплицированных схем гораздо более многочисленны. Эти разновидности получаются при замене реостатных датчиков датчи-

ками других типов или при замене реохорда уравнивающими устройствами, основанными на других принципах. Автором разработана, например, схема последовательно-параллельного потенциометра с источниками измеряемых э. д. с. в виде генераторных датчиков и с источниками уравнивающей э. д. с. пилообразной формы в виде электронного (релаксационного) генератора. Эта схема показана на рис. 3.

Измерительные элементы  $M_1 \dots M_n$  и  $M_1 \dots M_k$  здесь создаются э. д. с., значения которых пропорциональны текущим значениям измеряемых величин и могут изменяться в одинаковых пределах от  $e=0$  до  $e=e_{\max}$ . Элементы последова-

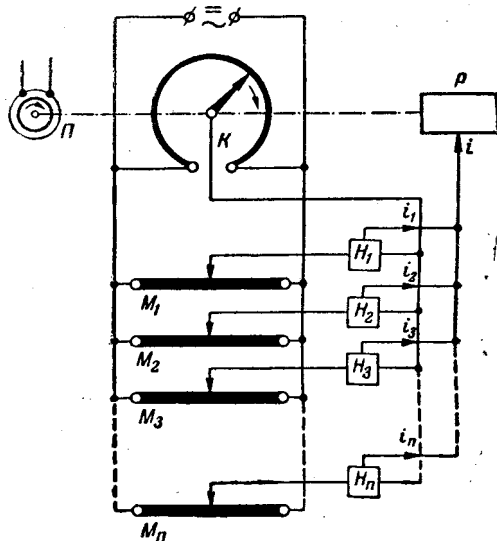


Рис. 1. Схема мультиплицированного параллельного моста.

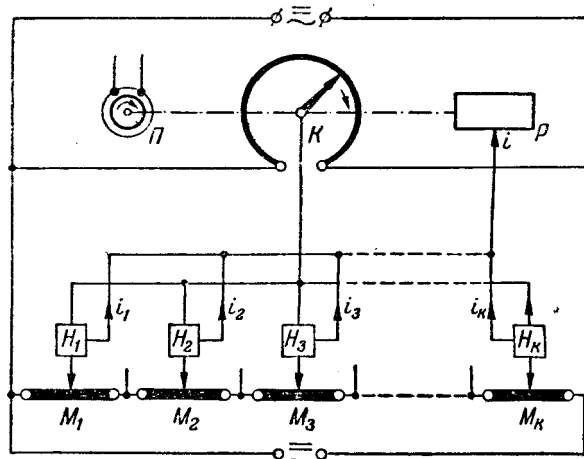


Рис. 2. Схема мультиплицированного последовательного потенциометра.

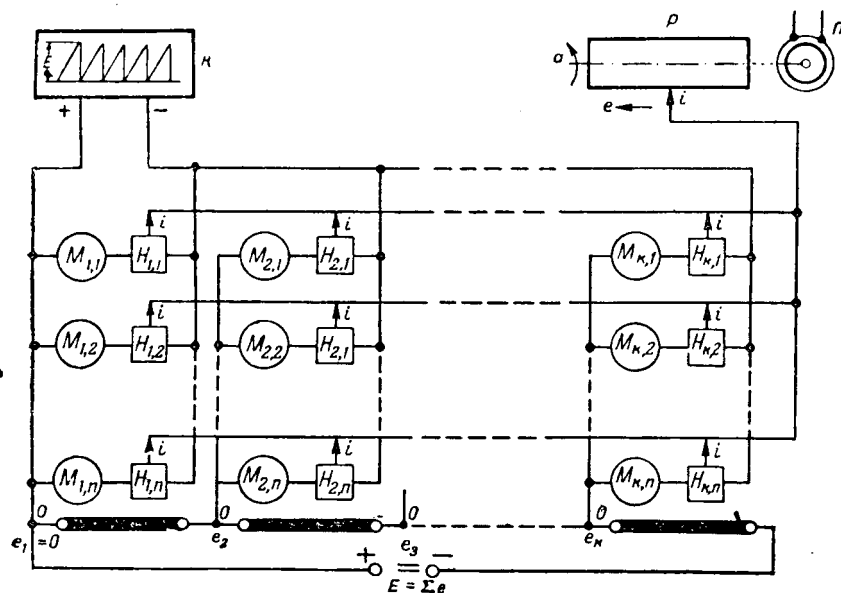


Рис. 3. Схема мультиплицированного последовательно-параллельного потенциометра с релаксационным уравнивающим генератором и с измерительными элементами генераторного типа.

тельных цепочек разделены постоянными смещениями  $e_2 = e$ ,  $e_3 = 2e$  и т. д. до  $e_k = (k-1)e$ , которые подаются от общего делителя напряжения  $E$ . Таким образом, измерительные элементы последовательных цепочек работают в различных, но в равнозначных, потенциальных зонах. Нули последовательных шкал искусственно подняты на потенциальные ступени равной высоты.

В качестве источника уравнивающей э. д. с. здесь применен релаксационный генератор  $K$ . Уравнивающая э. д. с. в течение каждого периода изменяется по линейному закону и последовательно уравнивает измеряемые э. д. с. в различных потенциальных зонах. Соответственно этому максимальное значение уравнивающей э. д. с. должно быть равно сумме имеющихся потенциальных зон —  $E$ .

Исполнительное устройство  $P$  может быть выполнено в форме барабана с фотобумагой, вращаемого синхронно и синфазно с изменениями уравнивающей э. д. с. приводом  $\Pi$ , а им-

пульсы  $i$  могут воздействовать на отсчетчик в виде точечной аргоновой лампы, медленно перемещающейся параллельно оси барабана. Тогда измеряемые величины будут регистрироваться сериями точек, сливающимися с течением времени в ряд кривых.

Рассмотрим случай, когда  $n=3$  и  $k=4$ , т. е. в параллельных группах содержится по три измерительных элемента, а в последовательных группах — по четыре измерительных элемента (рис. 4). За каждый период изменения уравнивающей э. д. с.  $T$  происходит уравнивание всех измеряемых э. д. с. и нуль-индикаторами  $H$  образуется соответствующее число импульсов, которые создают кратковременные вспышки аргоновой лампы и оставляют отметки на фотобумаге. В то же время за каждый период изменения уравнивающей э. д. с. барабан регистрирующего устройства делает один полный оборот.

Таким образом, текущие значения уравнивающей э. д. с. в определенном масштабе отображаются углом поворота барабана  $\alpha$ . Так как в моменты равновесия элементарных потенциометрических схем измеряемые э. д. с. по величине равны мгновенным значениям уравнивающей э. д. с., то значения измеряемых э. д. с. также и в том же масштабе отображаются мгновенными углами поворота барабана  $\alpha$ , засеченными вспышками аргоновой лампы.

На рис. 4 слева показан график изменения уравнивающей э. д. с. за один период  $T$  от нуля до максимального значения  $E$ . Этот график по высоте разделен на четыре потенциальные зоны. В каждой потенциальной зоне показаны возможные значения трех измеряемых э. д. с. (с обратными знаками). На том же рисунке справа показана развертка снятой с барабана форматки фотобумаги с осями координат  $\alpha$  (по окружности барабана) и  $l$  (по длине барабана).

Горизонтальными пунктирными линиями эта форматка разделена на четыре полосы, из которых каждая соответствует определенной потенциальной зоне. Указанные разделительные линии, являющиеся смещенными линиями начала шкал, могут быть получены в процессе регистрации автоматически, если к имеющимся на

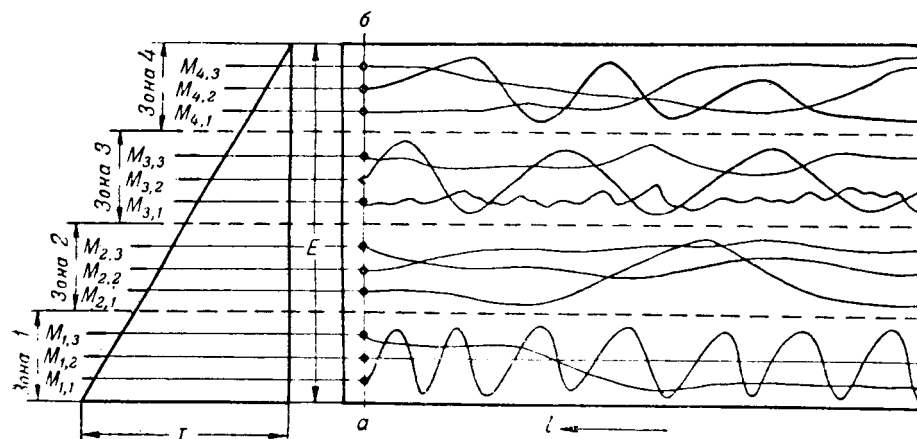


Рис. 4. Диаграмма динамической компенсации и образец записи для мультиплицированной измерительной схемы по рис. 3.

рис. 3 нуль-индикаторам добавить еще нуль-индикаторы, засекающие значения постоянных потенциалов в точках 0.

На рис. 4 по линии *а-б* зафиксированы крайние точки кривых изменения измеряемых э. д. с. Эта серия точек получается в течение одного периода *T* или за один полный оборот барабана.

Применение мультиплицированных измерительных схем открывает следующие новые возможности:

1. Практически синхронные (одновременные) измерения и регистрация многих параметров.

2. Устранение переключателей в системах многоточечного автоматического контроля, телеизмерения и радиотелеизмерения.

3. Дальнейшее увеличение скоростей измерения и регистрации компенсационным методом различных электрических и неэлектрических параметров.

4. Высокая «маневренность» в выборе способов регистрации многих параметров на одной или нескольких диаграммах.

5. Регистрация любого числа кривых на одной (одношкальной) диаграмме путем кодирования импульсов *l* по длительности и интенсивности.

6. Автоматизация некоторых математических операций с системой измеряемых параметров.

Практические решения, основные технические данные и предусматриваемые области применения импульсных быстродействующих регистрирующих приборов (импульсографов), разработанных автором, будут сообщены в отдельной статье. Здесь следует только указать, что приборы такого типа, в особенности в случае применения их совместно с мультиплицированными измерительными схемами, могут во многих случаях с успехом заменять катодные осциллографы с фотографическими камерами и многошлейфовые осциллографы.

#### Литература

1. Ф. Е. Темников. Метод динамической компенсации в автоматике и телемеханике. Электричество, № 3, 1948.



## Методы определения дополнительных моментов у индукционных счетчиков электрической энергии

*Кандидат техн. наук, доц. П. Н. ГОРЮНОВ и инж. С. М. ПИГИН*

*Ленинградский политехнический институт им. Калинина*

На диск индукционного счетчика, кроме основного вращающего момента *D* и основного тормозного момента *M*, создаваемого магнитом, воздействуют еще четыре дополнительных момента [Л. 1—2]. К ним относятся: компенсационный момент

$$D_{\kappa} = C_{\kappa} f^2 \Phi_u^2 \sin \psi_{\kappa},$$

тормозной момент, возникающий от пересечения диском переменного рабочего потока последовательных обмоток  $\Phi_1$ ,

$$M_1 = C_1 \Phi_1^2 n,$$

тормозной момент, возникающий от пересечения диском переменного рабочего потока параллельной обмотки  $\Phi_u$ :

$$M_u = C_u \Phi_u^2 n$$

и момент трения движущихся частей в опорах, счетном механизме и о воздух

$$M_r = a + bn + cn^2.$$

Нахождение  $D_{\kappa}$ . Если приспособление для создания компенсационного момента у данного типа счетчика можно удалять, то легко найти

отношение  $D_{\kappa}$  к результирующему вращающему моменту при данной нагрузке следующим путем. Устанавливая 100%-ную нагрузку при номинальных напряжении и частоте и  $\cos \varphi = 1$ , регулируют счетчик компенсационным приспособлением и определяют при этом его погрешность. После этого удаляют компенсационное приспособление и снова определяют погрешность. Разность погрешностей, определенных с компенсационным приспособлением и без него

$$\gamma_{\kappa} = \frac{D_{\kappa}}{D_{10} + D_{\kappa} - M_r'} 100\%, \quad (1)$$

или

$$\gamma_{\kappa} = \frac{D_{\kappa}}{D_{10}} 100\%. \quad (2)$$

Здесь  $D_{10}'$  — результирующий вращающий момент счетчика при 100%-ной нагрузке.

Для определения абсолютного значения  $D_{\kappa}$  целесообразнее воспользоваться уравнением

$$D_{\kappa} = a_{\kappa} D_{100}, \quad (3)$$

где  $D_{100}$  — вращающий момент счетчика при номинальной нагрузке; его можно определить при помощи динамометра, и тогда нахождение  $D_{\kappa}$  сводится к определению коэффициента  $a_{\kappa}$ .

Определение  $a_k$  можно произвести и не удаляя компенсационного приспособления. Для этого необходимо сравнить скорости вращения диска при одной и той же малой нагрузке ( $10\%$  от номинальной), но определенные один раз при правильном, а другой — при обратном вращении диска, когда последовательные и параллельная обмотки переключены. Разность определенных таким образом скоростей вращения диска, отнесенная к удвоенной скорости при номинальной нагрузке, дает возможность определить  $a_k$ , а следовательно, и  $D_k$ . Вместо указанных скоростей в выражение для  $a_k$  удобнее ввести время  $t_{100}$ , за которое диск счетчика делает  $N$  оборотов при номинальной нагрузке, время  $t'$ , за которое диск делает  $mN$  оборотов при малой нагрузке и правильном вращении, и время  $t'_{обp}$ , за которое диск делает то же число оборотов  $mN$ , но при обратном вращении.

Тогда (с точностью до  $2-3\%$ )

$$a_k = \frac{m(t'_{обp} - t')t_{100}}{2t't_{обp}}, \quad (4)$$

где  $m$  — отношение малой нагрузки к нагрузке номинальной, определяемое при экспериментах по показаниям образцового ваттметра.

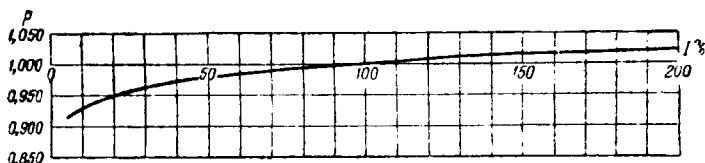
**Нахождение  $M_1$ .** Если определить  $M_1$ , который будет иметь место у счетчика при номинальной нагрузке, то по аналогии с  $D_k$

$$M_1 = a_1 D_{100}, \quad (5)$$

где

$$a_1 = \frac{pt'' - t_{100}}{t_{100}(pm)^2 - 1}. \quad (6)$$

Так как  $M_1$  особенно сильно влияет на нагрузочную кривую при перегрузках, то для нахождения  $a_1$  следует определить время  $t_{100}$ , за которое диск делает  $N$  оборотов при номинальной нагрузке, и время  $t''$ , за которое диск делает  $mN$  оборотов при перегрузке. Значения  $m$  в данном случае больше единицы и его удобно выбрать равным двум.



Зависимость коэффициента  $p$  от нагрузки для счетчика типа  $B_2$  (без магнитного шунта).

Коэффициент  $p$ , учитывающий непропорциональное изменение рабочего потока последовательной цепи  $\Phi_1$  по сравнению с нагрузкой, может быть определен при помощи компенсатора переменного тока. Пример зависимости  $p$  от нагрузки для отечественного производства дан на рисунке. Для  $200\%$  нагрузки от номинальной значение коэффициента  $p$  близко к 1,02. Для другой нагрузки, когда  $a_1$  уже найдено,

$$M_1 = a_1 D_{100} (pm_1)^2, \quad (7)$$

где  $m_1$  — отношение нагрузки, для которой необходимо определить  $M_1$ , к номинальной нагрузке.

Момент  $M_1$  может быть найден также, если воспользоваться трехфазным счетчиком, имеющим вращающиеся элементы того типа однофазного счетчика, для которого необходимо знать  $M_1$ . При этом расположение одного из вращающихся элементов трехфазного счетчика относительно диска должно быть таким же, как и у соответствующего однофазного счетчика. Для уменьшения влияния одного элемента на другой необходимо применять трехфазный счетчик с двумя дисками. Первый элемент этого счетчика будет создавать вращающий момент, а у второго включается только последовательная цепь. Для определенной нагрузки у второго элемента, при которой желательнее определить  $M_1$ , и постоянном вращающемся моменте  $D$  у первого элемента определяется время  $t_1$ , за которое диск счетчика сделает некоторое число оборотов  $N$ . Затем определяют время  $t$ , за которое диск сделает то же число оборотов  $N$ , но при выключенной последовательной цепи у второго элемента. Тогда

$$M_1 = \frac{t_1 - t}{t} D. \quad (8)$$

Если толщина диска  $a$  у трехфазного счетчика отличается от толщины диска  $a_1$  у однофазного счетчика, для которого определяется  $M_1$ , то величина последнего, определенная из (8), умножается на  $\frac{a_1}{a}$ .

**Нахождение  $M_u$ .** Момент  $M_u$  целесообразно определять также при помощи трехфазного двухдискового счетчика. В этом случае у второго элемента трехфазного счетчика включается только параллельная цепь, напряжение которой поддерживается номинальным, и удаляется приспособление для создания компенсационного момента. Первый элемент, как и при определении  $M_1$ , создает постоянный вращающий момент  $D$ . Тогда

$$M_u = \frac{t_1 - t}{t} D, \quad (9)$$

здесь  $t_1$  — время, за которое подвижная часть счетчика сделает  $N$  оборотов при воздействии на нее моментов  $D$  и  $M_u$ , а  $t$  — время, за которое подвижная часть счетчика сделает то же число оборотов  $N$ , но при воздействии на нее только момента  $D$ . При различных толщинах дисков счетчиков величина  $M_u$ , определенная из (9), умножается на  $\frac{a_1}{a}$ .

**Нахождение  $M_r$ .** Для некоторой малой нагрузки момент трения

$$M_r = a'_r D_{100}. \quad (10)$$

Здесь

$$a'_r = m \left[ p - \frac{t_{100}(t' + t'_{обp})}{2t't'_{обp}} (1 - a_1) \right]. \quad (11)$$

Сравнивая (4) и (11), видим, что для определения коэффициента  $a'$ , соответствующего моменту  $M'_r$ , который будет у счетчика при 100%-ной нагрузке, можно воспользоваться данными, полученными для нахождения  $a_k$ .

Чтобы определить момент трения только у счетного механизма, следует найти еще момент  $M''_r$  для той же нагрузки, но при удаленном счетном механизме. Тогда  $M''_r$  практически даст момент трения в опорах, а разность  $M'_r - M''_r$  — момент трения в счетном механизме.

Для определения  $D_k$ ,  $M'_r$  и  $M_1$  можно рекомендовать следующий порядок проведения опыта. Во-первых, следует отрегулировать подвергаемый испытанию однофазный счетчик так, чтобы его погрешности при 100 и 100%-ной нагрузке были приблизительно равны нулю. После этого определяют время  $t_{100}$  при 100%-ной нагрузке, затем —  $t$  при 100%-ной нагрузке и правильном вращении диска, —  $t_{обр}$  при 100%-ной нагрузке и обратном вращении диска и, наконец, —  $t_1$  при 200%-ной нагрузке. Для повышения точности необходимо задаваться таким числом оборотов диска счетчика, чтобы время, отсчитанное по секундомеру, при любой нагрузке было больше одной минуты.

#### Приложение

Скорость вращения диска счетчика при номинальной нагрузке [Л. 1]

$$n_{100} = \frac{D_{100} + D_k - M_r}{C_M \Phi M^2 + C_u \Phi_u^2 + C_1 \Phi_1^2} = \frac{\Sigma D'_{100}}{A}. \quad (12)$$

Скорость вращения  $n'$  при нагрузке, отличной от номинальной,

$$n' = \frac{pmD_{100} + D_k - M'_r}{C_M \Phi M^2 + C_u \Phi_u^2 + C_1 (pm\Phi_1)^2} = \frac{\Sigma D'}{A'}. \quad (13)$$

где  $m$  — отношение нагрузок а  $p$  — коэффициент непропорциональности изменения рабочего потока последовательной цепи  $\Phi_1$  по сравнению с нагрузкой. Для 10%-ной нагрузки

$$n' = \frac{\Sigma D'_{10}}{A'}. \quad (14)$$

Отношение скоростей

$$\frac{n'}{n_{100}} = \frac{\Sigma D'_{10} \cdot A}{\Sigma D'_{100} \cdot A'} = \frac{pm + a_k - a'_r}{1 + a_k - a_r} \frac{A}{A'}. \quad (15)$$

Скорость вращения диска  $n'_{обр}$  при 10%-ной нагрузке, но в обратном направлении.

$$n'_{обр} = \frac{\Sigma D'_{10} - 2D_k}{A'}. \quad (16)$$

Отношение скоростей

$$\frac{n'_{обр}}{n_{100}} = \frac{(\Sigma D'_{10} - 2D_k) A}{\Sigma D'_{100} A'} = \frac{pm - a_k - a'_r}{1 + a_k - a_r} \frac{A}{A'}. \quad (17)$$

После преобразований

$$\frac{A}{A'} = \frac{1 + a_k - a_r}{1 + a_k - a_r + a_1 [(mp)^2 - 1]}. \quad (18)$$

Приближенно

$$\frac{A}{A'} \approx \frac{1}{1 - a_1}. \quad (19)$$

Учитывая уравнения (15), (17) и (18), найдем:

$$a_k = \frac{n' - n'_{обр}}{2 n_{100}} \left\{ 1 + a_k - a_r + a_1 [(mp)^2 - 1] \right\}. \quad (20)$$

Приближенно

$$a_k \approx \frac{n' - n'_{обр}}{2 n_{100}}. \quad (21)$$

Заменяя в формуле (21) скорости  $n_{100}$ ,  $n'$  и  $n'_{обр}$  соответственно через  $\frac{N}{t_{100}}$ ;  $\frac{mN}{t'}$  и  $\frac{mN}{t'_{обр}}$ , получим формулу (4).

Складывая уравнения (15) и (17), найдем:

$$\frac{n' + n'_{обр}}{n_{100}} = \frac{2(mp - a'_r)}{1 + a_k - a_r} \frac{A}{A'}. \quad (22)$$

Подставляя в (22) значение  $\frac{A}{A'}$  из (18), получим:

$$\frac{n' + n'_{обр}}{2 n_{100}} = \frac{mp - a'_r}{1 + a_k - a_r + a_1 [(mp)^2 - 1]}. \quad (23)$$

Приближенно

$$\frac{n' + n'_{обр}}{2 n_{100}} \approx \frac{mp - a'_r}{1 - a_1}. \quad (24)$$

Заменяя в формуле (24) скорости  $n_{100}$ ,  $n'$  и  $n'_{обр}$  через  $\frac{N}{t_{100}}$ ,  $\frac{mN}{t'}$  и  $\frac{mN}{t'_{обр}}$  соответственно, получим (11). Выражение для  $a_1$  получается из следующих рассуждений. Из (12):

$$n_{100} = \frac{D_{100} + D_k - M_r}{A}.$$

Скорость диска счетчика при перегрузке

$$n'' = \frac{pmD_{100} + D_k - M''_r}{A''}. \quad (25)$$

Отношение скоростей

$$\frac{n_{100}}{n''} = \frac{1 + a_k - a_r + a_1 [(mp)^2 - 1]}{mp + a_k - a''_r}. \quad (26)$$

Отсюда

$$a_1 = \frac{\frac{n_{100}}{n''} (mp + a_k - a''_r) - 1 + a_r - a_k}{(mp)^2 - 1} = \frac{mp \frac{n_{100}}{n''} - 1 + \frac{n_{100}}{n''} (a_k - a''_r) - (a_k - a_r)}{(mp)^2 - 1}. \quad (27)$$

Приближенно (с точностью до 8 ÷ 10%)

$$a_1 \approx \frac{mp \frac{n_{100}}{n''} - 1}{(mp)^2 - 1}, \quad (28)$$

откуда мы получаем уравнение (6).

#### Литература

1. Н. Н. Пономарев (ред.). Теория, расчет и конструирование электроизмерительных приборов. Ленинград, 1943.
2. П. Г. Седов. Счетчики электрической энергии. ОНТИ, 1933.

# Температурное поле одиночного цилиндрического электрода при электропрогреве бетона

Кандидат техн. наук А. В. НЕТУШИЛ

Центральная научно-исследовательская лаборатория электрификации промышленности и строительства трест.а „Центроэлектромонтаж“

При электродном электропрогреве бетона [Л. 1] и других материалов важен расчет распределения температур вблизи электрода. Перегрев при электродных слоях может привести к повышению давления паров и даже к взрыву [Л. 2]. Аналитическое решение этой задачи для сложных конфигураций прогреваемых тел и при различной расстановке электродов представляет значительные трудности. Поэтому для получения достаточно простых выражений, могущих быть положенными в основу приближенного расчета температурных перепадов в бетоне, задачу приходится значительно упрощать.

Пусть бесконечно длинный цилиндрический электрод радиуса  $r_0$  помещен в неограниченную проводящую среду. Если к электроду подводится ток  $I$ , растекающийся равномерно в направлениях, перпендикулярных поверхности электродов, то стационарное тепловое поле вблизи электрода может быть подсчитано непосредственно путем интегрирования уравнения Пуассона для теплоэлектрического поля [Л. 3, 4]:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \vartheta = \Delta \vartheta = -\frac{E^2}{\lambda \rho} = -\frac{(\nabla \varphi)^2}{\lambda \rho}, \quad (1)$$

где  $\vartheta$  — температура;

$E$  — напряженность электрического поля в данной точке;

$\lambda$  и  $\rho$  — удельная теплопроводность (в  $\text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$ ) и удельное сопротивление (в  $\Omega \cdot \text{cm}$ ) материала;

$\varphi$  — потенциал рассматриваемой точки.

Так как электрическое и тепловое поля одиночного электрода плоскопараллельны и плоско-меридианальны, то в цилиндрических координатах

$$\Delta \vartheta = \nabla^2 \vartheta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right); \quad E = \frac{j_0 r_0 \rho}{r},$$

где  $r$  — расстояние рассматриваемой точки от оси провода;

$j_0$  — плотность тока на поверхности электрода радиуса  $r_0$ . Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right) = -\frac{j_0^2 \rho r_0^2}{\lambda r} = -\frac{k}{r}, \quad (2)$$

где  $k = \frac{j_0^2 \rho r_0^2}{\lambda}$ . Так как  $\vartheta$  зависит только от  $r$ , то, переходя от частных производных к полным и интегрируя, получаем:

$$\vartheta = -\frac{k \ln^2 r}{2} + C_1 \ln r + C_2,$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные интегрирования.

Если пренебречь теплоотдачей электрода, то для  $r = r_0 \dots \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = 0$  и, следовательно,  $C_1 = k \ln r_0$ . Обозначив температуру электрода  $\vartheta_0$  и выразив  $C_2$  через  $\vartheta_0$ , получаем:

$$\vartheta = \vartheta_0 - \frac{k}{2} \ln^2 \frac{r}{r_0}. \quad (3)$$

С помощью уравнения (3) может быть определена температура в любой точке среды.

Аналогичный результат следует из общего решения уравнения (1) в виде:

$$\vartheta = -\frac{\varphi^2}{2\lambda\rho} + \theta, \quad (4)$$

где первый член правой части представляет собой частное решение уравнения (1), а  $\theta$  — любая функция, удовлетворяющая уравнению Лапласа  $\nabla^2 \theta = 0$ .

Так как в рассматриваемой задаче эквипотенциальные и изотермические поверхности совпадают<sup>1</sup>, то

$$\theta = B_1 \varphi + B_2, \quad (5)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  — постоянные.

Определяя  $B_1$  и  $B_2$  из условий: при  $\varphi = \varphi_0$   $\vartheta = \vartheta_0$  и  $\frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi} = 0$ , получаем:

$$\vartheta - \vartheta_0 = -\frac{(\varphi - \varphi_0)^2}{2\lambda\rho}, \quad (6)$$

что соответствует равенству (3).

Представляет интерес найти точки, в которых температурный градиент максимален и, следовательно, максимальны механические напряжения.

Из уравнения (3) следует, что максимальный температурный градиент возникает в точках отстоящих от оси электрода на расстоянии  $er_0 = 2,72 r_0$ ; он равен:

$$\left( \frac{d\vartheta}{dr} \right)_{\max} = \frac{k}{er_0} = \frac{j_0^2 \rho r_0}{\lambda e}. \quad (7)$$

Следовательно, с увеличением радиуса электрода при неизменной плотности тока на его поверхности максимальный температурный градиент линейно возрастает.

Если известна средняя температура прогреваемого материала в точках, отстоящих от оси электрода на расстоянии  $a$ , то превышение тем-

<sup>1</sup> Общее решение для данного случая дано А. И. Даревским, исходящим из представления о  $\varphi$  как естественной координате температурного поля.

температуры электрода по отношению к среднему значению приближенно определяется по формуле

$$\vartheta_0 - \vartheta = \frac{j_0 r_0^2 \rho}{2\lambda} \ln^2 \frac{a}{r_0}. \quad (8)$$

Эта формула может быть применена для определения предельно допустимых нагрузок на электрод при электропрогреве бетона.

**Пример.** Если принять расстояние между одноименными электродами 20 см, а между разноименными — более 20 см, то можно считать, что на расстоянии, большем, чем  $a = 10$  см от оси электрода, устанавливается практически одинаковая температура. Пусть  $\lambda = 0,012$  Вт/см<sup>2</sup>С и  $\rho = 500$  Ом·см. Тогда температурный перепад меньше 10°С, необходимый для равномерного твердения бетона, может быть обеспечен только при плотности тока, не превышающей

$$j_0 = \frac{\sqrt{2\lambda(\vartheta_0 - \vartheta_a)}}{\sqrt{\rho} r_0 \ln \frac{a}{r_0}} = \frac{0,022}{r_0 \ln \frac{10}{r_0}} \text{ А/см}^2. \quad (9)$$

◇ ◇ ◇

## Обобщение метода контурных уравнений

Кандидат техн. наук Х. Ф. ФАЗЫЛОВ

Энергетический институт Академии наук Узбекской ССР

Метод уравнений узловых напряжений является, как уже было отмечено автором, фундаментальным методом современных инженерных расчетов сетей энергетических систем [Л. 1, 2]. При отсутствии уравнительных э. д. с. в контурах решение уравнений узловых напряжений легко получить непосредственно, что делает этот метод одновременно одним из действенных методов для режимных расчетов сетей [Л. 3]. Однако, в общем случае при наличии уравнительных э. д. с. в контурах имеют место большие вычислительные трудности, связанные с решением системы уравнений узловых напряжений. Поэтому имеется потребность в методе расчета сетей, обеспечивающем достаточно точное решение практических задач в общем случае и не требующем большой затраты времени на вычисления.

В качестве такого метода мы предлагаем описываемое ниже обобщение метода контурных уравнений, полученное, исходя из последовательного применения идеи четырехполюсника для всех без исключения звеньев цепи с последующими приемлемыми упрощающими допущениями.

Будем исходить из общих уравнений четырехполюсника

$$\dot{U}_1 = \dot{A}_{12} \dot{U}_2 + \dot{B}_{12} \dot{I}_2 = \dot{A}_{12} \dot{U}_2 + \dot{B}_{12} \frac{\dot{P}_2}{\dot{U}_2}, \quad (1)$$

Допустимая плотность тока, подсчитанная по формуле (9) для различных значений  $r_0$ :

$r_0$ , см	0,3	0,4	0,5	0,6
$j_0$ , А/дм <sup>2</sup>	2,1	1,96	1,47	1,3

Приведенные предельные нагрузки на электрод соответствуют оптимальным экспериментальным данным [Л. 4].

### Литература

1. Б. М. Тареев и В. А. Привезенцев. Провода для электропрогрева бетона. Бюллетень Москабеля, № 3, 1938.
2. Точилин и Вегенер. Строительная промышленность, № 1, 1946.
3. Ф. Оллендорф. Токи в земле. ГНТИ, 1932.
4. А. К. Ретти. Электробетон в практике. ОНТИ, 1933.
5. А. В. Нетушил. Расчет сопротивления между электродами при электропрогреве бетона и железобетона. Вестник инженеров и техников, № 6, 1947.

$$\dot{I}_1 = \dot{C}_{12} \dot{U}_2 + \dot{D}_{12} \dot{I}_2 = \dot{C}_{12} \dot{U}_2 + \dot{D}_{12} \frac{\dot{P}_2}{\dot{U}_2}. \quad (2)$$

В этих формулах напряжения и токи с индексами 1 относятся к в одному, а с индексами 2 — к выходным зажимам четырехполюсника. Первые из двойных индексов постоянных показывают, относительно напряжений каких зажимов определены эти постоянные. Значения этих постоянных для двухобмоточных трансформаторов и бустеров были приведены ранее [Л. 1]. Постоянные  $\dot{A}$ ,  $\dot{B}$ ,  $\dot{D}$  трехобмоточных трансформаторов даются в приложении 1.

Рассмотрим отдельно одно- и многократномкнутые контуры, причем основные общие положения будут развиты при исследовании первого.

**Однократно замкнутый контур.** Пусть будет задан однократно замкнутый контур (рис. 1), элементы которого в общем случае имеют трансформационные соотношения. Отправляясь от точки 1, напомним для контура следующее тождество:

$$(\dot{U}_1 - \dot{A}_{12} \dot{U}_2) + \dot{A}_{12} (\dot{U}_2 - \dot{A}_{23} \dot{U}_3) + \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} (\dot{U}_3 - \dot{A}_{31} \dot{U}_1) = \dot{U}_1 (1 - \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{A}_{31}). \quad (3)$$

Выразим напряжения концов звеньев цепи  $\dot{U}_2$ ,  $\dot{U}_3$  и  $\dot{U}_1$  через токи и напряжения в их начале:

$$\left. \begin{aligned} \dot{D}_{12} \dot{U}_1 - \dot{B}_{12} \dot{I}_{11} &= (\dot{A}_{12} \dot{D}_{12} - \dot{B}_{12} \dot{C}_{12}) \dot{U}_2 = \dot{f}_{12} \dot{U}_2, \\ \dot{D}_{23} \dot{U}_2 - \dot{B}_{23} \dot{I}_{22} &= (\dot{A}_{23} \dot{D}_{23} - \dot{B}_{23} \dot{C}_{23}) \dot{U}_3 = \dot{f}_{23} \dot{U}_3, \\ \dot{D}_{31} \dot{U}_3 - \dot{B}_{31} \dot{I}_{33} &= (\dot{A}_{31} \dot{D}_{31} - \dot{B}_{31} \dot{C}_{31}) \dot{U}_1 = \dot{f}_{31} \dot{U}_1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Для краткости здесь обозначено

$$\dot{A}_{pq} \dot{D}_{pq} - \dot{B}_{pq} \dot{C}_{pq} = e^{j\theta_{pq}} = \dot{f}_{pq}.$$



Подставляя выражение (4) в (3), получим:

$$\dot{U}_1 - \dot{A}_{12} \left( \frac{\dot{D}_{12}}{\dot{f}_{12}} \dot{U}_1 - \frac{\dot{B}_{12}}{\dot{f}_{12}} \dot{I}_{I1} \right) + \dot{A}_{12} \dot{U}_2 - \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \left( \frac{\dot{D}_{23}}{\dot{f}_{23}} \dot{U}_2 - \frac{\dot{B}_{23}}{\dot{f}_{23}} \dot{I}_{II2} \right) + \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{U}_3 - \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{A}_{31} \left( \frac{\dot{D}_{31}}{\dot{f}_{31}} \dot{U}_3 - \frac{\dot{B}_{31}}{\dot{f}_{31}} \dot{I}_{III3} \right) = \dot{U}_1 (1 - \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{A}_{31}). \quad (5)$$

Предполагая, что проводимость трансформаторов и линий отнесены к нагрузкам узлов, можно считать:

$$\dot{C}_{pq} = 0 \text{ и } \dot{A}_{pq} \dot{D}_{pq} = \dot{f}_{pq}.$$

При этом допускается незначительная погрешность.

Учитывая последнее соотношение, уравнение (5) можно переписать в следующем виде:

$$\frac{\dot{A}_{12} \dot{B}_{12}}{\dot{f}_{12}} \dot{I}_{I1} + \frac{\dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{B}_{23}}{\dot{f}_{23}} \dot{I}_{II2} + \frac{\dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{A}_{31} \dot{B}_{31}}{\dot{f}_{31}} \dot{I}_{III3} = \dot{U}_1 (1 - \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{A}_{31}). \quad (6)$$

Заметив, что [Л. 1]

$$\dot{A}_{pq} \dot{B}_{pq} = \dot{Z}_{pq} \dot{I}_{pq},$$

и заменяя токи через мощности, получим:

$$\dot{Z}_{12} \frac{\dot{P}_{I1}}{\dot{U}_1} + \dot{A}_{12} \dot{Z}_{23} \frac{\dot{P}_{II2}}{\dot{U}_2} + \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{Z}_{31} \frac{\dot{P}_{III3}}{\dot{U}_3} = \dot{U}_1 (1 - \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{A}_{31}). \quad (7)$$

Сопротивления участков отнесены к напряжениям узлов первых из двойных индексов.

Уравнение (7) по форме является базой для дальнейших выводов. Пусть  $U_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) является опорным напряжением. Умножая левые и правые части уравнения (7) на  $\dot{U}_k$  и устанавливая соотношения между напряжениями по их первому приближению [Л. 1], получим:

$$\frac{\dot{Z}_{12}}{\dot{a}_{1k}} \dot{P}_{I1} + \frac{\dot{A}_{12} \dot{Z}_{23}}{\dot{a}_{2k}} \dot{P}_{II2} + \frac{\dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{Z}_{31}}{\dot{a}_{3k}} \dot{P}_{III3} = \dot{a}_{1k} U_k^2 \times \times (1 - \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{A}_{31}). \quad (8)$$

Так как  $\dot{a}_{ii} = 1$ , то для примера при  $k = 1$  получим:

$$\dot{Z}_{12} \dot{P}_{I1} + \frac{\dot{A}_{12} \dot{Z}_{23}}{\dot{a}_{21}} \dot{P}_{II2} + \frac{\dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{Z}_{31}}{\dot{a}_{31}} \dot{P}_{III3} = U_1^2 (1 - \dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{A}_{31}). \quad (9)$$

При отсутствии уравнивающей э. д. с в контуре имеем

$$\dot{A}_{12} \dot{A}_{23} \dot{A}_{31} = 1; \quad \frac{1}{\dot{a}_{21}} = \dot{A}_{12}; \quad \frac{1}{\dot{a}_{31}} = \frac{1}{\dot{A}_{31}} = \dot{A}_{12} \dot{A}_{23}.$$

Учитывая последние соотношения, преобразуем (9) в обычное контурное уравнение:

$$\dot{Z}_{12} \dot{P}_{I1} + \dot{A}_{12}^2 \dot{Z}_{23} \dot{P}_{II2} + \dot{A}_{12}^2 \dot{A}_{23}^2 \dot{Z}_{31} \dot{P}_{III3} = 0 \quad (10)$$

или на базе ступени напряжения  $U_1$

$$\dot{Z}_{12} \dot{P}_{I1} + \dot{Z}'_{23} \dot{P}_{II2} + \dot{Z}'_{31} \dot{P}_{III3} = 0. \quad (11)$$

Принятые соотношения между напряжениями по их первому приближению означают, что нагрузочные мощности не вызовут потерь в сети. Чтобы уравнение (8) стало определенным, должно быть введено дальнейшее допущение, а именно: надо предположить, что уравнивающая мощность в контуре однозначна. При этом мощность в начале и конце участков сети будет одной и той же и соответственно в уравнениях (8), (9), (10), (11) вторые индексы мощностей должны быть опущены. Если принять за неизвестное мощность какого-либо участка, то, учитывая баланс в узлах, можно установить мощности участков через это неизвестное. Следовательно, уравнение (8) дает неизвестную мощность условленного участка, тем

самым решает задачу предварительного определения потоков распределения мощностей по контуру.

Следует заметить, что введенное выше допущение об однозначности уравнивающей мощности контура, т. е. не зависимости значения уравнивающей мощности от направления обхода контура, не соответствует действительности [Л. 1]. Правая часть уравнения (8) имеет различные значения в зависимости от направления обхода контура, что влечет неоднозначное потокораспределение мощностей. Метод контурных уравнений расчета сетей непосредственно не может преодолеть такую неоднозначность. Но при существующих соотношениях параметров нормально эксплуатируемых сетей два различных значения потокораспределения мощностей, соответствующих двум противоположным обходам контура, практически мало отличаются друг от друга. Поэтому можно мириться с тем потокораспределением мощностей, которое соответствует случайно выбранному направлению обхода контура.

Уравнение (8) при правильном учете трансформационных соотношений звеньев цепи полностью решает задачу предварительного определения потокораспределения мощностей в контуре (с учетом вышеизложенных оговорок), независимо от того, имеется ли продольная или поперечная составляющая уравнивающих э. д. с.

Коэффициенты перед мощностями левой части уравнения (9) являются сопротивлениями участков, приведенными особым образом к опорному напряжению. Предварительно подсчитав их, можно далее написать контурные уравнения, имеющие в левой части общеизвестную структуру:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma(P_a R + P_r x) &= R U_{0n}^2 (1 - \Pi \dot{A}), \\ \Sigma(P_a X - P_r x) &= I m U_{0n}^2 (1 - \Pi \dot{A}), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $\Pi \dot{A}$  — произведение трансформационных соотношений всех последовательных участков при обходе заданного контура.

Известно, что совокупность трансформаторов, действующих в любом контуре может быть заменена единственным для данного контура дополнительным трансформатором. Допустимо, что для рис. 1 дополнительный трансформатор установлен в участке I2. В таком случае уравнение (9) может быть переписано в следующем виде:

$$\dot{Z}_{12} \dot{P}_I + \frac{\dot{A}_{12}}{\dot{a}_{21}} \dot{Z}_{23} \dot{P}_{II} + \frac{\dot{A}_{12}}{\dot{a}_{31}} \dot{Z}_{31} \dot{P}_{III} = U_1^2 (1 - \dot{A}_{12}), \quad (13)$$

где  $\dot{a}_{21}$  и  $\dot{a}_{31}$  являются соответствующими функциями параметра дополнительного трансформатора  $\dot{A}_{12} = (1 + \Delta K_{12}) e^{j\theta_{12}}$ . Разлагая в ряд выражения  $\dot{a}_{21}$  и  $\dot{a}_{31}$  по степеням  $\Delta K_{12}$  и  $\theta_{12}$ , и ограничиваясь вторым приближением разложения, получим

$$\dot{a}_{21} = 1 - \Delta K_{12} \frac{\dot{Z}_{231}}{\dot{Z}_{231} + \dot{Z}_{21}} - j\theta_{12} \frac{\dot{Z}_{231}}{\dot{Z}_{231} + \dot{Z}_{21}}. \quad (14)$$

$$\dot{a}_{31} = 1 - \Delta K_{12} \frac{\dot{Z}_{31}}{\dot{Z}_{31} + \dot{Z}_{321}} - j\theta_{12} \frac{\dot{Z}_{31}}{\dot{Z}_{31} + \dot{Z}_{321}}.$$

Опыт расчета показывает, что в пределах  $A = 1 \pm 0.2$  и  $\theta_{12} = \pm 2^\circ$  можно допустить без грубой погрешности, в левой части уравнения (13) коэффициенты перед сопротивлениями участков равными единице. В этом случае левая часть уравнения (12) будет составлена в обычном порядке.

Дальнейший этап расчета сетей сводится к установлению уточненного значения напряжения узлов при одновременном учете потерь мощностей на участках сети, по аналогии с радиальной линией. Здесь в качестве конечного пункта сети принимается участок  $k$ , примыкающий к узлу опорного напряжения  $\dot{U}_k$ , с мощностью конечного пункта участка, равной предварительно установленной мощности сети. Если мощность последнего примыкающего к  $\dot{U}_k$  участка соответствовала бы действительно протекающей мощности (как, например, в радиальных линиях), то последующие напряжения узлов и мощности различных пунктов участков тоже были бы действительными, чего на самом деле не

бывает. Это можно показать на простейшем примере. Предположим, что в контуре рис. 1 отсутствует уравнивающая в. д. с. и расчеты ведутся на базе одной ступени напряжения. Пусть  $\dot{U}_2$  будет фиксированным. Тогда

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= U_2 + b_{12} \frac{\dot{P}_2}{\dot{U}_2} + b_{13} \frac{\dot{P}_3}{\dot{U}_3}, \\ \dot{U}_2 &= U_2, \\ \dot{U}_3 &= U_2 + b_{32} \frac{\dot{P}_2}{\dot{U}_2} + b_{33} \frac{\dot{P}_3}{\dot{U}_3}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

мощность участка II в точке 2 будет:

$$\dot{P}_{II2} = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_2}{Z_{23}} \dot{U}_2 = \frac{b_{32}}{Z_{23}} \dot{P}_2 + \frac{b_{33}}{Z_{23}} \dot{P}_3 \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_3}, \quad (16)$$

в самом деле подсчет напряжений узлов и потерь мощности в участках исходит из предположения, что

$$\dot{P}_{II2} = \frac{b_{33}}{Z_{23}} \dot{P}_2 + \frac{b_{33}}{Z_{23}} \dot{P}_3. \quad (17)$$

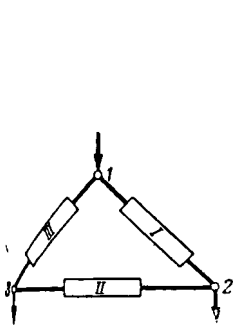


Рис. 1. Однократно замкнутый контур из четырех полюсников.

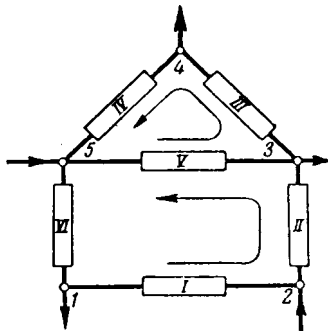


Рис. 2. Двукратно замкнутый контур из четырех полюсников

В результате, идя от узла 2 к узлу 1 по участку I и через точку 3 по участкам II и III, принципиально не получим одни и те же значения напряжения 1. Ошибка зависит

от того, насколько комплекс  $\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_3}$  отличается от вещественной единицы, и она при нормальных условиях нагрузки сети незначительна.

Определение напряжения узлов с учетом трансформационных соотношений и мощности участков, примыкающих к узлам, в общем случае необходимо выполнить, исходя из формул (1) и (2), а подсчет потерь мощности в участках — по одной из равнозначности формулы потерь

$$\Delta \dot{P} = \dot{P}_1 - \dot{P}_2 = I_1 \dot{U}_1 - I_2 \dot{U}_2 = \frac{D_{12} \dot{U}_1 - I_{12} \dot{U}_2}{B_{12}} \dot{U}_1 - \frac{\dot{U}_1 - A_{12} \dot{U}_2}{B_{12}} \dot{U}_2 \quad (18)$$

или по формуле

$$\Delta \dot{P}_{12} = \hat{Z}_{12} \frac{P_{12}^2}{U_2^2}, \quad (19)$$

если расчеты были выполнены на базе одной ступени напряжения.

В формулах (18) и (19) индексы 1 и 2 соответственно относятся к началу и концу участков сети. Если схема сети после предварительного установления потокораспределения мощностей разрезанием в точке фиксированного напряжения приводится к нескольким радиальным линиям (относительно точки питания), то расчетные операции определения напряжения и потерь мощности в участках в каждой радиальной линии можно выполнить на базе приведенных значений сопротивлений.

После того как установлено приближенное значение напряжения узлов и мощностей в участках, вследствие неоднозначности мощности в пределах любого участка сети становится невозможным повторное применение контурного уравнения с целью уточнения расчетов. Таким образом, в методе контурных уравнений непосредственно сколь угодно большая точность принципиально не может быть достигнута.

Отметим еще одну особенность метода контурных уравнений, а именно, что всегда имеется формальная возможность подсчета потокораспределения мощностей при любой нагрузке системы, независимо от ее уровня напряжения. На самом же деле при данном уровне напряжения сети при фиксированных нагрузках узлов режим может и не существовать. Это объясняется тем, что первое приближение напряжения узлов, положенное в основу вывода контурных уравнений при больших перегрузках сети может быть далеко от истины. Строгий процесс уточнения напряжений узлов [Л. 1] в этих случаях может быть расходящимся, что свидетельствует о невозможности существования данного режима.

В методе контурных уравнений это обстоятельство не может получить никакого отражения, и результаты подсчета могут оказаться нереальными. Однако, такие случаи могут появиться тогда, когда потери напряжения в сети превосходят (в самых неблагоприятных условиях) цифры порядка 30% от номинала, что перекрывает практику нормальной эксплуатации сетей энергетических систем, но могут иметь место в послеаварийных рабочих режимах.

**Многократно замкнутый контур.** Теперь без особого труда можно написать контурные уравнения для многократно замкнутой цепи. Например, для схемы сети рис. 2, обходя контуры по 12351 и 3453, соответственно напишем:

$$Z_{12} \frac{\dot{P}_1}{\dot{U}_1} + A_{12} Z_{23} \frac{\dot{P}_{II}}{\dot{U}_2} + A_{12} A_{23} Z_{35} \frac{\dot{P}_V}{\dot{U}_3} + A_{12} A_{23} A_{35} Z_{51} \frac{\dot{P}_{VI}}{\dot{U}_5} = \dot{U}_1 (1 - A_{12} A_{23} A_{35} A_{51}), \quad (20)$$

$$Z_{34} \frac{\dot{P}_{III}}{\dot{U}_3} + A_{34} Z_{45} \frac{\dot{P}_{IV}}{\dot{U}_4} + A_{34} A_{45} Z_{53} \frac{\dot{P}_V}{\dot{U}_5} = \dot{U}_3 (1 - A_{34} A_{45} A_{53}). \quad (21)$$

Далее, фиксируя одно из напряжений узлов, попрежнему устанавливаем соотношения между напряжениями по их первому приближению. Приняв по одной мощности участков двух контуров за неизвестные, получим достаточно уравнений для определения этих неизвестных. Если фиксировано  $\dot{U}_4$ , то получим:

$$\frac{Z_{12}}{\hat{a}_{14} \hat{a}_{14}} \dot{P}_1 + \frac{\hat{A}_{12} Z_{23}}{\hat{a}_{24} \hat{a}_{14}} \dot{P}_{II} + \frac{\hat{A}_{12} \hat{A}_{23} \hat{Z}_{35}}{\hat{a}_{34} \hat{a}_{14}} \dot{P}_V + \frac{\hat{A}_{12} \hat{A}_{23} \hat{A}_{35} \hat{Z}_{51}}{\hat{a}_{54} \hat{a}_{14}} \dot{P}_{VI} = U_4^2 (1 - \hat{A}_{12} \hat{A}_{23} \hat{A}_{35} \hat{A}_{51}), \quad (22)$$

$$\frac{Z_{34}}{\hat{a}_{34} \hat{a}_{34}} \dot{P}_{III} + \frac{\hat{A}_{34} Z_{45}}{\hat{a}_{34}} \dot{P}_{IV} + \frac{\hat{A}_{34} \hat{A}_{45} \hat{Z}_{53}}{\hat{a}_{54} \hat{a}_{34}} \dot{P}_V = U_4^2 (1 - \hat{A}_{34} \hat{A}_{45} \hat{A}_{53}) \quad (23)$$

Соответствующие коэффициенты  $\hat{a}$  для типичных случаев подобно формулам (14) могут быть табулированы. Однако, как было указано, для ориентировочных расчетов можно рекомендовать непосредственную запись коэффициентов левой части уравнений (12). При этом сеть предварительно заменяется более однородной сетью в отношении напряжения, имеющей только дополнительные трансформаторы в контурах.

После предварительного определения потокораспределения мощностей по контурам следующий этап расчета — установление уточненного значения напряжения узлов и мощностей участков — является легко выполнимым.

В заключение отметим, что уравнение (12) позволяет решать задачу определения числа и параметров бустер-трансформаторов, обеспечивающую заданное потокораспределение в сложной системе. Решение этой задачи приводит к естественному выводу, что число бустеров с неза-

висимым продольно-поперечным регулированием должно равняться числу замкнутых контуров [Л. 4].

#### Приложение

Постоянные трехобмоточных трансформаторов. Пусть постоянные трехобмоточного трансформатора заданы между каждой парой обмоток (рис. 3); требуется представить трансформатор эквивалентным трехлучевым соединением (рис. 4).

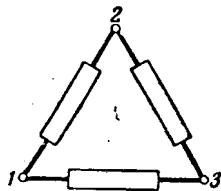


Рис. 3. Трехобмоточный трансформатор как условный треугольник из четырехполюсников.

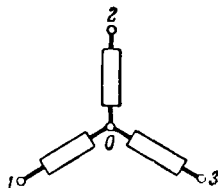


Рис. 4. Трехобмоточный трансформатор как условная трехлучевая звезда из четырехполюсников.

Предполагая ради упрощения проводимость трансформатора вынесенной за один из зажимов эквивалентной схемы, из рис. 3 и 4 имеем

$$\left. \begin{aligned} \dot{A}_{12} &= \dot{A}_{10}\dot{A}_{02}, \\ \dot{A}_{23} &= \dot{A}_{20}\dot{A}_{03}, \\ \dot{A}_{31} &= \dot{A}_{30}\dot{A}_{01}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Так как

$$\dot{A}_{12}\dot{A}_{23}\dot{A}_{31} = 1. \quad (2)$$

то одно из соотношений (1) будет следствием двух других. Поэтому необходимо задаться одной из величин  $\dot{A}_{k0}$ . Полагая обычное соединение обмоток трансформатора  $Y/Y/\Delta$ , далее допустим

$$\dot{A}_{10} = \dot{A}_{01} = 1. \quad (3)$$

Тогда из (1) имеем:

$$\dot{A}_{20} = \dot{A}_{21} = \dot{A}_{21} \quad (4)$$

и

$$\dot{A}_{30} = \dot{A}_{31} = \dot{A}_{31} e^{j\theta_{31}}. \quad (5)$$

Для определения значений  $\dot{B}_{k0}$  лучше идти следующим искусственным путем. Сперва предположим, что схема соединений  $Y/Y/\Delta$ , что дает основание соотношениям

$$\dot{B}_{k0} = \dot{B}_{0k}; \quad D_{0k} = A_{k0}$$

для трехлучевой звезды, и

$$\dot{B}_{ki} = \dot{B}_{ik}$$

для треугольника. Тогда

$$\left. \begin{aligned} \dot{B}_{12} &= A_{10}\dot{B}_{02} + \dot{B}_{10}D_{02} = A_{10}\dot{B}_{20} + \dot{B}_{10}A_{20}, \\ \dot{B}_{23} &= A_{20}\dot{B}_{03} + \dot{B}_{20}D_{03} = A_{20}\dot{B}_{30} + \dot{B}_{20}A_{30}, \\ \dot{B}_{31} &= A_{30}\dot{B}_{01} + \dot{B}_{30}D_{01} = A_{30}\dot{B}_{10} + \dot{B}_{30}A_{10}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решая уравнения (6) относительно  $\dot{B}_{10}$ ,  $\dot{B}_{20}$  и  $\dot{B}_{30}$ , получим:

$$\dot{B}_{10} = \frac{\dot{B}_{12}A_{30} + \dot{B}_{13}A_{20} - \dot{B}_{23}A_{10}}{2A_{30}A_{20}},$$

$$\dot{B}_{20} = \frac{\dot{B}_{21}A_{30} + \dot{B}_{23}A_{10} - \dot{B}_{31}A_{20}}{2A_{10}A_{30}},$$

$$\dot{B}_{30} = \frac{\dot{B}_{31}A_{20} + \dot{B}_{32}A_{10} - \dot{B}_{12}A_{30}}{2A_{10}A_{20}}.$$

Правило непосредственной записи соотношений (7) можно легко проследить. При схеме соединений обмоток  $Y/Y/\Delta$ , которая всегда имеет место, соотношение (9) соответствии с (5) должно иметь множитель  $e^{j\theta_{31}}$ , т. е.

$$\dot{B}_{30} = \frac{\dot{B}_{31}A_{20} + \dot{B}_{32}A_{10} - \dot{B}_{12}A_{30}}{2A_{10}A_{20}} e^{j\theta_{31}}. \quad (8)$$

#### Литература

1. Х. Ф. Фазылов. Электричество, № 11, 1946.
2. Дискуссия по статье автора. Электричество, № 1947.
3. Х. Ф. Фазылов. Бюллетень АН УзССР, № 1947.
4. В. Г. Холмский. Сборник аннотаций научных исследований работ вузов ВКВШ, вып. 3, 1940.



## Разновидность технического выполнения расчетов токов короткого замыкания

Кандидат техн. наук Д. С. КРИВОЗУБ и кандидат техн. наук А. Я. МУЧНИК

Военно-инженерная академия им. Куйбышева

В практике вычислений токов короткого замыкания общеизвестны два способа выражений расчетных величин: в абсолютных (именованных) единицах и в относительных значениях. Представляет интерес рассматриваемый ниже способ технического выполнения расчетов токов, принципиально отличный от двух вышеупомянутых способов, основанных на приведении расчетных величин к базисным условиям.

В основу способа положена новая расчетная величина  $P_k$ , выражаемая в MVA через параметры элементов расчетной схемы:

$$P_k = \frac{U_n^2}{x} = \frac{P_n}{x_*}, \quad (1)$$

где  $U_n$  — номинальное напряжение в kV;

$P_n$  — номинальная мощность в MVA;

$x$  — сопротивление в  $\Omega$ ;

$x_*$  — сопротивление, выраженное в долях единицы.

Параметр  $P_k$  какого-либо элемента расчетной схемы (трансформатор, реактор, линия) выражает собой мощность в конце этого элемента при условии его приложения непосредственно к шинам источника бесконечной мощности. Для генератора  $P_k$  означает „собственную“ мощность к. з. на его зажимах при условии  $E=U_n$ . Мощность к. з. в конце элемента расчетной схемы не может превышать

значение  $P_k$  этого элемента (если через него протекает весь аварийный ток, направляющийся к месту повреждения). Величина  $P_k$  в соответствии с ее физической сущностью может быть названа „предельно-пропускаемой мощностью короткого замыкания“.

Для установления основных положений нового расчетного способа рассмотрим произвольную схему, содержащую ряд последовательно соединенных участков, в каждом из которых имеется несколько параллельных ветвей. Пусть все расчетные сопротивления выражены в омах и приведены к какой-либо одной ступени напряжения (в качестве таковой принят тот участок схемы, на котором возникло к. з.). Расчетная величина мощности к. з. в месте повреждения, определяемая по величине результирующего сопротивления рассматриваемой схемы:

$$P_{k_{рез}} = \sqrt{3} \cdot U_n I_k = \frac{U_n^2}{x_{рез}} = \frac{U_n^2}{\frac{1}{\frac{1}{x_1} + \dots + \frac{1}{x_l} + \frac{1}{\frac{1}{x_{l+1}} + \dots + \frac{1}{x_l}} + \dots + \frac{1}{\frac{1}{x_{m+1}} + \dots + \frac{1}{x_n}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{U_n^2}{x_1} + \dots + \frac{U_n^2}{x_l} + \frac{U_n^2}{x_{l+1}} + \dots + \frac{U_n^2}{x_l} + \dots + \frac{U_n^2}{x_{m+1}} + \dots + \frac{U_n^2}{x_n}} \quad (2)$$

После подстановки  $P_k$  взамен отношений  $\frac{U_n^2}{x}$ , получаем выражение для определения мощности к. з. в месте повреждения, если известны значения параметра  $P_k$  для всех элементов расчетной схемы:

$$P_{k_{рез}} = \frac{1}{\frac{1}{P_{k_1} + \dots + P_{k_l}} + \frac{1}{P_{k_{l+1}} + \dots + P_{k_l}} + \dots + \frac{1}{P_{k_{m+1}} + \dots + P_{k_n}}} \quad (3)$$

Полученное выражение показывает, что для вычисления мощности к. з. в какой-либо точке схемы следует: 1) предварительно определить значения  $P_k$  по формуле (1) для всех элементов расчетной схемы, включая генерирующие источники; 2) при преобразовании расчетной схемы и приведении ее к простейшему виду: а) суммировать значения  $P_k$  параллельных ветвей; б) складывать обратные  $P_k$  ве-

личины для последовательно соединенных участков, иными словами, при упрощении расчетной схемы следует с величинами  $P_k$  оперировать, как с проводимостями.

Иллюстрируем на конкретном примере (рис. 1) применение рассматриваемого способа и сравним его с распространенным на практике способом расчета в относительных величинах.

Для применения кривых затухания требуется: при пользовании первым способом найти результирующее реактивное сопротивление  $x_*$ , отнесенное к суммарной мощности генерирующих источников; при пользовании вторым способом определить  $x_* = \frac{P_n}{P_k}$ .

Формулы для преобразования треугольника в эквивалентную звезду и трехлучевой звезды в эквивалентный треугольник (рис. 2) при пользовании величиной  $P_k$  как основным расчетным параметром, принимают следующий вид.

#### 1. Преобразование $\Delta/\Delta$ :

$$P_{k_1} = \frac{P_{k_{12}} \cdot P_{k_{13}} + P_{k_{12}} \cdot P_{k_{23}} + P_{k_{13}} \cdot P_{k_{23}}}{P_{k_{23}}};$$

$$P_{k_2} = \frac{P_{k_{12}} \cdot P_{k_{13}} + P_{k_{12}} \cdot P_{k_{23}} + P_{k_{13}} \cdot P_{k_{23}}}{P_{k_{13}}};$$

$$P_{k_3} = \frac{P_{k_{12}} \cdot P_{k_{13}} + P_{k_{12}} \cdot P_{k_{23}} + P_{k_{13}} \cdot P_{k_{23}}}{P_{k_{12}}}.$$

#### 2. Преобразование $\Delta/\Delta$ :

$$P_{k_{12}} = \frac{P_{k_1} \cdot P_{k_2}}{P_{k_1} + P_{k_2} + P_{k_3}}; \quad P_{k_{23}} = \frac{P_{k_2} \cdot P_{k_3}}{P_{k_1} + P_{k_2} + P_{k_3}};$$

$$P_{k_{13}} = \frac{P_{k_1} \cdot P_{k_3}}{P_{k_1} + P_{k_2} + P_{k_3}}.$$

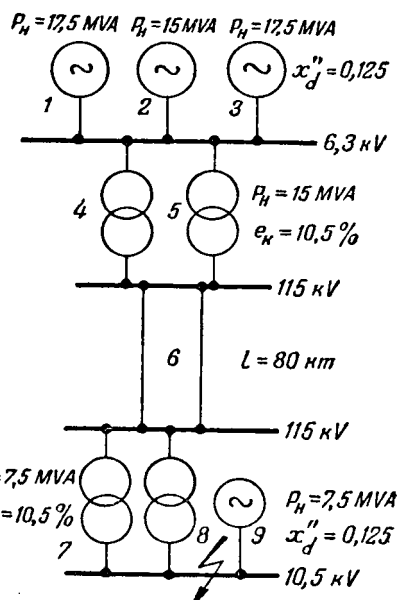


Рис. 1.

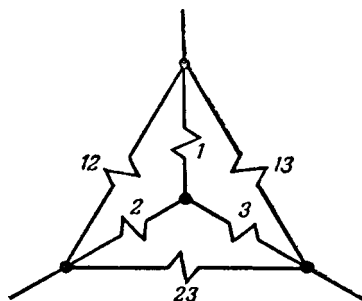


Рис. 2.

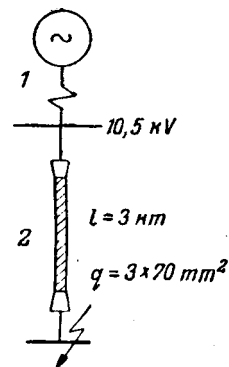


Рис. 3.

Таблица 1

## Определение расчетных параметров

Элементы	$x_*$ ( $P_0 = 100$ MVA)	$P_k$ в MVA
1, 3	$\frac{100}{17,5} \cdot 0,125 = 0,72$	$\frac{17,5}{0,125} = 140$
2	$\frac{100}{15} \cdot 0,125 = 0,83$	$\frac{15}{0,125} = 120$
4, 5	$\frac{100}{15} \cdot 0,105 = 0,70$	$\frac{15}{0,105} = 143$
6	$0,2 \cdot 80 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,12$	$\frac{115^2}{0,2 \cdot 80} = 825$
7, 8	$\frac{100}{7,5} \cdot 0,105 = 1,40$	$\frac{7,5}{0,105} = 71,5$
9	$\frac{100}{7,5} \cdot 0,125 = 1,67$	$\frac{7,5}{0,125} = 60$

$$\dot{P}_{k_{рез}} = \frac{1}{\frac{1}{\dot{P}_{k_1}} + \frac{1}{\dot{P}_{k_2}}} = \frac{1}{-j130} + \frac{1}{133 - j43} = 47 - j67;$$

$$P_{k_{рез}} = \sqrt{47^2 + 67^2} = 82 \text{ MVA}.$$

Рассматриваемый способ выполнения расчетов может быть применен и к несимметричным к. з.

Если в расчете желательно учесть различные значения э. д. с. генераторов, участвующих в схеме, и нагрузки в месте их присоединения, то значение эквивалентно э. д. с., обычно вычисляемое по формуле

$$E_{эвк} = \frac{\frac{E_1}{x_1} + \frac{E_2}{x_2} + \dots + \frac{E_n}{x_n}}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}},$$

может быть определено из выражения

$$E_{эвк} = \frac{E_1 \cdot P_{k_1} + E_2 \cdot P_{k_2} + \dots + E_n \cdot P_{k_n}}{P_{k_1} + P_{k_2} + \dots + P_{k_n}};$$

при этом нагрузки могут рассматриваться как генераторные ветви с э. д. с., равной нулю.

## Преобразование расчетной схемы

Таблица 2

Преобразуемые элементы	$x_*$	$P_k$ в MVA
1, 2, 3	$\frac{1}{\frac{1}{0,72} + \frac{1}{0,83} + \frac{1}{0,72}} = 0,25$	$140 + 120 + 140 = 400$ $2 \cdot 143 = 286$ $2 \cdot 71,5 = 143$
4, 5	$\frac{0,70}{2} = 0,35$	
7, 8	$\frac{1,40}{2} = 0,70$	
1—8	$0,25 + 0,35 + 0,12 + 0,70 = 1,42$	$\frac{1}{\frac{1}{400} + \frac{1}{286} + \frac{1}{825} + \frac{1}{143}} = 70 \text{ MVA}$
$x_{рез}$	$\frac{1,42 \cdot 1,67}{1,42 + 1,67} = 0,77$	$P_k = 70 + 60 = 130 \text{ MVA}$
$P_k$	$\frac{100}{0,77} = 130 \text{ MVA}$	$I_k^{(3)} = \frac{130 \cdot 10^3}{10,5 \sqrt{3}} = 7100 \text{ A}$
$I_k^{(3)}$	$\frac{130 \cdot 10^3}{10,5 \sqrt{3}} = 7100 \text{ A}$	

Таким образом, выражения для преобразования  $\Delta/\Delta$  при пользовании величиной  $P_k$  по структуре соответствуют формулам Кеннели для преобразования  $\Delta/\Delta$ , и наоборот.

Приведем пример расчета токов к. з. для случая, когда необходимо учитывать активное сопротивление, а именно — при к. з. в точке, находящейся за участком кабельной (или воздушной) линии, приключенной к шинам 10,5-kV схемы рис. 1, для которой выше была определена мощность к. з.  $P_k = 130$  MVA. Здесь необходимо оперировать с комплексными величинами сопротивлений и мощностей к. з.

$$\dot{Z}_{kab} = (r + jx)_{kab} = \left( \frac{0,0175 \cdot 10^3}{70} + j0,03 \right) \cdot 3 = 0,75 + j0,24 \Omega;$$

$$\dot{P}_{k_1} = \frac{\dot{U}^2}{\dot{Z}} = \frac{10,5^2}{0,75 + j0,24} = 133 - j43;$$

Сопоставление приемов выполнения расчета токов к. з. обоими способами и сравнение полученных результатов показывает, что число операций в обоих случаях примерно одно и то же, сложность вычислений практически одинакова, а точность при принятых одинаковых допущениях (приближенный учет коэффициентов трансформации и др.) получается одной и той же. Однако, введение нового понятия  $P_k$  облегчает уяснение физической стороны явления и проверку полученных результатов. В частности, при нахождении распределения потоков мощностей к. з. при повреждениях в той или иной точке схемы можно воспользоваться тем положением, что мощность к. з., протекающая по любому элементу, должна быть меньше его предельно пропускаемой мощности к. з.  $P_k$ .

Целесообразно узаконить для каждого из элементов оборудования, вводимых в расчетную схему, новый параметр  $P_k$ . В этом случае техника вычислений токов к. з. новым способом сокращается по сравнению с прежними способами, поскольку отпадает необходимость приведения заданных сопротивлений к базисным условиям и исключаются соответствующие вычислительные операции.

**Члену-корреспонденту Академии наук СССР К. А. Кругу**

*Глубокоуважаемый Карл Адольфович,*

В связи с 75-летием со дня Вашего рождения горячо приветствуем Вас, одного из старейших ученых-электротехников Советского Союза.

Широкой советской научно-технической общественности известны Ваши выдающиеся заслуги перед отечественной электротехникой и энергетикой. За 50 лет Вашей научно-педагогической деятельности Вы подготовили многочисленный отряд специалистов для электрохозяйства и электропромышленности СССР. Ваш капитальный труд „Основы электротехники“ является настольной книгой для каждого инженера-электрика.

С Вашим именем связано начало высшего электротехнического образования в Москве, основание и развитие электротехнического факультета Московского высшего технического училища, впоследствии преобразованного в Московский энергетический институт им. Молотова. После Великой Октябрьской социалистической революции Вы, по указанию В. И. Ленина, основали Всесоюзный электротехнический институт, являющийся и поныне одним из крупнейших научно-исследовательских институтов страны, и возглавляли этот Институт в течение 10 лет.

Вы принимали ближайшее участие в работах Государственной комиссии по электрификации России над созданием первого плана развития народного хозяйства СССР—ленинско-сталинского плана ГОЭЛРО—и вели руководящую работу по планированию электрификации в качестве члена Госплана СССР и члена Центрального электротехнического совета в течение 10 лет.

Вы во многом способствовали развитию в Академии Наук СССР исследований в области теоретической электротехники, электроэнергетики, электротехнической терминологии и др.

Правительство высоко оценило Ваши научные и педагогические заслуги, присвоив Вам звание заслуженного деятеля науки и техники и наградив Вас орденами Ленина, Трудового Красного Знамени, „Знак почета“ и медалями.

Выражаем Вам, дорогой Карл Адольфович, лучшие пожелания многих лет здоровья и успехов в дальнейшей столь же плодотворной работе на благо нашей Социалистической Родины.

*Отделение технических наук АН СССР  
Энергетический институт им. Кржижановского АН СССР  
Московский энергетический институт им. Молотова  
Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина  
Редакция журнала „Электричество“*



# Карл Адольфович Круг

*К 75-летию со дня рождения*

*Доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ*

Член - корреспондент Академии наук СССР Карл Адольфович Круг — один из старейших русских электротехников, основатель высшей электротехнической школы в Москве. Длительная и плодотворная деятельность К. А. Круга создала ему широкую известность и высокий авторитет в среде советских электротехников.

Карл Адольфович родился в Немирове (б. Подольской губ.) 6 июля 1873 г. После окончания Московского высшего технического училища (1898 г.) Карл Адольфович был направлен за границу на стипендию училища для получения специального электротехнического образования. Окончив в Дармштадте Политехнический институт (1900 г.), Карл Адольфович возвратился на родину и поступил для усовершенствования своих знаний по физике экстерном на физический факультет Московского университета, который окончил в 1903 г.

Со всей энергией Карл Адольфович начал работать в качестве инженера-электрика и преподавателя физики в высшей школе. Участвуя в разработке различных проектов электротехнических сооружений, он одновременно вел подготовку к созданию в МВТУ электротехнической специализации. В 1905 г. Карл Адольфович начал читать на механическом факультете МВТУ курс теории переменных токов. В 1907 г. там была установлена специализация в области электротехники. Это было началом организации преподавания в высшей школе в Москве электротехнических дисциплин. В 1911 г. К. А. Круг совершил поездку в Дармштадт для защиты докторской диссертации, посвященной применению круговых диаграмм.



В первые же годы Советской власти (1918 г.) в МВТУ был организован электротехнический факультет. Этот факультет стал одним из самых популярных, чему способствовало создание и осуществление ленинского-сталинского плана электрификации СССР. Молодежь с энтузиазмом включилась в строительство новых электростанций и предприятий электропромышленности. Деканом электротехнического факультета МВТУ с самого его основания был проф. К. А. Круг.

С именем К. А. Круга связано создание ВЭИ — первого крупного электротехнического научно-исследовательского института СССР. Карла Адольфовича не пугали трудности, которые пе-

реживала наша родина в первые годы после революции. Полный непоколебимой уверенности в возможности их преодоления К. А. Круг в декабре 1921 г. пишет письмо непосредственно В. И. Ленину, прося его о личной поддержке новому научно-исследовательскому институту. Владимир Ильич, проникательно видевший большие задачи, которые должны будут решать советские электротехники в новом социалистическом государстве, сразу оценил предложение К. А. Круга и институту были предоставлены партией и правительством большие возможности.

С новой энергией Карл Адольфович в раз директора ВЭИ развивает свою организаторскую и научную деятельность, разрабатывая наряду с этим проект строительства и оборудования лабораторий. Карл Адольфович лично внимал во все детали этого большого дела. Всем сотрудникам ВЭИ того периода запомнились удивительная энергия, настойчивость, организа-

торские способности Карла Адольфовича и его умение ставить задачи в самом большом масштабе. Работой по созданию ВЭИ К. А. Круг внес ценный вклад в развитие советской электротехники. В первые годы своего существования ВЭИ был особенно тесно связан с электротехническим факультетом МВТУ: и тот и другой возглавлялись К. А. Кругом; научными сотрудниками ВЭИ в основном были профессора и преподаватели МВТУ, а также инженеры, окончившие его электротехнический факультет. Затем, спустя непродолжительное время, кадры, выращенные на работе в ВЭИ, стали содействовать росту электротехнического факультета МВТУ: руководители многих кафедр этого факультета, превратившегося вскоре в самостоятельный институт (МЭИ), были выращены на экспериментальной и теоретической работе, выполнявшейся ими в качестве сотрудников ВЭИ и руководителей его лабораторий.

К. А. Круг давно стремился к созданию передовой научной электротехнической школы, базирующейся не только на учебных заведениях, но и на институтах научно-исследовательского типа, — школы, воспитывающей инженеров и ученых, способных самостоятельно решать большие задачи русской, советской электротехники. Ряд лет шла подготовка к решению проблемы о кадрах электротехников; во всей широте эта проблема была поставлена в 1930 г., когда неуклонное развитие ленинско-сталинского плана электрификации и индустриализации Советского Союза предъявило новые высокие требования к советским инженерам и ученым. В 1930 г. из состава МВТУ был выделен электромеханический факультет и на его основе был создан Московский энергетический институт, в котором К. А. Круг продолжает свою неутомимую деятельность.

Кафедра основ электротехники Московского ордена Ленина энергетического института им. Молотова, возглавляемая с ее основания К. А. Кругом, — одна из самых крупных электротехнических кафедр наших высших технических учебных заведений. Она явилась серьезной школой для многих выдающихся ученых: на кафедре основ электротехники работали академики К. И. Шенфер, В. С. Кулебакин, В. В. Шулейкин, заслуженные деятели науки и техники А. А. Глазун, А. П. Иванов, Г. Н. Петров и многие другие известные ученые; на кафедре у Карла Адольфовича всегда работало также много молодых ученых (ассистентов и аспирантов), привлекаемых высоким авторитетом ее руководителя.

Создание глубокой научной базы, необходимой для развития электротехники, является главной заслугой К. А. Круга. В этой области, помимо работы по организации высшего электротехнического образования и научно-исследовательского института и лабораторий, К. А. Кругу принадлежит еще один капитальный вклад — это его известная книга «О с н о в ы э л е к т р о т е х н и к и», уже выдержавшая шесть изданий

(1915—1946 гг.), последовательно перерабатывавшаяся и дополнявшаяся. По этой книге училось не одно поколение наших электротехников — инженеров, доцентов, профессоров; эта книга неизменно отражала в себе все то новое и основное, чем обогащалась быстро растущая наука об электричестве и его практическом инженерном приложении.

Следует отметить также чисто практическую деятельность К. А. Круга, связанную с развитием энергетики, электропромышленности и хозяйственной жизни нашей страны. В первые же годы Советской власти К. А. Круг принял участие в реконструкции отечественной промышленности и в плановом руководстве хозяйственной жизнью страны. В 1918 г. была издана книга К. А. Круга «Электрификация центрального промышленного района», являющаяся одной из пионерских работ среди изданий о социалистическом плановом хозяйстве. С 1920 г. Карл Адольфович участвует в работах комиссии ГОЭЛРО. Карл Адольфович был также членом Государственной плановой комиссии первого состава.

Партия и правительство высоко оценили деятельность Карла Адольфовича — ему присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники; он награжден двумя орденами Ленина, двумя орденами Трудового Красного Знамени и орденом «Знак почета».

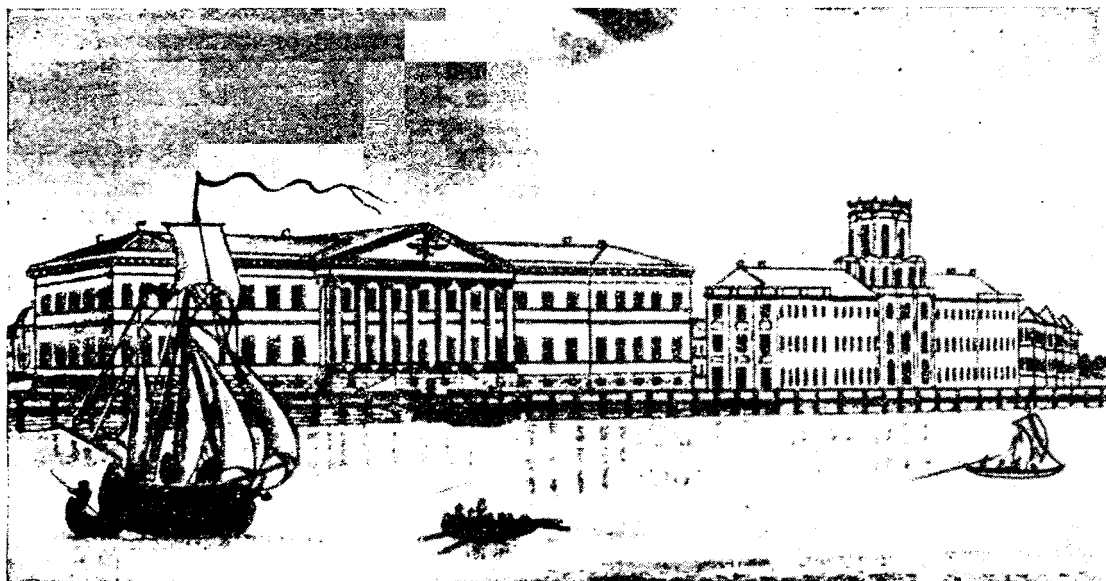
Значительная часть деятельности К. А. Круга связана также с Академией наук СССР, членом-корреспондентом которой он был избран в 1933 г.

Говоря о Карле Адольфовиче Круге в связи с его 75-летием, нельзя не отметить те высокие личные качества, которыми он обладает: неиссякаемая энергия, отсутствие консерватизма в научных концепциях и в преподавании. К. А. Круг всегда в курсе новых достижений науки и изучает новые дисциплины, соприкасающиеся с современной электротехникой. Все работающие с Карлом Адольфовичем высоко ценят его прямоту, объективность и высокую требовательность к своим сотрудникам и в первую очередь к себе.

Кроме основного фундаментального труда («Основы электротехники») К. А. Кругу принадлежит немало других печатных работ. В их числе: курс асинхронных двигателей (1915 г.); книга об электромагнитных процессах в управляемых ртутных выпрямителях (в этой работе 1935 г. К. А. Круг на несколько лет опередил исследователей, занимавшихся теми же вопросами за границей); ряд научных статей; два литографированных аспирантских курса — по теории электромагнитного поля (1940—1941 гг.) и по теории переходных процессов (1946 г.).

В 1948 г. Госэнергоиздат издал новую книгу К. А. Круга, посвященную теории нестационарных процессов. В этом же году выходит сборник задач по теоретическим основам электротехники, составленный коллективом кафедры, руководимой К. А. Кругом.





Вид здания Петербургской Академии наук в начале XIX в. (с литографии начала XIX в.).

*Научное наследство В. В. Петрова, замечательного русского физика-экспериментатора, достойного продолжателя великого Ломоносова, еще не изучено с достаточной полнотой. Большое значение его трудов, из которых наиболее выдающимся является открытие электрической дуги и ее возможных технических применений, привлекает все большее внимание исследователей истории физики и техники. Статья А. А. Елисеева, написанная для журнала «Электричество» и продолжающая его прежние работы о В. В. Петрове, основана на изучении подлинных документов и на новых архивных изысканиях, которые позволяют ярко охарактеризовать деятельность В. В. Петрова как первого русского электротехника.*

Академик С. И. Вавилов.

## Первый русский электротехник—В. В. Петров

*Кандидат физико-матем. наук А. А. ЕЛИСЕЕВ*

*Комиссия по истории Академии наук СССР*

Значение исследований Василия Владимировича Петрова (1761—1834) в развитии нашей отечественной науки, громадно и неоспоримо. В. В. Петров по справедливости называется первым русским электротехником. Открытая им в 1802 г. электрическая дуга навсегда обессмертила его имя. За последние годы советским ученым в результате архивных изысканий удалось более полно раскрыть облик этого многогранного ученого и патриота.

В лице В. В. Петрова в начале XIX в. наша страна имела не только первого русского электротехника, но и первого русского электрохимика, пионера в области изучения явлений люминесценции, выдающегося метеоролога и гидрофизика, химика, основоположника методики преподавания физики в России и основоположника физических кабинетов, обеспечивающих глубокое сочетание исследовательской работы с образцовой постановкой преподавания и самостоятельной работы учащихся.

В. В. Петров во всем следовал своему великому предшественнику, отцу русской науки М. В. Ломоносову: в настойчивости и неустанной жажде познания, в смелости и самостоятельности своей творческой работы, в мастерстве экспериментирования. Так же, как и Ломоносов, В. В. Петров считал, что наука в России должна создаваться прежде всего русскими людьми, что они должны возглавлять борьбу за национальные традиции в развитии своей отечественной науки. Так же как и для Ломоносова, для

В. В. Петрова Родина и наука были неразрывными понятиями. Свои книги он писал только на русском языке «наипаче для пользы тех читателей, которые живут в отдаленных от обеих столиц местах». Передовой ученый, В. В. Петров глубоко верил в силы и творчество русского народа и никогда не преклонялся перед западной наукой.

Сколько-нибудь полных биографических материалов о Василии Владимировиче Петрове пока обнаружить не удалось. Известно, что он родился 8 июля 1761 г. в семье священника, в уездном городе Обояни Курской губернии. Первоначальное образование получил в Харьковском коллегии, продолжив его с 1785 по 1788 г. в Петербургской учительской гимназии, где под руководством П. Галаровского с увлечением занимался физикой и химией. Не окончив гимназии, В. В. Петров в качестве учителя физики и математики был отправлен в Барнаул в Колывано-Воскресенскую горную школу. Спустя три года, он возвращается в Петербург и преподает физику в Инженерном кадетском училище. В 1795 г. при преобразовании этого училища в Медико-хирургическую академию В. В. Петров назначается экстраординарным профессором по физике и математике и работает в этом ведущем учебном заведении начала XIX в. в качестве профессора физики и руководителя созданного им лучшего физического кабинета в России до 1833 г., почти до конца своей жизни.

Много и настойчиво работая над изучением современной ему физико-химической литературы, В. В. Петров проводит ряд важнейших экспериментальных исследований и избирается в Академию Наук сначала членом-корреспондентом (1802), затем адъюнктом (1807), а позже экстраординарным (1809) и ординарным академиком (1815) по кафедре физики.

Многолетняя самоотверженная борьба за превращение физического кабинета Академии Наук в передовую современную физическую лабораторию не дала положительных результатов. Смелые начинания выдающегося ученого постоянно срывались чиновниками от науки.

Умер В. В. Петров 22 июля 1834 г., забытый полицейским строем Николая I, отстраненный от заведывания физическим кабинетом Академии Наук и от преподавания в Медико-хирургической академии. Желание друзей и товарищей В. В. Петрова почтить его память «приличными способами» начальством было отклонено. О работах В. В. Петрова забыли на целое столетие. И только теперь, в эпоху великого социалистического строительства, в нашей стране получили свое полное признание и классические исследования В. В. Петрова, и его выдающаяся многосторонняя творческая деятельность, тесно связанная с развитием отечественной науки и техники конца XVIII и начала XIX вв.

Борьба В. В. Петрова за создание физических кабинетов и за развитие преподавания физики. В конце XVIII и начале XIX вв. В. В. Петров выступил крупнейшим организатором русской физики и ее преподавания, непосредственным продолжателем смелых начинаний Ломоносова.

Организацию физического кабинета в Медико-хирургической академии Петров начал с 1795 г., после назначения его экстраординарным профессором по кафедре физико-математики. Основой кабинета послужила коллекция приборов, отобранных Петровым из анатомического кабинета Государственной медицинской коллегии, откуда им было взято все лучшее и необходимое для преподавания физики—оптические инструменты, магниты, «паровая огненная машина, стоившая не менее 1000 р.», и другие

приборы. В этом же году В. В. Петров через Медицинскую коллегию заказывает в Лондоне большое количество новых физических приборов на сумму 6000 руб., согласно тем сведениям, которые он имел о них по научной и учебной литературе. Приборы поступили в физический кабинет в 1796—1798 гг. Используя все возможности для приобретения новых приборов в самом Петербурге, В. В. Петров регулярно делает большие заказы на всевозможную аппаратуру стекольному заводу в Петербурге и привлекает к участию в изготовлении новых приборов некоторых петербургских мастеров.

К 1800 г. физический кабинет Медико-хирургической академии являлся не только образцовым кабинетом в педагогическом отношении, но представлял собой и неплохую физическую лабораторию для проведения отдельных экспериментальных исследований. Внимательно следя за развитием физики, Петров каждую новинку, каждый новый прибор сразу же приобретает и для своей лаборатории.

В 1801 г., когда в России стало более подробно известно об изобретении вольтова столба и замечательных опытах, проведенных с ним, Петров в этом же 1801 г. в своем представлении в Конференцию Медико-хирургической академии решительно ставит вопрос о необходимости приобретения гальванической батареи и для физического кабинета.

В 1802 г. физический кабинет Медико-хирургической академии благодаря удобному случаю обогатился богатой и разнообразной коллекцией приборов, полученных из физического кабинета московского любителя науки, графа Бутурлина. Этот кабинет, содержащий большое количество приборов, особенно по оптике и электричеству, был куплен для Медико-хирургической академии за 28 000 руб. Для этого времени это составляло громадную сумму.

Рост и расширение физического кабинета с момента его организации, а особенно в связи с приобретением большой коллекции физических приборов у Бутурлина, со всей необходимостью заставляли Петрова ставить вопрос и о новом помещении. В общем проекте зданий, постройка которых началась с 1798 г., были предусмотрены при участии В. В. Петрова помещения для физической лаборатории и специальные аудитории для преподавания опытной физики в здании учебных театров. В 1802 г. В. В. Петров в заседании Конференции представляет целый проект организации физической аудитории в новом отстраиваемом здании.

Он просит Конференцию: «... 2) Предписать архитектору сделать в сем театре такие ставни, посредством которых можно было бы скоро сделать его совершенно темным для производства фосфорических, некоторых электрических, гальванических и наконец оптических опытов... 3) пол сего театра и физического кабинета сделать как можно плотнее и покрыть толще выгодною краскою для надежнейшей безопасности от огня при производстве посредством оного различных опытов; 4) в сем же театре нужно бы сделать, хотя средней величины, печки, а именно плавильную и капельную под колпаком надлежащих измерений; 5) позволить в потолке оного театра, при щекатурении его, утвердить пар десять медных с винтами больших колец, для привешивания к ним шелковыми лентами электрических отводов...»

Некоторые из предложений В. В. Петрова были осуществлены, но далеко не все. По его предложению над зданием учебных театров была построена также обсерватория.

С 1803 г. физический кабинет Медико-хирургической академии долгие годы почти совсем не пополнялся новыми приобретениями. Но внутри его шла большая творческая работа. Своими руками и путем привлечения мастеров Петров организует большую работу по созданию новых физических приборов и ремонту старых. Приведем примеры. В 1804 г. указом Государственной медицинской коллегии в физический кабинет принимается «представленная профессором электрическая машина по личному гг. членов усмотрению оказавшаяся строения правильного и работы порядочной». Эта машина была самостоятельно сконструирована Петровым для предпринятого им изучения электрических явлений. Опыты, проведенные с ней, подробно описаны им в книге «Новые электрические опыты» [Л. 3]. В этом же году другим указом из Коллегии

## СОБРАНИЕ

### ФИЗИКОХИМИЧЕСКИХ НОВЫХ

### ОПЫТОВ И НАБЛЮДЕНИИ

*Василия Петрова,*

*Профессора Физики*

*при Академиях Санктпетербургской*

*Медикохирургической и свободных*

*Художествъ.*

### ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

*ВЪ САНКТПЕТЕРБУРГѢ,*

*Въ Типографіи Государственной Медикохирургической Коллегии, 1801 года.*

было предписано «принять и причислить к прочим физическим инструментам Медико-хирургической академии сделанный по начертанию проф. Петрова электрофор новой конструкции».

По заданию Петрова, проявившего себя замечательным мастером и конструктором, в эти годы переделываются и многие другие физические приборы, необходимые для демонстрации опытов. Их старые конструкции изменяются и заменяются более простыми и удобными, с таким расчетом, чтобы каждый физический прибор был наиболее наглядным и эффективным в опытных демонстрациях. Реконструируется заново большая электрическая машина, купленная у Бутурлина, с диаметром стеклянного круга в 40 английских дюймов (1 м) и медным кондуктором в 5 футов длины и 5 дюймов в диаметре. Мотивируя перед Конференцией необходимость ремонта этой машины, Петров указывает, что «так как в физическом кабинете упомянутой Академии находятся такие электрические приборы, для производства коими опытов требуется весьма сильное электричество, то очень было бы полезно для обучающегося физике юношества, если бы объявленная машина была переправлена». Далее следует целый план новой конструкции машины. Оставляется только стеклянный круг и кондуктор. Остальное все изменяется. Петров считает нужным оставить машину «без всяких украшений, со многими остроконечьями, через которые значное количество электричества уходит в воздух». Предусматривается и новая надежная изоляция всех основных частей машины. Согласно на переделку машины было получено, и через 7 мес., в сентябре 1806 г. Петров мог уже рапортовать: «Электрическая машина, купленная с прочими физическими инструментами у графа Дмитрия Петровича Бутурлина, переделана мастером Роспичи сходно с моим о переправке ее представлением, сделанным сего же года января 26 дня. Испытывая действие сей машины при сухом и не весьма теплом воздухе, находил я оные столь сильными, что из кондуктора выскакивали почти беспрерывно большие искры в медный поларованный шар, поставленный от него в расстоянии шести и восьми дюймов, а изредка выскакивали большие искры в размере десяти с половиной и даже десяти дюймов; при самом же сухом и холодноватом воздухе можно ожидать еще сильнейших действий от сей машины, переправка коей, следовательно, произвела сильнейший успех. Кроме переправки объявленной машины, сделаны также и вновь четыре новых прибора, означенных в моем представлении».

Физический кабинет, созданный В. В. Петровым, уже в начале XIX в. являлся лучшим физическим кабинетом в России.

К 1833 г., к концу деятельности В. В. Петрова в Медико-хирургической академии, физический кабинет имел 631 прибор, из них: математических—26, по механике твердых тел—20, по астрономии—11, по притяжению и сцеплению—16, по воздуху и газам—80, по акустике—8, по гидравлике—18, по воде—13, по теплоту—17, по оптике—166, по магнетизму—54, по электричеству—198.

Свое ведущее учебное значение физический кабинет Медико-хирургической академии, руководимый В. В. Петровым, сохранил до конца его педагогической деятельности.

С первых же лет своей педагогической деятельности в Медико-хирургической академии В. В. Петров резко выделялся среди профессорско-преподавательского состава своими твердыми установками в отношении преподавания, своей дисциплины—опытной физики. Будучи убежденным экспериментатором В. Н. Петров все делал для того, чтобы экспериментальный метод ввести в преподавание своего предмета.

Преподавание физики В. В. Петровым сказалось и на выборе некоторых диссертаций, введенных в Медико-хирургической академии с 1801 г.

Характерно, что первая диссертация и докторскую степень, представленная лекарем Саввой Большим была связана с применением электричества в медицине. Первым официальным оппонентом Конференции «избрала, сообразно предмету, имеющему возражать, профессора физики Петрова» Защита диссертации проходила по особой, заранее выработанной и одобренной Конференцией, программе.

Позже Саввой Большим была издана специальная работа по теории электричества.

В качестве официального оппонента Петров выступил при защите диссертаций и других своих учеников: Григорьева и Евсевия Покровского, темы которых были связаны с изучением и практическим использованием электричества в медицине.

Подготовка диссертантов проходила под непосредственным руководством В. В. Петрова, а их практическая работа проводилась в физическом кабинете. Евсевий Покровский в дальнейшем, при посылке за границу, своим основным предметом избирает физико-математику.

Одним из блестящих учеников В. В. Петрова являлся И. Х. Гамель, окончивший Медико-хирургическую академию в 1811 г. Еще будучи студентом, Гамель, чрезвычайно интересуется электрохимией, изобретает особую электрическую машину и в физическом кабинете Медико-хирургической академии, под руководством В. В. Петрова, проводит интереснейшие опыты над разложением селенной гальваническим током. Насколько значительны были исследования Гамеля, можно судить по тому, что уже в 1813 г. он избирается членом-корреспондентом Академии наук.

Много занимался В. В. Петров и вопросами учебной литературы. Большая часть переводных учебников того времени по физике его не удовлетворяла ни по содержанию, ни по форме изложения. В архивных материалах сохранилась интересная докладная записка Петрова от 18 сентября 1804 г. «О способе преподавания физики и математики», адресованная им в Конференцию Медико-хирургической академии. Эта записка дает возможность четко выяснить и его отношение к существующей учебной литературе по физике и те научные и методические требования, которые он выдвигал перед авторами учебников.

«При сем за нужное предпочитаю,—писал Петров,—изъясниться еще и о том, что хотя ныне и есть несколько физических сочинений на Российском языке, каковы суть: Эбергарда, сокращенная Мушенбрека, Эрксслебена, академика Крафта, Гиларовского, Кузена и Бриссона, однако, я не нахожу ни одного из них выгодным для казенного употребления при здешней Медико-хирургической академии; поелику в сих сочинениях изъясняются причины весьма многих явлений несогласно с объяснениями нынешних физиков, кроме сего и оных сочинения довольно и таких предметов, которым заниматься невозможно по краткости времени, назначенного для окончания физического курса при упомянутой академии...

Хотя я, во исполнение предписания прежде упомянутой Коллегии, при преподавании должен сперва прилежаться порядку физики Гиларовского, а потом академика Крафта; но ради вышеозначенных причин напоследок мне было позволено преподавать физику по собственному моему письменному предостову, ибо я преподавал сию науку с прошедшего 1793 г. при здешнем Главном Врачебном Училище, а ныне Медико-хирургической академии, старался собирать оную из лучших прежних и новейших авторов и приводить предмет в такой порядок, какой находил я выгоднейшим для пользы учащихся. И собранная мною доселе физика заключает в себе следующие главы: 1) введение в сию науку, 2) об общих свойствах всех тел, 3) о воздухе, 4) о газах, 5) о звуке, 6) о ветрах, 7) о гидростатике, 8) о гидравлике, 9) о воде, 10) о теплотворном веществе, 11) о свете, 12) о магнитном веществе, 13) об электричестве, 14) о гальванизме, 15) о воздушных метеорах или явлениях, 16) о светящихся явлениях, 17) об огненных явлениях, 18) о системе или строении мира. И как по моему мнению знание многочисленных предметов, содержащихся в восемнадцати упомянутых статьях, было достаточно для молодых людей, предназначенных быть врачами, то я охотно желал бы, чтобы физика, которую собирал я около девяти лет, была бы напечатана казенным изданием для учащихся при Медико-хирургической академии».

Учебное руководство, составленное Петровым, к большому сожалению, в архиве найти не удалось. План и методические основы этого руководства свидетельствуют о самостоятельном творческом пути, избранном В. В. Петровым в изучении и преподавании физики как дисциплины и в критическом пересмотре существующей учебной литературы, произведенном ученым-новатором.

Научные работы Петрова, написанные им популярно и интересно, являлись лучшими пособиями по физике в России начала XIX в. В них в сжатом, но исчерпывающем изложении даны все предшествующие работы ученых и блестяще изложены современное состояние вопроса и основные исследовательские работы самого автора.

В 1807 г. В. В. Петров был избран адъюнктом по кафедре физики в Академии Наук. Не имея возможности организовать исследовательскую работу в Медико-хирургической академии, Петров решил отдать свои силы, знания и незаурядные организаторские способности делу организации хорошо оборудованной физической лаборатории в Академии наук с тем, чтобы поставить и провести в ней ряд новейших исследований по физике. В том же 1807 г. В. В. Петров потребовал в Конференции покупки приборов, нужных ему, как он писал, «для производства новых физико-химических опытов, которыми заниматься весьма хотю я желаю для пользы науки и приспособления их к полезным употреблением в общежитии». Требование ученого не было выполнено.

Оставаясь формально руководителем кафедры физики в физическом кабинете, академик Крафт до 1810 г. даже не допускал Петрова в физический кабинет, хотя сам, занятый обязанностями воспитателя при великих князьях в Гатчине и Павловске, физическому кабинету не уделяет должного внимания. С 1813 по 1824 г. на физический кабинет Академии не отпускается ни одной копейки. И если в это время поддерживалась жизнь кабинета, то только благодаря личной заботе Петрова и личным его затратам. Исследовательскую экспериментальную работу ученый вынужден был вести дома или в физическом кабинете Медико-хирургической академии. Многочисленные рапорты Петрова оставались безрезультатными. «В физическом кабинете, — писал Петров в 1818 г., — умалчивая о прочих его недостатках, не было и доселе нет так называемых гидростатических и вообще никаких весов, без которых невозможно сыскать удельного веса тел, в чем нередко встречается надобность».

Полностью отдавая себя науке, Петров особо болезненно переживал те трудности, которые были связаны с созданием физического кабинета Академии Наук. Любимому делу он был готов отдать все свои силы. «Для достижения столь полезной цели, — писал в этом заявлении Петров, — я душевно рад и всегда готов жертвовать моими трудами, какие бы потребовались в сем отношении».

В 1822 г. в обширном заявлении в Конференцию Академии наук Петров вновь пишет: «Самая справедливость позволяет мне здесь объяснить, что Физический кабинет Академии Наук, первейшего в обширной империи ученого заведения, принадлежит к самым недостаточным, ибо он состоит только из старинных инструментов, относящихся к статье о воздухе, самых обыкновенных к статье о газах, о свете и электричестве, и при том между ними находятся дублиеты и даже гораздо более нежели дублиеты».

Итак, для существенной пользы физики, также и самой чести Академии Наук, поставляю моим долгом покорнейше просить Учебное собрание, дабы оно благоволило обратить свое внимание на обогащение Физического кабинета сей Академии, хотя нужнейшими и дешевейшими прочими пособиями, которые в нынешнем столетии были употреблены для новых достопримечательнейших и весьма полезных открытий в физике...».

В. В. Петров указывает на необходимость приобретения (в числе других приборов) аппаратов для наблюдения явления поляризации света, для производства электромагнитных опытов Эрстеда, Ампера, Био и других.

Предложение ученого не было выполнено. Физический кабинет попрежнему оставался в бедственном состоянии.

В 1824 г. В. В. Петров запросил Конференцию выпустить ряд книг по физике и, в частности, опубликованные работы Эрстеда, Араго, Ампера, Дэви, Био и других видных творцов науки того периода.

В 1824 г. поступило новое заявление В. В. Петрова в Комитет правления и в Конференцию Академии Наук с прямым указанием на то, что ему приходится тратить на расходы по физическому кабинету собственные деньги и что за неимением новых приборов он вынужден не заниматься новыми исследованиями.

Долгие годы жизни замечательного ученого проходили в упорной и безрезультатной борьбе с косностью и рутинной академической обстановки, поддерживаемой и культивируемой с 1818 г. президентом Академии реакционером Уваровым. В 1827 г. Петров от заведывания физическим кабинетом был отстранен. Непокорный, настойчивый, правдивый, всегда имеющий свое мнение, Петров приходился не по душе президенту. Уваров имел возможность несколько раз слушать возражения ученого и нежелание его считаться с знатным родом, титулами и чинами президента. Интересен в связи с этим и сам факт увольнения Петрова. Вынужденный написать свой «отказ» от заведывания физическим кабинетом Петров желал только одного, чтобы Конференция в полном ее составе посетила физический кабинет и удостоверилась в полном порядке, чистоте, аккуратном и бережном хранении физических приборов. Это требование Петрова президент отклонил. Настойчивый ученый в ответ на это отказал посланному президентом академику Фусу в выдаче ключей от физического кабинета. Тогда президент, используя свою власть, как незаурядный жандарм, приказал Фусу «пригласить к себе члена комитета г-на академика Коллинса и в присутствии его открыть физический кабинет посредством слесарного мастера», — «запечатать шкафы вашими печатями» и «мне о последствиях донести».

Так была учинена реакционером Уваровым расправа над крупнейшим русским ученым В. В. Петровым, отдавшим всю свою жизнь делу науки и просвещению русского народа.

«Гальвани-вольтовские опыты» В. В. Петрова и открытие электрической дуги. Начальный период развития электротехники в России почти не изучен. Между тем, обнаруженные нами архивные материалы убедительно показывают, что наша страна уже в первые годы XIX в. располагала самыми крупными гальваническими батареями в мире, и поэтому не случайно, что на заре развития электротехники именно Россия стала родиной ряда выдающихся исследований и открытий в этой области.

Известие об открытии А. Вольта первом генераторе электрического тока — «вольтовом столбе» появилось впервые в печати в Англии в 1800 г. В этом же году информация об открытии вольтова столба была получена и в Петербурге. 20 октября 1800 г. русский посланник в Гааге Д. А. Голицын в своем письме в Академию наук писал: «Гальванисты открыли весьма любопытное электрическое явление. Цинковые и серебряные пластинки, положенные попеременно друг на друга и отделенные друг от друга слегка смоченной фланелью, производят толчок и даже электрические искры». В сентябре 1801 г. А. А. Мусин-Пушкин, замечательный русский исследователь в области химии, физики и минералогии, впервые на заседании Конференции Академии наук «с помощью нескольких опытов показал гальванические явления, пользуясь для этой цели столбцом, составленным из 150 серебряных пластинок, из такого же количества цинковых и из такого же количества кусков шерсти, смоченных в растворе обыкновенной соли». Этому важнейшему событию в научной жизни страны Академия наук придала большое значение и сразу же опубликовала подробный отчет об опытах А. А. Мусина-Пушкина в Санкт-Петербургских ведомостях.

Как показывают архивные материалы, многие ученые и любители наук после этой информации решили завести гальванические батареи и заняться исследованиями в этой новой области науки. В продаже (в Петербурге и в Москве) появились медные и цинковые кружки. В октябре 1801 г. «для наглядного показа разложения воды» петербургский академик Л. Ю. Крафт заказывает батарею для руководимого им физического кабинета Академии наук из 120 пар медных и цинковых кружков. А. А. Мусин-Пушкин создает «гальванический столб, состоящий из 3 000 пластинок и производящий изумительные действия». С ноября 1801 г. связано и начало изготовления крупнейшей в мире гальванической батареи, ставшей исторической по своим размерам и по тем исключительным результатам, которые были достигнуты при экспериментировании с ней. Это была батарея В. В. Петрова.

По мотивированному заявлению В. В. Петрова было решено:

«Поелику опыты над гальванизмом ныне сделались достопримечательными в различных отношениях, а между всеми учебными пособиями, находящимися при сей Медико-хирургической академии, доселе еще нет вовсе никаких приборов, относительных к сему предмету, то Конференция наша нужным приобрести для оной такой гальванический прибор, посредством которого было бы можно производить самые новые физико-медико-химические опыты, которыми многие европейские физики начинают теперь заниматься гораздо с большим прежнего рачением... И сей гальванический прибор был бы таков, который соответствовал бы назначению полезного его употребления при сей Академии, которому подобного, вероятно, не имел бы никто из здешних господ для частного своего употребления и посредством которого можно было бы производить не только уже известные достопримечательнейшие физико-медико-химические опыты, но и с надежнейшим успехом заниматься новыми исследованиями».

Сам текст этой протокольной записи свидетельствует о том, какое громадное научное и практическое значение придавал В. В. Петров и Конференция изучению гальванизма.

В апреле 1802 г. «огромная наипаче баттерей», состоявшая из 4200 пар медных и цинковых кружков, была готова со всеми принадлежностями. Она была расположена четырьмя горизонтальными рядами, каждый длиной 3,3 м, с диаметром кружков 3,5 см и толщиной около 3 мм. Такого большого размера батарей нигде в то время в мире не было. Самая крупная гальваническая батарея в Англии, с которой с 1810 г. стал экспериментировать Дэви, состояла из 2000 пар пластинок. Чрезвычайно интересным в этой связи является факт, говорящий о том, что в начале 1802 г. в Петербурге «Одна группа составила проект путем подписки, гальванической батареей из 30 тысяч медных и такого же количества цинковых пластинок» и представила его на рассмотрение Академии наук. Никаких материалов об осуществлении этого проекта пока обнаружить не удалось, но сама смелость и творческое дерзание наших отечественных ученых, выступавших с такими проектами, говорит о том, что уже в первые годы XIX в. буквально на заре развития отечественной электротехники русские ученые являлись подлинными новаторами в изучении электрического тока и в изыскании путей его практического применения. Главой и руководителем этой группы был В. В. Петров.

«Продолжатель заложенных Ломоносовым экспериментальных традиций в Академии наук, Василий Владимирович Петров, — пишет В. И. Никитин [Л. 4], — внес ценнейший вклад в ряд разделов науки — электричество, оптика, химия, метеорология. Он первый построил самую большую для того времени электрическую батарею, открыл и описал явление электрической дуги за несколько лет до английского физика Г. Дэви. Свои замечательные опыты В. В. Петров опубликовал в 1803 г. в книге «Известия о гальвани-вольтовых опытах...»

Эта книга [Л. 2] явилась первым и единственным пособием по гальванизму на русском языке в начале XIX в.

В предисловии к своей работе Петров пишет:

«Многочисленные, поучительные и весьма любопытные опыты, сделанные наипаче с прошедшего 1800 г., посредством так называемого Вольтова столбика (la pile, la colonne de Volta, который буду я именовать гальвани-вольтовскою баттереею, а Гальванизм — гальвани-вольтовскою жидкостью, в честь как Гальвани, так и совою купно Вольты, усовершенствовавшего оный чрезвычайно важный физико-химический инструмент), возбуждали весьма сильное во мне желание иметь столь выгодную и такой огромной величины сию баттерей, чтоб оною можно было надежнее производить такие новые опыты, о получении счастливого успеха в которых я сомневался от употребления таких обыкновенных баттерей, о каковых доселе объявляется во всех известных мне иностранных сочинениях.

А когда, вследствие моего представления, Государственная Медицинская Коллегия определила достаточную сумму на желанную мною огромной величины баттерей, с различными приборами для употребления при Санкт-Петербургской Медико-хирургической Академии, и когда все ее принадлежности были в готовности, минувшего 1802 г. в апреле месяце; то я сперва повторял достопримечатель-

## ИЗВѢСТІЕ

О

ГАЛЬВАНИ - ВОЛЬТОВСКИХЪ

ОПЫТАХЪ,

которые производилъ

Профессоръ Физики Василий Петровъ,

посредствомъ огромной наипаче баттерей, состоявшей некогда изъ 4200

медныхъ и цинковыхъ кружковъ, и находящейся при Санкт - Петербургской

Медико - Хирургической Академіи.

ВЪ САНКТ-ПЕТЕРБУРГѢ,

Въ Типографіи Государственной Медицинской Коллегіи, 1803 года.

нейшие и уже известные опыты других физиков, а сами старался производить и новые или такие опыты, о которых доселе не имел никакого известия».

Забываясь о том, чтобы изучение гальвани-вольтовского электричества и явлений, связанных с ним, было доступно широким кругам любителей науки из народа, Петров свою работу пишет популярно и интересно.

«Поелику же, сколько мне известно, — пишет он в предисловии, — доселе никто еще на Российском языке не издал в свете и краткого сочинения о явлениях, происходящих от гальвани-вольтовской жидкости; то я для того своим поставил описать по-русски и расположить в надлежащем порядке деланные самим мною важнейшие и любопытнейшие опыты посредством гальвани-вольтовской баттерей. Но прежде, нежели я приступлю к описанию самых опытов, за нужное почитаю предположить оным сперва изъяснение приготовления и употребления гальвани-вольтовских баттерей, а после и самые средства чистить составные их металлические части, с некоторыми примечаниями, наипаче для пользы тех читателей, которые живут в отдаленных от обеих Столиц местах и которые не имели случая приобрести нужного понятия о сих предметах».

Первую главу своей работы В. В. Петров поэтому озаглавливает так: «О составлении и употреблении гальвани-вольтовских баттерей».

При прочтении этой главы не остается ни одного неясного вопроса. Начиная с подбора металлических кружков, с указанием их размеров, качества и цены, способ составления наштампы и сборки самой баттерей и кончая предосторожностями в отношении ее изоляции и т. д. — все эти вопросы изложены с тщательно продуманной методической последовательностью.

«При покупке металлических кружков для гальвани-вольтовской баттерей, — пишет В. В. Петров, — нужно обращать внимание на их толщину и гладкость

они должны быть толщиной по крайней мере в одну линию, дабы крепче могли держаться в своих местах в продолжение их чистки и не очень скоро истончались от оного; как медные, так и цинковые кружки должны быть сколько можно гладки с обеих сторон; поелику от плотнейшего весьма гладких кружков соприкосновения с мокрыми бумажными кружками происходит сильнее действие батареи, нежели от употребления негладких; кроме сего, весьма гладкие кружки чистятся лучше и скорее негладких. Для сих причин выгоднее было бы покупать или по заказу делать медные и цинковые кружки, хорошо выполированные с обеих сторон».

Далее следует описание приготовления бумажных кружков. Это дано, пишется в разъяснении, по той причине, что не всегда можно «получить оные за деньги». Теперь, имея весь наличный материал «медные, цинковые и бумажные кружки», следует указание и о том, как составлять батарею.

Подробно развивая вопрос о самом способе составления батарей из небольшого числа кружков и батарей, состоящих из нескольких сотен и тысяч таковых, автор выдвигает два таких способа. В первом случае он рекомендует составление вертикального столба, во втором—горизонтального.

Он пишет: «Хотя все почти иностранные Физики, сколько мне известно, доселе употребляют описанное вертикальное гальвани-вольтовских батарей расположение, однако с употреблением оного сопряжены два довольно важные неудобства: во-первых, весьма затруднительно составлять таким образом батарею из нескольких тысяч слоев металлических и бумажных кружков, а во-вторых известно еще из опытов и то, что при употреблении двух сот только их слоев, тяжестью верхних скоро выжимается из нижних бумажных кружков большее или меньшее количество жидкости, с уменьшением коея постепенно слабее становится и самое действие гальвани-вольтовой батареи».

Для отвращения же объявленных и, может быть, еще других каких неудобств, сопряженных с вертикальным расположением батарей, выдуманно употребление параллельного их с горизонтом расположения...»

Все предыдущее касалось общих указаний относительно различных предварительных приготовлений и технических составлений батарей вообще. Далее автор дает подробное описание приготовления своей батареи.

Все тонкие и продуманные предосторожности автор вводит для единственной цели, а именно, для получения сильнейшего действия батарей.

Непосредственным продолжением первой является следующая глава «О средствах чистки составных гальвани-вольтовой батарей металлических частей, превращающихся в оксид на поверхности».

Вопрос о чистке кружков батареи имел, несомненно, громадное значение для экспериментатора, особенно при пользовании большими батареями. Опыт иностранных ученых в данной области был недостаточен, и В. В. Петрову пришлось внести много новых ценных усовершенствований. В описании механических и химических способов чистки металлических кружков он дает не только способы составления различных рецептов, но популярно излагает самую методику и технику чистки.

Если принять во внимание, что это писалось в 1802 г., когда еще не была разработана методика составления батарей и работы с ними, а в России об открытиях Вольта только слышали и то немногие, то станет ясным все значение указаний В. В. Петрова по этому вопросу.

Книга В. В. Петрова, исключая предисловия, состоит из 8 глав и прибавления:

**«Статья I.** О составлении и употреблении гальвани-вольтовских батарей.

**Статья II.** О средствах чистки составных гальвани-вольтовой батареи металлических частей, превращающихся в оксид на поверхности.

**Статья III.** О разрешении воды, алкоголя и выжатых масел посредством металлов, некоторых других тел и гальвани-вольтовой жидкости.

**Статья IV.** О действиях гальвани-вольтовой жидкости на тела живых особливо животных.

**Статья V.** О переменах количества и качества атмосферного воздуха от гальвани-вольтовой жидкости.

**Статья VI.** О некоторых светящихся явлениях, происходящих от гальвани-вольтовой жидкости.

**Статья VII.** О расплавлении и сжигании металлов и многих других горючих тел, также о превращении в металлы некоторых металлических оксидов посредством гальвани-вольтовой жидкости.

**Статья VIII.** О светящихся явлениях и сжигании многосложных твердых горючих тел посредством гальвани-вольтовой жидкости в безвоздушном месте.

**Прибавление.** О различии в безвоздушном месте, также и в атмосферном воздухе между светящимися явлениями и некоторыми другими действиями гальвани-вольтовой и электрической жидкости».

О первых двух главах уже было сказано раньше. Последующие шесть глав представляют собой развернутую картину многочисленных и интересных опытов, которые выполнил В. В. Петров со своей «огромной» наипаче батереей». Здесь в последовательном изложении дано: описание опытов над разложением (электролизом) воды, алкоголя и выжатых масел в вольтметре; исследование влияния на это разложение температуры; определение минимального числа пар кружков, необходимого для разложения воды; опыты над электризацией животных, рыб и применение тока к терапии, исследование изменения количества и качества атмосферного воздуха от гальванического тока и т. д. Много оригинального читатель найдет в описании различных опытов, сопровождающихся появлением света и теплоты от гальвани-вольтовой батареи. Сюда относятся также наблюдения над явлением свечения в неразлагающихся жидкостях.

Интересные опыты были проведены В. В. Петровым по разложению (электролизу) окислов металлов (ртути, свинца, олова и т. д.), при проведении которых он выделил из этих окислов самые металлы. Им же было проведено разложение растительного масла и алкоголя, а в процессе опытов и отдельно было замечено под действием электрического тока свертывание белка и створаживание молока.

Много опытов провел В. В. Петров по изучению действия гальванического тока и на живые организмы. Например, рыбы в аквариуме при пропускании электрического тока обнаруживали явные признаки затрудненного дыхания и засыпали, а при перерыве подачи тока вздрагивали. Тело кролика, покрытое сухой шерстью, не обнаруживало никакого действия, будучи сообщено с полюсами батареи. Пропуская ток от своей батареи через собственное тело, В. В. Петров не почувствовал никаких пагубных последствий, кроме мгновенных неприятных ощущений.

Новым во всех опытах В. В. Петрова является и то, что он впервые применил изоляцию проводников. Об этом он сам говорит в следующих словах: «На последок между новостями, относящимися к сей же материи, можно почитать и выдуманное мною употребление металлических проволок, покрытых сургучом или воском, кроме одного только их кончика, посредством коего гальвани-вольтовая жидкость может переходить в состав таких тел, которые должны заключаться быть в стеклянные с водою трубки». Впервые Петров отмечает также и влияние размеров проводника на его проводимость, предвосхищая за 30 лет будущее открытие закона Ома. Но важнейший опыт Петрова в указанной работе—это открытие электрической дуги.

Электрическая дуга, позже исторически не совсем справедливо названная вольтовой дугой, была открыта в 1802 г. в Петербурге В. В. Петровым. Это важнейшее открытие в истории электротехники всецело принадлежит России, и в интересах исторической справедливости вольтову дугу следовало бы впредь называть «электрическая дуга Петрова».

В статье VII под заглавием «О расплавлении и сжигании металлов и многих других горючих тел, также о превращении в металлы некоторых металлических оксидов посредством гальвани-вольтовой жидкости». В. В. Петров дает описание явления полученной им электрической дуги и своими опытами указывает на возможность применения этого явления для целей освещения, электросварки и электрометаллургии.



«Естьли на стеклянную плитку,—пишет В. В. Петров,—или на скамеечку со стеклянными ножками будут положены два или три древесных угля, способных для произведения световосных явлений посредством гальвани-вольтовской жидкости, и естьли потом металлическими направителями (directores), сообщенными с обоими полюсами огромной батареи, приближает оные один к другому на расстояние от одной до трех линий, то является между ними весьма яркий белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медлительнее загораются и от которого темный покой довольно ясно освещен быть может». В этом кратком абзаце мы находим сообщение об открытии электрической дуги и указание на возможность использования электрической дуги в качестве источника электрического освещения.

Заменяя один из углей металлической проволокой или металлом, В. В. Петров пришел также и к другому открытию, связанному с применением электрической дуги для плавки металлов и для электросварки. «Когда, вместо одного угля,—пишет он,—будет употреблена изолированная и сообщенная с одним полюсом огромной батареи проволока с припаянным к одному ее концу того же или особого металла маленьким конусом, или только с закругленным концом, а к нему приспособлены, через легчайшее орошение его чистою водою, куски листового олова, серебра, золота и цинка так, чтоб они висели в воздухе, а после будут подносимы к углю, положенному на стеклянную плитку или на скамеечку со стеклянными ножками, и сообщенному, посредством цепочки или шнурка из серебряной книппели, с другим полюсом батареи; то между нами является больше или меньше яркое пламя, от которого сии металлы иногда мгновенно расплавляются...».

Изучая процессы, происходящие с окислами металлов в пламени электрической дуги, В. В. Петров впервые указал на возможность применения электрического тока для металлургических процессов, т. е. на возможность восстановления металлов из окислов металлов. «Напоследок,—пишет В. В. Петров,—посредством огня, сопровождающего течение гальвани-вольтовской жидкости, при употреблении огромной батареи, пытал я превращать красные свинцовый и ртутный, также и сероватый оловянный оксиды в металлический вид; следствия же сих опытов были такие, что упомянутые оксиды, смешанные с порошком древесных углей, салом и выжатыми маслами, при сгорании сих горючих тел иногда с пламенем, принимали настоящий металлический вид...».

Являясь в высшей степени искусным экспериментатором, В. В. Петров в ряде опытов также наблюдал накаливание металлической проволоки под действием тепловых действий электрического тока.

Некоторые историки физики долгое время приписывали открытие электрической дуги Г. Дэви. Это исторически совсем неверно, так как первые описание явления электрической дуги Г. Дэви дал в своей книге «Элементы философии химии», опубликованной в Лондоне в 1812 г., т. е. на 9 лет позже В. В. Петрова.

До последнего времени было неизвестно, знала ли Западная Европа об открытии в России электрической дуги. Сейчас удалось точно установить, что Петербургская академия наук об этом открытии сообщила письменно в 1804 г. в своем печатном объявлении к конкурсной задаче о природе света, предлагая распространить эту теорию и на «гальванический огонь, ослепительный блеск коего в случае больших вольтовых столбов и обугленных веществ, до известной степени подобен солнечному свету». Имя В. В. Петрова при этом нигде не упоминалось. В последнее время удалось также выявить статью русского академика Л. Ю. Крафта на тему «О гальванических опытах», опубликованную в Санкт-Петербургских ведомостях в 1802 г., т. е. примерно на год с лишним раньше выхода из печати книги В. В. Петрова, в которой также дается описание и электрической дуги. Сообщая о других опытах и останавливаясь на этом открытии, Л. Ю. Крафт писал: «...упомяну здесь только о том, что между двумя угольным соединенными с обоими концами столбца, является про-

должительный огонь толщиной с палец, которым можно зажечь свечу, бумагу и другие горящие вещества, производится такой свет, что всякие малые предметы ясно видны». В начале своей статьи Л. Ю. Крафт, говоря о значении вольтова столба, выражал уверенность в том, что при дальнейших успехах в области гальванизма «можно будет с пользою употреблять гальванизм в металлургических и ремесленных производствах».

По существу описания Л. Ю. Крафтом электрической дуги следует сказать, что он описал открытие, сделанное В. В. Петровым, хотя вообще не исключена возможность, что подобное открытие он сделал и одновременно с В. В. Петровым, экспериментируя с его батареями в то время, когда она еще изготовлялась в мастерской петербургского механика Меджера.

Открытие электрической дуги ставит работы В. В. Петрова в тесную связь со всей последующей историей развития электрического освещения. Изыскивая всевозможные пути применения электрической дуги для своих исследований, в частности, для сжигания тел в безвоздушном пространстве, В. В. Петров проводит интересные для истории электрического освещения опыты.

Сближая под колоколом воздушного насоса иглою дном перевернутого серебряного стакана, соединенным с полюсами «огромной» батареи, Петров не мог заметить появления света до тех пор, пока расстояние между ними не дошло до одной линии. При расстоянии в одну линию между концом появилось «светоясное вещество или пламя кутно с теплотворным веществом», и иголка раскалялась по всей длине.

При впуске воздуха свечение совершенно прекращалось, но при возобновлении разрежения появлялось вновь. Оставляя на одной проволоке иглою и присоединяя к другой большой древесный уголь В. В. Петров при надлежащей степени разреженности, получал как от конца иголки, так и от угля «сильнейший прежнего свет», с таким количеством теплотворного вещества, что от него вся иголка делалась раскаленною, но горения угля обнаружено не было. С впуском воздуха свечение прекращалось и возобновлялось при выкачивании воздуха, причем свет был тем сильнее, чем выше получался вакуум. При замене иголки медным шариком между ним и доннышком опрокинутого серебряного стакана, соединенного с другим проводником, появлялся свет белого цвета у шарика, фиолетового у стакана и красноватого—в промежутке.

Таким образом мы видим, что первый русский электротехник со своей крупнейшей в мире батареей уже в первые годы XIX в. открыл пути к разрешению целого ряда таких вопросов, которые были разрешены наукой только в конце XIX и начале XX вв.

В истории русской физики непосредственными продолжателями дела В. В. Петрова в области электротехники и изучения электрических явлений явились также крупнейшие ученые, как Э. Х. Ленц, Б. С. Якоби, ученик В. В. Петрова Н. Х. Гамель и, наконец, блестящая плеяда русских электротехников конца XIX в.

Труды передового ученого крепостной России начала XIX в. не были оценены. Его книга, выпущенная на русском языке в 1803 г., была скоро забыта; она осталась не известной и для западных ученых, хотя уже одна эта работа давала ему полное и законное право на почетное место в ряду европейских ученых того времени.

Законным и единственным наследником и продолжателем дела Петрова является советская наука, высоко оценившая труды знаменитого русского физика. Книга «Известие о гальвани-вольтовых опытах», была переиздана в СССР в 1936 г., т. е. через 133 года после ее выхода.

«Новые электрические опыты». Электрическими явлениями Петров начал интересоваться в конце XVIII в. Опубликование замечательных результатов своих первых опытов не остановило его дальнейшей интенсивной работы и уже через год, в 1804 г., он публикует свою третью книгу, озаглавленную «Новые электрические опыты профессора физики Василия Петрова, который оными доказывает, что изолированные металлы и люди, а притом только нагретые тела могут соделываться электрическими от трения, наипаче же стерания их шерстью выделанных до нарочитой мягкости мехов и некоторыми другими телами; также особливые опыты, деланные различными

## Н О В Ы Е

## ЭЛЕКТРИЧЕСКІЕ ОПЫТЫ

Профессора Физики *Василія Петрова*,

который оными доказываетъ, что изолированные металлы и люди, а пренногя только нагрѣтыя тѣла могутъ содѣлываться электрическими отъ трения, наипаче же стеганія ихъ шерстью выдѣланныхъ до нарочитой мягкости меховъ и некоторыми другими тѣлами; также особливые опыты, дѣланные различными способами для открытія причины электрическихъ явленій.

Съ гравированною фигурою.



ВЪ САНКТ-ПЕТЕРБУРГѢ,

Въ Медицинской Типографіи  
1804 года.

способами для открытія причины электрическихъ явленій, СПб. 1804».

Работа Петрова является интересной попыткой дать свое новое объяснение природы электрическихъ явленій. Эта задача, поставленная еще Петербургской академіей наукъ при Ломоносове, поднимается снова в начале XIX в. В 1802 г. Наполеонъ предлагаетъ физикамъ для разрешенія этой задачи награду в 60 000 франковъ. В эти же годы упомянутая задача ставится в порядкѣ конкурса, и в рядѣ ученыхъ обществъ при университетахъ Европы. Однимъ изъ небезынтересныхъ ответовъ на эти требованія являлась и работа В. В. Петрова. Приступая къ своему исследованію, В. В. Петровъ считаетъ: «что гораздо надежнее искать настоящаго источника электрическихъ явленій не в умствованіяхъ къ которымъ доселе прибегали почти все физики, но в непосредственныхъ слѣдствіяхъ самыхъ опытовъ». С этой целью онъ произвелъ рядъ интересныхъ опытовъ со специальной построенной имъ для этого в 1803 г. электрической машиной. Работа В. В. Петрова состоитъ изъ 8 отдельныхъ статей, каждая изъ нихъ представляетъ собой самостоятельное исследование.

«Статья I. О способности изолированныхъ металловъ и людей содѣлываться электрическими отъ трения, а наипаче стеганія ихъ шерстью выдѣланныхъ порядочно меховъ и некоторыми другими телами.

Статья II. О способности изолированныхъ и неизолированныхъ, но только нагрѣтыхъ телъ содѣлываться электрическими отъ многократнаго ихъ стеганія и трения шерстью выдѣланныхъ порядочно меховъ и некоторыми другими телами.

Статья III. Объ опытахъ, деланныхъ машиною новаго строенія в запертномъ атмосферномъ воздухѣ, для открытія причинъ электрическихъ явленій.

Статья IV. Объ опытахъ, деланныхъ вышеописанною машиною в безвоздушномъ мѣстѣ.

Статья V. Объ опытахъ, деланныхъ прежнею же машиною в четырехъ различныхъ газахъ, и некоторыми другими способами.

Статья VI. Объ электрическихъ явленіяхъ, происходящихъ отъ трясенія ртути и амальгамъ в стеклянныхъ сухихъ сосудахъ, объ участіи в сихъ явленіяхъ кислотворнаго газа (какъ составной части атмосфернаго воздуха) и самой его температуры.

Статья VII. Объ электрическихъ явленіяхъ, происходящихъ отъ трясенія различныхъ металловъ и многихъ другихъ твердыхъ телъ в стеклянныхъ сухихъ сосудахъ, объ участіи в сихъ явленіяхъ кислотворнаго газа (какъ составной части атмосфернаго воздуха) и самой его температуры.

Статья VIII. Объ опытахъ, подающихъ причины думать о происхожденіи электричества отъ разрешенія амальгамы кислотворнаго газа (какъ составной части атмосфернаго воздуха), при действии обыкновенной электрической машины; о возможности производить весьма сильное электричество посредствомъ изолированныхъ ее подушекъ; и о переходѣ электричества изъ одной заряжаемой поверхности в другую Лейденскихъ бутылокъ, которые изолированные отъ сего часто кажутся незаряженными» [Л. 3].

В своей работѣ Петровъ поставилъ передъ собой для решенія два вопроса. Первый изъ нихъ касался электризаціи металловъ. Этотъ вопросъ былъ положительно решенъ еще Грекомъ в XVIII в., но неверное подразделение всехъ телъ природы, данное в 1600 г. Гильбертомъ, на тела электрическіе сами по себѣ и неэлектрическіе, и его утвержденіе о томъ, что металлы нельзя наэлектризовать, какъ традиція еще уживались в наукѣ и поддерживались отдельными учеными. Окончательное решеніе этого вопроса зависело отъ тщательно поставленныхъ опытовъ, такъ какъ натирательный матеріалъ при малѣйшемъ несмотрѣ со стороны экспериментатора могъ при плохой изоляціи и не показывать признаковъ электризаціи. Рядъ удачныхъ опытовъ в этомъ направленіи проводили учеными в концѣ XVIII в. Зная объ этихъ опытахъ, В. В. Петровъ рѣшаетъ самъ провести это исследование, темъ болѣе, что в 1801 и 1802 гг. два французскихъ профессора физики Либесъ и Сю старшій объявили в своихъ сочиненіяхъ, что металлы «черезъ треніе не могутъ содѣлаться чувствительно электрическими». Свои многочисленныя опыты Петровъ проводитъ съ исключительной тщательностью и предусмотрительностью. Изъ поля его вниманія не ускользаетъ ни одна мелочь, могущая стать причиной утечки электричества. Основными условіями для полученія успеха в рукахъ искуснаго экспериментатора являлись: гладкая поверхность электризуемого металла, сухой комнатный воздухъ, надежная изоляція употребляемыхъ держателей и удобная форма тренія в формѣ стеганія. В первыхъ опытахъ Петровъ применяетъ железный цилиндръ діаметромъ в 8 дюймовъ и длиною 12 дюймовъ; поверхность его была отполирована, а концы его заправлены в шейки изъ сухаго краснаго дерева.

Неудачныя опыты с натираниемъ вращающагося цилиндра о терку в видѣ подушечки изъ краснаго сафьяна, покрытую амальгамою, а потомъ и безъ нее не остановили В. В. Петрова. Тогда онъ рѣшилъ металлическій цилиндръ «стегать лисьимъ мехомъ» в сухомъ помѣщеніи. Результатъ получился положительный. Электричество было обнаружено, и Петрову удалось даже зарядить небольшую лейденскую банку. Утвержденія французскихъ физиковъ о томъ, что металлы при треніи не электризуются и не показываютъ никакихъ признаковъ электричества, даже если пользоваться чувствительными гальванометрами, В. В. Петровымъ были блестяще опровергнуты. Подтвердили это опыты, проведенныя Петровымъ и в болѣе широкомъ масштабѣ.

На основаніи своихъ многочисленныхъ исследованийъ замечательный экспериментаторъ приходитъ къ слѣдующему выводу: «итакъ, въ слѣдствіе всехъ деланныхъ мною доселе опытовъ надъ электричествомъ металловъ съ основаніемъ позволительно заключить, что и все металлы могутъ содѣлываться электрическими безъ сообщенія ихъ съ другими, наэлектризованными черезъ треніе—телами... если они будутъ надлежащимъ образомъ изолированы, и если потомъ надъ ними будетъ произведено стеганіе».



Так был решен В. В. Петровым сложный вопрос об электризации металлов. В истории физики этот факт остался не отмеченным ни в русских и ни в западных учебниках по физике. Замечательные опыты Петрова не обратили на себя внимания и его современников. В учебнике физики Двигубского (1808 г.) еще приводится старое деление на тела электрические и тела незлектрические, а автор другого курса физики Перевощиков (1833 г.), говоря об электризации тел и упоминая имя Грея, о Петрове не упоминает.

Другая большая задача, которую поставил перед собой В. В. Петров, заключалась в выяснении причины электрических явлений. К ее разрешению он подошел, как и к большинству изучаемых им явлений, не с физической, а с химической стороны. В плане выяснения причин электрических явлений В. В. Петрова очень интересовал вопрос о происхождении электрических явлений в пустоте и в различных газах. Для этой цели он в 1803 г. сконструировал специальную электрическую машину, которая позволяла получать электричество под колоколом воздушной машины. Эта машина описывается подробно в книге Петрова.

Многочисленные опыты, проведенные им со своей машиной над электрическими явлениями в пустоте и в газах, показали, что электрические явления в этих условиях протекают так же, как и в воздухе. Во время этих опытов В. В. Петрову первому удалось получить окисление платины путем встряхивания ее опилок в сосуде с воздухом. До опытов Петрова полагали, что окислов платины не существует.

В книге В. В. Петрова мы находим много тонких экспериментальных деталей, представляющих интерес и теперь.

**Исследования В. В. Петрова по люминесценции.** Свечение тел, видимыми лучами не нагретых до температуры, соответствующей нормальному лучеиспусканию, или так называемое холодное свечение тел, названное в физике люминесценцией, изучается, начиная с XVII столетия. Явления, связанные со свечением естественных и искусственных фосфоров и других светящихся тел, всегда привлекали внимание естествоиспытателей, однако до второй половины XIX в. изучение этих явлений оставалось в стадии исключительно качественных наблюдений. В своей статье, посвященной В. В. Петрову, «Академик В. В. Петров—исследователь люминесценции», С. И. Вавилов пишет [Л. 5]: «... трудно понять, почему количественный оптический эксперимент до второй половины XIX в. почти не привлекался к исследованию холодного свечения. Оптика Ньютона давала все нужное для постановки спектрального анализа фосфоресценции, фотометрия Буге и Ламберта вполне могла быть применена для количественного изучения законов затухания фосфоров. Но ни спектры, ни затухание фосфоресценции ни разу не привлекли внимания экспериментаторов XVIII и начала XIX вв.; опыт ограничивался качественными наблюдениями и химическими рецептами приготовления фосфоров.

Такое состояние длилось два века, являясь разительным примером прозябания, хаоса и бесплановости в таких областях физики, которые не понуждались к систематичности практическими вопросами или наличием отчетливой математической схемы.

На этом безотрадном общем фоне исследования В. В. Петрова занимают видное и исключительное место».

**Природой свечения тел, и в частности люминесценцией, В. В. Петров занимался почти 40 лет, начиная с 1795 и кончая 1834 г.** Этому чрезвычайно интересующему его вопросу он отводил большое место во всех публикуемых им работах по физике и физико-химии. В первой своей работе («Собрание физико-химических новых опытов и наблюдений», СПб, 1801) [Л. 1] вопросам свечения тел В. В. Петров посвящает почти половину книги. Интересно даже название тех тем, которые он излагает:

«VI. О новых примечаниях над фосфором Кункеля.

VII. О негорении пирофора и невоспламеняемости известных жидкостей с дымящеюся селитряною кислотою в атмосферном воздухе при всяких его температурах.

VIII. О фосфорах прозябаемого царства и об истинной причине сечения гнилых деревьев.

IX. О фосфорах животного царства и о причине свечения.

X. О различных давно известных, а наипаче о новых превосходнейших фосфорах из царства ископаемого и непостижимой причине их свечения.

XI. О свечении многих минералов, прозябаемых, может быть, всех и животных твердых тел, разгоряченных или нагретых только до надлежащей степени».

На вопросах свечения тел Петров останавливается в следующих своих работах: «Известие о Гальвани-Вольтовских опытах», СПб, 1803 г. и «Новые электрические опыты», СПб, 1804 г. Большая статья по свечению фосфоров под названием «Некоторые наблюдения и опыт над фосфором, деланные еще до 1801 г.», представляющая собой переработку одной из глав первой книги, была опубликована Петровым в «Умозрительных исследованиях», СПб. Ак. Наук в 1815 г.

К изучению свечения тел искусный экспериментатор подходил, как и большинство физиков того времени, с физико-химической стороны, а не со стороны оптической.

Подводя итоги своих опытов над сгоранием простых и сложных тел в безвоздушном месте, В. В. Петров приходит к выводу о том, что «Где находится кислотворный газ, или по крайней мере основание его кислотворное вещество, соединенное с твердыми, жидкими или воздухообразными телами; там только и может происходить горение, при помощи такой температуры, которая способна для произведения новых простых или сложных средств, какие могут быть между составными тел частями».

Такое заключение он сделал после многочисленных опытов, со всей убедительностью подтвердивших, что про-



Могила В. В. Петрова на Смоленском кладбище в Ленинграде.

стые тела, фосфор, сера и многие другие горят только в присутствии воздуха и их горение в безвоздушном пространстве объясняется только наличием кислорода, находящегося в сгораемых телах.

С точки зрения проверки этого положения Петров и приступает к изучению явлений свечения тел. В этом плане его интересует ряд вопросов. В статье «О новых примечаниях над фосфором Кункеля», содержание которой было в более широком плане раскрыто им в 1815 г., В. В. Петров целым рядом кропотливых и тщательных опытов разрешает сложные вопросы о предельной температуре, при которой перестает светиться или медленно гореть на воздухе фосфор, вопросы, которые, как пишет автор, «сколько мне известно, химики и физики еще доселе не предпринимали с намерением и с надлежащей точностью разрешить». В данной статье В. В. Петров рассматривает многочисленные работы итальянских и французских химиков и, критически отмечая недостатки этих работ, на основании собственных самостоятельных опытов приходит к точному определению температуры ( $+8^{\circ}\text{R}$ ), при которой перестает светиться или медленно гореть на воздухе фосфор.

Многочисленные и тщательные опыты, проведенные Петровым для открытия «правдоподобной причины свечения» фосфоров, приводят его к ряду интереснейших наблюдений. «Со временем,—пишет Петров,—я надеюсь открыть в некоторых отношениях любопытное, а в других, может быть, весьма полезное употребление новых сих естественных фосфоров».

Причина свечения фосфора, несмотря на большое число опытов, для Петрова осталась невыясненной.

Люминесценцией Петров занимался до конца жизни. В Академию Наук по этому вопросу им было представлено несколько докладов.

Давая оценку работам В. В. Петрова по люминесценции, С. И. Вавилов писал [Л. 5]: «Им было выполнено большое и нужное дело. Говоря на современном языке, Петрову удалось разделить хемилюминесценцию от фотолюминесценции. Для этого потребовалось огромное число зачастую очень нелегких опытов, с которыми, однако, искусный экспериментатор Петров справлялся быстро и умело... В наши дни выяснилась важность явлений фосфоресценции для понимания кристаллического состояния вещества и так называемых полупроводников, многие стороны явления удалось объяснить, но осталось и немало загадок. Наша задача — продолжить дело славного русского пионера в области люминесценции».

**Заключение.** В своем классическом труде «Известия о гальвани-вольтовых опытах» Василий Владимирович Петров писал: «Я надеюсь, что просвещенные и беспристрастные физики по крайней мере некогда

согласятся отдать трудам моим ту справедливость, которую важность сих последних опытов заслуживает».

Русские физики и техники не забыли замечательных опытов своего выдающегося соотечественника. Открытую В. В. Петровым электрическую дугу они впервые практически применили для целей освещения в виде дуговой электрической лампы П. Н. Яблочкова и В. Н. Чиколева и для целей электросварки, изобретенной Н. Н. Бенардосом и Н. Г. Славяновым. Теория электрической дуги впервые была разработана также русским ученым В. Ф. Миткевичем.

В советские годы электрическая дуговая сварка благодаря работам В. П. Никитина, Е. О. Патона, К. К. Хренова и других советских ученых и инженеров получила самое широкое применение в науке и технике.

Не забыли русские физики и опытов Петрова по люминесценции, его желание найти ей «весьма полезное употребление». Широко известны исследования в области люминесценции, выполненные С. И. Вавиловым и его школой.

Широкое развитие получили в нашей стране начинания В. В. Петрова и по организации физических лабораторий и по всестороннему изучению электрических и оптических явлений.

По предложению С. Орджоникидзе в 1935 г. решением Президиума ЦИК СССР «Об ознаменовании столетия со дня смерти первого русского электротехника академика В. В. Петрова» было решено присвоить светотехнической лаборатории Московского энергетического института имя академика Василия Петрова и учредить в Московском энергетическом, Ленинградском и Харьковском электротехнических институтах ежегодную выдачу премий имени В. В. Петрова за лучший дипломный проект на энергетическую тему в размере 1 000 руб. каждая.

Наша страна высоко чтит память своего выдающегося ученого. Советские физики и электротехники гордятся именем В. В. Петрова и с успехом развивают начатые им исследования на благо социалистической Родины.

#### Литература

1. В. В. Петров. Собрание физико-химических новых опытов и наблюдений. СПб, 1801.
2. В. В. Петров. Известие о гальвани-вольтовых опытах. СПб, 1803.
3. В. В. Петров. Новые электрические опыты. СПб, 1804.
4. В. П. Никитин. Русская школа в развитии электрической дуговой сварки. Изв. АН СССР, ОТН, № 6, 1948.
5. С. И. Вавилов. Академик В. В. Петров исследователь люминесценции. Сборник статей и материалов «Академик В. В. Петров. 1761—1834», под ред. С. И. Вавилова, Изд. АН СССР, 1940.



## Галилео Феррарис

23 марта 1876 г. П. Н. Яблочкову был выдан патент на изобретенную им дуговую лампу без регулятора, известную под названием «электрической свечи Яблочкова». С тех пор переменный ток впервые получил практическое применение.

Толчок многочисленным работам по усовершенствованию техники переменных токов был дан в результате открытия в 1885 г. итальянским физиком и инженером Галилео Феррарисом явления вращающегося магнитного поля. Труды М. О. Доливо-Добровольского и Н. Тесла были созданы техникой трехфазного тока, огромное значение которой для современной электротехники общеизвестно. В 1947 г. исполнилось столетие со дня рождения Галилео Феррариса и пятьдесят лет со дня его смерти.

Галилео Феррарис родился 31 октября 1847 г. в г. Ливорно Верчеллезе (Пьемонт); он окончил в 1869 г. Туринский высший инженерный институт с дипломом гражданского инженера, защитив дипломную работу о передаче механической энергии по методу Гирна, получившему название «телединамического». Свою практическую деятельность Феррарис начал в качестве ассистента в Туринском промышленном музее, а с 1872 г. перешел на преподавательскую работу в Туринский университет, в котором с 1875 г. занял кафедру физики. В этой должности Феррарис оставался до своей смерти, последовавшей в Турине 7 февраля 1897 г.

С 1877 г. Феррарис состоял ректором и профессором Туринского политехнического института, в котором он основал электротехническое отделение. Много лет Феррарис был профессором электротехники и в военной академии.

Работы Г. Феррариса относились к разным областям физики и техническим ее приложениям. Среди этих работ имеются исследования о применении простой буссоли для измерения силы гальванического тока, о математической теории распространения электричества в однородном твердом теле. В 1878 г. Феррарис опубликовал две теоремы о распределении электрических постоянных токов и о максимуме и минимуме энергии в системе проводников.

Наиболее значительной заслугой Феррариса является получение и исследование вращающегося магнитного поля. Однако, Феррарис не придал открытому им физическому явлению должного значения и не усмотрел в нем важнейшего фактора для прогресса электротехники. М. О. Доливо-Добровольский в своей историко-технической монографии «Из истории трехфазного тока» дает следующее описание работ Феррариса: «Профессор Г. Феррарис развил приблизительно около 1885 г. теорию, впервые опубликованную им только в марте 1888 г., по которой в переменном токе, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$  в катушках расположенных по типу тангенс-буссолей, создают в средней точке перекрещивающихся полей постоянное интенсивности вращающееся поле. Он установил это поле, при которых легко приводился во вращение магнитный цилиндр. Так как в распоряжении Феррариса не было машины двухфазного тока, он создал расщепление тока посредством добавочных сопротивлений и дросселей. Феррарис, правда, упомянул, что принцип вращающегося магнитного поля может быть применен для электродвигателей, но сразу же аннулировал свои выводы расчетом, согласно которому такие электродвигатели могут иметь к. п. д. максимум 50% (практически же не более 40%). Это был тот метод расчета, который приводит при расщеплении максимальной мощности батареи к условию равенства внешнего и внутреннего сопротивлений».

В этих словах о Феррарисе проявилась замечательная интуиция М. О. Доливо-Добровольского и его критический подход к материалам о вращающемся магнитном поле. Доливо-Добровольский продемонстрировал практическое применение этого нового физического принципа в виде первой в мире передачи электроэнергии трехфазным током из Лауфена во Франкфурт-на-Майне с к. п. д. 77,4%.

Незадолго до смерти Феррарис опубликовал работу относящуюся к теории вращающегося переменного вектора и две монографии об электродвигателях переменного тока.

Феррарис принимал большое участие в работах итальянской и международной электротехнической общности. В 1881 и 1882 гг. он был делегатом Италии на международных собраниях электриков в Париже, а в 1883 г.—комиссаром Венской электротехнической выставки. 3 июня 1894 г. он сделал доклад в *Accademia dei Lincei* о передаче электрической энергии.

После смерти Феррариса была опубликована его «Математическая теория векторного поля». Полное собрание трудов Феррариса издано в Милане в 1902—1904 гг., а лекции по электротехнике вышли в Турине в 1928 г. в четвертом издании.

Идеи Феррариса были положены в основу построения ряда электроизмерительных приборов, применяемых и ныне в цепях переменного тока и носящих название приборов Феррариса.

Доктор техн. наук, проф. Л. Д. БЕЛЬКИН

*Редакция журнала „Электричество“  
обращается с просьбой к лицам и организациям,  
которые могут продать годовые комплекты  
журнала „Электричество“ (начиная с 1880 г.),  
необходимые редакции,  
направлять свои предложения  
в букинистический магазин № 32 Могиз  
Москва, Китайский проезд, 1/3.*

## Современные мостовые схемы с автоматическим уравниванием

Автоматически уравнивающиеся мостовые схемы широко применяются для контроля всевозможных параметров в технологических процессах, при испытаниях машин и материалов и для других целей. Наиболее распространенными из контролируемых параметров являются температура и механическое перемещение (деформация). Во многих случаях в эти два параметра преобразуются другие, подлежащие контролю параметры (расход, давление, влажность, состав газа и т. д.). Температура обычно измеряется с помощью термометров сопротивления, а перемещение — с помощью проволоочных, индуктивных или емкостных датчиков. Во всех этих случаях имеет место изменение полного сопротивления элемента схемы в функции контролируемого параметра и, следовательно, возможно измерение по мостовому методу. Современные указывающие и записывающие приборы, служащие для указанной цели, строятся обычно таким образом, что мост автоматически приводится к равновесию посредством изменения сопротивления его плеч, причем перемещение его элемента, необходимое для достижения равновесия, является мерой контролируемой величины. Следует отметить широкое применение электроники, позволяющее упростить конструкцию, избежать контактов, повысить быстродействие и точность. Обычно применяется мост переменного тока, даже в тех случаях, когда чувствительным элементом является активное сопротивление. В результате небаланс моста представляет собой напряжение также переменного тока, которое легко поддается усилению с помощью электронного усилителя. Напряжение с выхода усилителя подается в большинстве случаев на обмотки двухфазного электродвигателя. Фаза входного и выходного напряжения усилителя и, следовательно, направление вращения двигателя зависят от направления небаланса моста. Двигатель при своем вращении изменяет сопротивления плеч моста, приводя последний к равновесию. Это движение передает-

ся также на указывающее или записывающее устройство. Такова в общих чертах схема автоматического электронного моста с непрерывным уравниванием.

Плечи моста, на которые воздействует двигатель при приведении моста к равновесию, могут представлять собой активные, индуктивные или емкостные сопротивления. Ниже мы опишем несколько примеров автоматических мостов, иллюстрирующих указанные случаи. В отечественной литературе имеется ряд работ, в которых рассматриваются электронные автоматические мосты [Л. 1—4]. Настоящий обзор имеет своей целью дать по возможности полный обзор приборов данного вида с учетом последних материалов из иностранной технической литературы.

Схема автоматического моста «Pyrotron» [Л. 5—6] показана на рис. 1. Напряжение небаланса моста, снимаемое со скользящего контакта реохорда и противоположной вершины моста, подается через выходной трансформатор на двухкаскадный усилитель напряжения 1 с емкостной связью. Коэффициент усиления усилителя — 2500 (вместе с трансформатором — до 40 000). С выхода усилителя напряжение подается на фазочувствительную схему, управляющую двигателем, построенную на одном двойном триоде 2; на аноды последнего подается через силовой трансформатор переменное напряжение от того же источника, от которого питается мост. Выход усилителя напряжения соединен с соединенными параллельно сетками триода, а в анодные цепи включены подмагничивающие обмотки двух дросселей 3 и 4, непосредственно управляющих работой двигателя. При некотором знаке небаланса моста напряжение на сетках лампы 2 совпадает по фазе с анодным напряжением одной из секций лампы и сдвинуто на  $180^\circ$  по отношению к напряжению на другом аноде. Постоянная составляющая анодного тока при появлении сигнала на сетках будет, очевидно, увеличиваться в той секции, где фазы сеточного и анодного напряжения совпадают, и уменьшаться в той, где они противоположны; чем более сильный сигнал подается на сетку, тем больше разность анодных токов. Двухфазный двигатель имеет две одинаковые обмотки 5 и 6, расположенные на статоре под углом  $90^\circ$  электрических градусов. Эти обмотки вместе с обмотками переменного тока дросселей с подмагничиванием образуют мост, в диагональ которого включен конденсатор 7. При отсутствии сигнала на сетке лампы 3 подмагничивание обеих дросселей одинаково, фазовый сдвиг между токами обмоток 5 и 6 отсутствует, вследствие чего нет вращающего момента и двигатель неподвижен. При появлении сигнала индуктивность одного дросселя возрастает, а другого уменьшается, в результате чего возникает фазовый сдвиг между магнитными потоками обмоток 5 и 6 (принимая упрощенно, что индуктивность одного из дросселей падает до нуля, а другого возрастает до бесконечности, получаем, что одна из обмоток двигателя оказывается включенной в сеть через конденсатор, а другая непосредственно). В результате двигатель развивает вращающий момент, величина которого, а следовательно, и скорость вращения тем больше, чем больше небаланс моста, а направление вращения зависит от фазы небаланса. Таким образом, двигатель, перемещая контакт по реохорду, приводит мост к равновесию. Минимальное напряжение небаланса моста, при котором трогается двигатель, составляет: при наличии выходного трансформатора  $0,03 \mu V$ , а без него —  $0,4 \mu V$ . Схема рис. 1 предназначена для измерения температуры с помощью термометра сопротивления 8. Этот же прибор

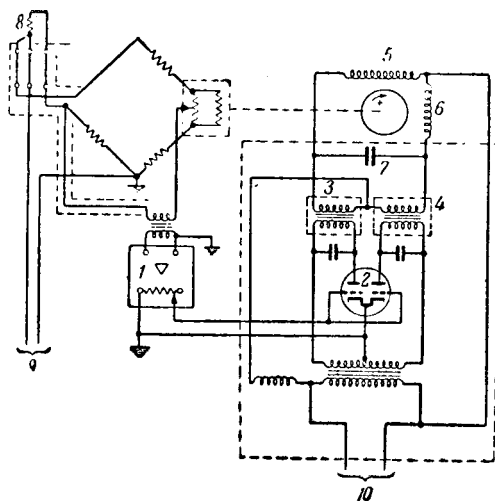


Рис. 1. Схема моста «Pyrotron».

1 — усилитель; 2 — двойной триод; 3 и 4 — дроссели; 5 и 6 — статорные обмотки двигателя; 7 — конденсатор; 8 — термометр сопротивления; 9 — питание моста 7,5 В; 10 — питание 115 В, 60 Гц.

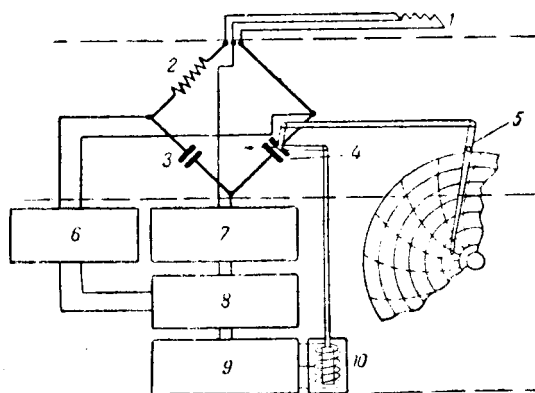


Рис. 2. Скелетная схема моста „Dynalog“.

1 — термометр сопротивления; 2 — постоянное сопротивление; 3 — конденсатор постоянной емкости; 4 — переменный уравнивающий конденсатор; 5 — записывающее перо; 6 — генератор 1000 Hz; 7 — усилитель напряжения; 8 — фазочувствительный детектор; 9 — усилитель мощности; 10 — соленоидный двигатель.

применяется для измерения перемещений или величин, выражаемых через перемещения. В этом случае в схему моста взамен термометра сопротивления и смежного плеча включаются катушки с перемещающимся сердечником.

У другого вида моста переменного тока автоматическое уравнивание производится посредством изменения емкости. В такой системе отсутствует неприятный в эксплуатации скользящий контакт реостата, и возможно совершенно плавное уравнивание, тогда как при реохорде вследствие наличия витков может оставаться некомпенсированный небаланс, соответствующий напряжению половины витка, что в некоторых случаях может привести к автоколебаниям.

Примером автоматического моста с уравниванием емкостью может служить прибор «Dynalog» [Л. 7—10]. Прибор (рис. 2) применяется для измерения температуры с помощью термометра сопротивления и механических напряжений с помощью проволоочных датчиков. Два плеча моста представляют собой чувствительный элемент сопротивления и постоянное сопротивление, а два других плеча — конденсатор постоянной емкости и уравнивающий конденсатор. Мост питается от лампового генератора 1000 Hz. Напряжение небаланса моста усиливается усилителем напряжения, содержащим пентод и двойной триод. Выход усилителя соединен с соединенными параллельно сетками фазочувствительного детектора, построенного на двойном триоде, аноды которого питаются частотой 1000 Hz от того же генератора, что и мост. В результате действия фазочувствительной схемы, на анодных сопротивлениях двойного триода появляются падения напряжения постоянного тока противоположного знака, которые при отсутствии сигнала от моста равны и, следовательно, дают в сумме нуль, а при наличии сигнала на них в сумме получается напряжение постоянного тока, приблизительно пропорциональное по величине сигналу, с полярностью, зависящей от фазы небаланса. Это напряжение усиливается пушпульным усилителем мощности постоянного тока, выполненных на двойном триоде, в анодные цепи которого включены обмотки соленоидного двигателя с возвратно-поступательным движением якоря. При балансе токи обеих обмоток равны и составляют приблизительно 40% от максимального тока. При наличии небаланса преобладает ток той или иной половины, и двигатель поворачивает пластины воздушного конденсатора переменной емкости, приводя мост к равновесию. Одновременно двигатель поворачивает пишущее перо. Угол поворота ротора конденсатора составляет 90°. Эта конструкция прибора позволила свести число движущихся частей к пяти. Прибор является автоматическим регулятором со статической характеристикой, так как для поддержания якоря соленоидного двигателя вне его механического равновесия требуется некоторый небаланс моста. Однако, величина этого остаточного небаланса весьма мала, так как электронная схема обеспечивает высокое усиление, и поэтому можно практически считать, что мост уравнивается.

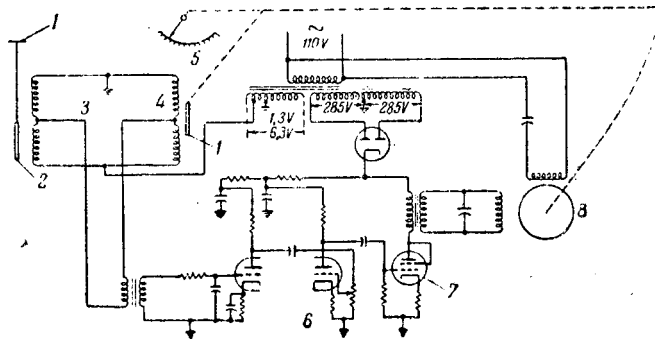


Рис. 3. Схема Керрэн.

1 — поплавок; 2 — якорь; 3 — катушки датчика; 4 — уравнивающая катушка; 5 — указатель; 6 — усилитель напряжения; 7 — усилитель мощности; 8 — двигатель.

Осуществление достаточно компактного уравнивающего конденсатора возможно лишь при повышенной частоте, а это требует наличия специального генератора, усложняющего схему. Избавиться от этого недостатка можно, применяя уравнивание с помощью изменения индуктивности и питая мост напряжением промышленной частоты. Примером такого моста может служить прибор [Л. 11] для измерения малых скоростей потока (порядка 5 см<sup>3</sup>/мин) жидкостей и газов с помощью индуктивного датчика (рис. 3). На поплавке укреплен железный якорь весом около 0,2 g, располагающийся внутри соленоида. Напряжение небаланса моста подается через трансформатор на двухкаскадный усилитель напряжения и затем в усилитель мощности, который через трансформатор питает управляющую обмотку двухфазного малоинерционного двигателя с большим вращающим моментом. Вторая обмотка двигателя питается от сети через конденсатор, который подбирается так, чтобы ток был сдвинут по отношению к напряжению сети приблизительно на 90° и чтобы цепь находилась вблизи резонанса, при котором ток достигает наибольших значений. Мост питается от того же источника, что и двигатель. Ток в управляющей обмотке двигателя, создаваемый активной составляющей небаланса моста, совпадает по фазе с напряжением сети, т. е. сдвинут на 90° по отношению к току сетевой обмотки двигателя, что обеспечивает создание необходимого вращающего момента. Двигатель при вращении передвигает якорь уравнивающих соленоидов, приводя мост к равновесию и одновременно перемещая стрелку указателя на самописца. Реактивные составляющие тока небаланса моста создают компоненты тока в управляющей обмотке двигателя, находящиеся в фазе или в противофазе с током сетевой обмотки двигателя и, следовательно, не создающие вращающего момента. Таким образом, двигатель (с усилителем) является органом ваттметрового типа, реагирующим только на активную составляющую тока небаланса.

Отметим, что, хотя индуктивный мост осуществляется более простыми средствами, чем емкостный, наличие комплексных сопротивлений в плечах заставляет прибегать к выделению активной составляющей тока небаланса и, кроме того, возможно появление погрешностей при колебаниях напряжения питания из-за нелинейности индуктивности со сталью, вследствие чего, повидимому, емкостный мост следует считать более точным.

В последнее время начинает входить в практику периодическое уравнивание или «динамическая компенсация» (последний термин введен Ф. Е. Темниковым в 1940 г.). Принцип этой системы и приборы, основанные на нем, уже описывались в журнале «Электричество» [Л. 13] и был отмечен приоритет советских инженеров в данной области [Л. 14]. Здесь мы отметим лишь последние автоматические мосты, построенные по этому принципу.

Скелетная схема электронного прибора подобного рода [Л. 15] показана на рис. 4. По реохорду периодически пробегает скользящий контакт, и в момент равновесия моста на специальной диаграммной бумаге отмечаются



## День радио — 7 мая в Москве

В День радио 7 мая 1948 г. в Москве, в Колонном зале Дома Союзов состоялось торжественное заседание. Собрались деятели советской науки, работники радиопромышленности и радиолюбители. Торжественное заседание открыл Министр связи СССР Н. Д. Псурцев.

С докладом о Дне радио выступил председатель Комитета по радиофикации и радиовещанию при Совете Министров СССР А. А. Пузин. В своем докладе А. А. Пузин отметил, что за 53 года, прошедших с тех пор, как русский ученый А. С. Попов впервые продемонстрировал изобретенный им аппарат беспроволочной связи, радиотехника совершила блестящий путь развития. Особенно бурными темпами это развитие шло в советской стране, где была создана мощная радиопромышленность, неуклонно из года в год развивалась радиосвязь и совершенствовалась ее техника.

Большая работа проводится в СССР по расширению радиоприемной сети. Только за один 1947 г. количество радиостановок в стране увеличилось на 1 200 тыс. В этом году промышленность выпустит в три с лишним раза больше радиоприемников, чем их было выпущено в 1940 г. Организован серийный выпуск телевизионных приемников «Москвич» и «Ленинград», рассчитанных на прием изображений высокой четкости. Большое значение имеет радиолобительское движение. Широкое применение радиотехники в военном деле, в промышленности, в связи и в

других отраслях народного хозяйства требует высокого уровня технической культуры населения и подготовки огромного количества квалифицированных кадров радиотехники. Радиолобительство оказывало и оказывает большую помощь в этом деле. Проведенная в прошлом году выставка радиоаппаратуры любительских конструкций и выставка 1948 г. продемонстрировали значительный технический рост радиолюбителей.

После доклада академик Б. А. Введенский по поручению Президиума Академии наук СССР сообщил, что золотая медаль им. А. С. Попова и почетный диплом присуждены члену-корреспонденту Академии наук СССР Валентину Петровичу Вологдину.

С огромным воодушевлением участники торжественного заседания, посвященного Дню радио, послали приветствие товарищу И. В. Сталину.

Радиолобительская общественность столицы отметила День радио торжественным собранием членов Центрального радиоклуба, состоявшемся в Центральном доме инженера и техника. Собрание открыл председатель Совета Центрального радиоклуба, маршал войск связи И. Т. Петров. С докладом «Наша страна — родина радио» выступил доктор техн. наук, проф. И. Г. Кляцкин.

В ночь на 7 мая коротковолновики Советского Союза провели традиционные соревнования, посвященные Дню радио.



## Научная сессия, посвященная празднованию Дня радио

5—8 мая 1948 г. Всесоюзное научно-техническое общество радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова совместно с Министерством связи СССР, Министерством промышленности средств связи СССР и Комитетом по радиофикации и радиовещанию при Совете Министров Союза ССР провело в Москве научную сессию, посвященную празднованию Дня радио.

Научно-техническая общественность Москвы, Ленинграда, Киева, Харькова, Горького и других городов проявила живейший интерес к сессии; свыше 1 200 делегатов представляли научно-исследовательские институты, высшие учебные заведения, министерства и другие ведомства. В работах сессии приняли участие академики Б. А. Введенский, А. И. Берг, члены-корр. Академии наук СССР А. А. Пистолькорс, В. И. Коваленков, Г. А. Гамбурцев и член-корр. Академии наук УССР А. А. Слущкин.

Сессию открыл министр связи Союза ССР Н. Д. Псурцев.

На пленарном заседании 5 мая с докладом «О перспективах развития телевизионного вещания» выступил член Оргбюро ВНОРиЭ им. А. С. Попова кандидат техн. наук С. И. Катаев.

Заключительное пленарное заседание состоялось 8 мая. На заключительном пленарном заседании научная сессия с большим воодушевлением в торжественной обстановке приняла приветствие вождю народов товарищу Сталину.

Сессия с удовлетворением отметила существенные успехи советских ученых и инженеров в области теорети-

ческих и экспериментальных научно-исследовательских работ и в завоевании ими ведущей роли в радиотехнике.

Сообщение о присуждении первой золотой медали им. А. С. Попова лауреату Сталинской премии, члену-корр. Академии наук СССР В. П. Вологдину, сделано по поручению Президиума Академии наук СССР академиком Б. А. Введенским. Это сообщение было встречено делегатами сессии с большим удовлетворением. В. П. Вологдину имени сессии была направлена приветственная телеграмма.

В заключение делегаты сессии заслушали на пленарном заседании сообщение инж. А. А. Хрущева (руководителя лаборатории звуковоспроизведения НИКФИ) о новой двухканальной системе для высококачественного воспроизведения звука, которое сопровождалось демонстрацией аппаратуры в действии.

Работа сессии проходила в нескольких секциях.

В секции телевизионного вещания (руководитель — кандидат техн. наук С. И. Катаев) был обсужден доклад доктора техн. наук В. Л. Крейцера на тему «Направление проектирования типовой аппаратуры телевизионных центров». Инж. М. И. Кривошеев в докладе «Вопросы синхронизации передвижных телевизионных передатчиков» указал на преимущества использования вынужденного задающего генератора, который дает возможность упростить систему синхронизации. Были рассмотрены две возможные системы микширования видеосигналов.



сигналов, связанные с необходимостью предварительного фазирования. Доклад «Нестационарные процессы в широкополосных усилителях с обратной связью» сделал кандидат техн. наук О. Б. Лурье. «О двух схемах усиления промежуточной частоты телевизионного приемника» сообщил в своем докладе инж. В. Ф. Самойлов. Доктор физико-матем. наук С. С. Прилежаев выступил с докладом «Основы технологии сурьмяно-оцинкового фотокатода».

В секции *радиовещания* (руководитель доктор техн. наук, проф. И. Е. Горон) инж. Б. Я. Герценштейн сделал доклад «Система устройства проводного вещания для крупных городов». С докладом «Система телеуправления и контроля вещания для крупных городов» выступил Б. Г. Позднеев. Инж. И. Г. Дембо представил доклад «Промышленные образцы усилительных подстанций сетей проводного вещания больших городов», в котором было подробно охарактеризовано дистанционное управление усилительной подстанцией мощностью 60 kW с мощностью 20 kW в блоке.

Доклад на тему «Усилительный канал телеуправляемой подстанции для сетей проводного вещания крупных городов» сделал инж. С. Е. Гликман.

В докладе инж. Г. А. Локшина «Стационарное оборудование проводного вещания» было приведено краткое описание конструктивного оформления 5-kW усилительного устройства для трансляционных вешательных узлов и характеристика электрических показателей устройства.

В докладе инж. К. Я. Петрова «Массовый радиовещательный приемник» было сообщено, что радиоприемник «Электросигнал-2» (ЭЛС-2), разработанный Воронежским радиозаводом, является всеволновым 7-ламповым супером II класса с повышенными параметрами. Приемник имеет 4 диапазона: длинноволновый, средневолновый и два растянутых коротковолновых диапазона. Чувствительность приемника лежит в пределах 15—16  $\mu$  V в длинноволновом диапазоне и 50—75  $\mu$  V в коротковолновом диапазоне.

В секции *дальней связи* (руководитель доц. В. А. Ножиков) из числа прочитанных докладов следует отметить доклад члена-корр. Академии наук СССР В. И. Коваленкова «Взаимное влияние линий при установившемся режиме», в котором методом фазспленинга была решена обобщенная система телеграфных уравнений для двух взаимовлияющих однопроводных линий.

Доклад «Применение частотной модуляции в дальней связи по линиям электропередачи» сделал кандидат техн. наук Н. А. Ульяновский.

В секции *распространения радиоволн* (руководитель проф. А. Н. Казанцев) был заслушан доклад кандидата физико-матем. наук Н. П. Бенькова и Р. А. Зевакина «Слой Е-спорадический». В докладе было дано описание морфологии слоя (географическое распределение, суточные и сезонные вариации частоты появления) по наблюдениям 14 ионосферных станций.

Кандидат физико-матем. наук А. А. Григорьева в докладе «Коэффициент поглощения радиоволн при возмущенном состоянии ионосферы» привела экспериментальные данные, характеризующие увеличение коэффициента поглощения при возмущенном состоянии ионосферы.

Инж. Н. В. Медникова в докладе «О существовании ионизированных областей выше слоя F<sub>2</sub>» указала на связь между появлением слоя ионосферного возмущения и другими геофизическими явлениями.

Работами различных авторов было показано наличие связи между характером распространения радиоволн и метеорологическими факторами. В докладе «О наблюдениях изменений уровней слышимости длинноволновых радиовещательных станций в связи с метеорологическими

условиями» кандидат физико-матем. наук С. С. Чавдаров сообщил о результатах проведенных в текущем году систематических наблюдений за уровнем слышимости сигналов ряда длинноволновых станций.

В докладе Р. В. Хохлова «Нестационарные процессы в волноводе» было представлено строгое решение нестационарной задачи о распространении волн в волноводе, иллюстрируемое несколькими численными примерами.

В секции *линейно-кабельных сооружений* (руководитель доктор техн. наук, проф. П. К. Акульшин) доктор техн. наук И. В. Коптев в докладе «Теория влияния электрических цепей на цепи связи» дал классификацию влияния электрического поля на цепи связи и рассмотрел вопросы влияния линий сильного тока на цепи связи. Вторым докладом на эту тему был доклад доктора техн. наук М. И. Михайлова «Общая теория влияния между цепями различных электрических систем».

В этой секции также был заслушан доклад кандидата техн. наук Я. Л. Быховского «Импульсные методы измерения линий», в котором были изложены требования, предъявляемые к точности, чувствительности и другим техническим данным импульсных измерителей и был дан обзор существующих схем и конструкций приборов.

В секции *радиопередающих устройств* (руководитель кандидат техн. наук В. Н. Сосунов) с докладом «О работе триодных и тетродных генераторов при больших углах пробега электронов» выступил доктор техн. наук М. С. Нейман. Кандидат техн. наук Н. М. Изюмов сделал доклад «О необходимой мощности сигнала на входе приемника при импульсно-фазовой радиосвязи». В докладе «Анализ перекрестных помех в многоканальных системах с временной селекцией» кандидат техн. наук А. Р. Лившиц рассмотрел физический процесс возникновения перекрестных помех в многоканальных системах с временной селекцией при амплитудной и позиционной модуляции импульсов. В докладе была приведена количественная оценка рассматриваемых явлений.

Проф. Н. Н. Малов сделал доклад «О теории нового волномера».

В секции *радиоприемных устройств* (руководитель проф. Г. А. Левин) был заслушан доклад доктора техн. наук, проф. В. И. Сифорова «Исследование шумовых свойств усилительных ламп в диапазоне ультравысоких частот» и доклад кандидата техн. наук А. А. Львовича «Динамическая чувствительность и помехоустойчивость радиотелеграфных устройств».

В секции *радиопередающих устройств* (руководитель проф. Б. П. Терентьев) кандидат техн. наук С. В. Персон и инженеры М. А. Соболев и Н. И. Эйдин сделали доклад «О методах проектирования мощных модуляционных трансформаторов». Доклад «Схема восстановления постоянной слагающей телевизионного сигнала в модуляционном устройстве УКВ передатчика» сделали кандидат техн. наук А. Н. Лебедев-Карманов и инж. А. Л. Файнштейн. Инж. Э. С. Глазман сделал доклад «Фильтры для частичного подавления одной боковой полосы в УКВ телевизионных передатчиках».

В секции *антенных устройств* (руководитель член-корр. Академии наук СССР А. А. Пистолькорс) был заслушан доклад доктора техн. наук, проф. С. И. Тетельбаума «О возможном коэффициенте полезного действия энергетического обмена между удаленными высоконаправленными антеннами». Докладчик поставил задачу найти также формы антенн, которые при фиксированных габаритах, взаимной удаленности и длине волны обеспечивают наибольший к. п. д. при наиболее выгодном в энергетическом отношении режиме бегущей волны, когда применяются односторонние излучающие антенны и сопротивление нагрузки приемной антенны выбрано равным сопротивлению излучения последней.



Кандидат техн. наук Б. В. Брауде сделал доклад «Принцип материализации волновых поверхностей в теории антенн».

Вопросам новых применений магнито-диэлектрических материалов в технике антенн были посвящены доклады: члена-корр. Академии наук СССР А. А. Пистолькорса «Излучение электромагнитного вибратора, заключенного в диэлектрический цилиндр», кандидата техн. наук А. Р. Вольперта

«О сопротивлении излучения вибратора окруженного шаровой магнито-диэлектрической оболочкой» и инж. Б. З. Каценленбаума «Электромагнитные колебания диэлектрических цилиндров».

Кандидат техн. наук И. И. Вольман сделал доклад «Выбор параметров, характеризующих волноводные системы».

Инж. М. Р. Резникин



## Итоги Всесоюзного конкурса 1947 г. на лучшее предложение по экономии электроэнергии

Общее количество поступивших в 1947 г. на Всесоюзный конкурс предложений (1367) значительно превысило число предложений, рассмотренных в 1946 г. Предложения поступили не только из центральных и крупных городов, но и из самых отдаленных районов страны. Активно участвовали в конкурсе черная и цветная металлургия, тяжелое и транспортное машиностроение, нефтяная промышленность, автомобильная, автотракторная и др. Следует отметить значительное усиление участия в конкурсе 1947 г. химической промышленности. Как положительное явление должно быть отмечено значительное участие в конкурсе производственных коллективов. Участие же научно-исследовательских институтов и вузов было весьма незначительным (16 предложений).

Все поступившие предложения прошли предварительную экспертизу, к участию в которой были привлечены около двухсот авторитетных специалистов из различных областей энергетики. Жюри конкурса провело большую работу по изучению всех поступивших предложений по экономии электрической и тепловой энергии. Кроме присуждения 79 премий 394 предложения получили положительную оценку экспертов и 57 предложений были отмечены, как представляющие принципиальный интерес, но требующие доработки и экспериментальной проверки. Авторы этих предложений приглашаются к участию в конкурсе 1948 г.

Эффективность принятых и отмеченных предложений по осторожным подсчетам экспертов определяется ежегодной экономией около 500 млн. kWh электрической энергии.

Большинство предложений связано с рационализацией технологических процессов. Это подтверждает то положение, что именно в технологии производства скрыты основные источники экономии энергии.

Одна из первых премий (15 000 руб.) присуждена инженерам А. Д. Бондаренко и А. С. Чеснокову (трест «Проектстальконструкция») за предложение «Скоростная ручная сварка ультракороткой дугой». За 1947 г. новый метод сварки получил большое распространение, а результаты произведенных испытаний подтвердили его высокую эффективность. Метод сварки «ультракороткой дугой» разработан на основе увеличения к. п. д. использования тепла, выделяемого вольтовой дугой при сварке. Его преимущества подтверждены соответствующими испытаниями и заключаются: в высоком качестве механических показателей сварных швов; в значительном ускорении сварки; в легкости сварки, доступной даже для малокавалифицированных сварщиков; в значительной экономии электроэнергии и электродов. Расход электроэнергии на сварку ультракороткой дугой одной тонны металлоконструкций составляет 20 kWh, а при обычной ручной сварке 88 kWh.

Схема ограничителя холостого хода дугового электросварочного аппарата, предложенная инж. Н. А. Соколовым (угольная шахта Дальстроя), признана наиболее рациональной, надежной в эксплуатации и доступной для выполнения местными силами и средствами. Она удостоена четвертой премии.

Одна из вторых премий (10 000 руб.) присуждена инженерам А. С. Молчанову и А. В. Гранжан (Сталинский алюминиевый завод) за предложение «Способ защиты контактов от окисления и улучшения их электротехнических свойств». Годовая экономия электроэнергии от применения этого предложения только на одном СТАЗ составила больше 8 млн. kWh.

Одна первая и одна третья премии присуждены коллективу работников завода Министерства химической промышленности за разработанные ими оригинальные конструкции электролизеров.

Группе технологов Уралмашзавода присуждена третья премия за предложение «Замена электростали модифицированным чугуном». Внедрение модифицированного чугуна взамен стальных отливок имеет большое народнохозяйственное значение. Авторы установили важную с производственной точки зрения зависимость между коэффициентом легированности и механическими свойствами чугуна, разработали методы модифицирования и уточнили технологию формовки деталей из модифицированного чугуна. Годовая экономия электроэнергии при переходе на модифицированный чугун взамен электростали только для одного Уралмашзавода составляет около 4 млн. kWh.

Одна из третьих премий присуждена коллективу энергетиков Кировского завода за «Мероприятия по экономии электроэнергии в термическом, литейном и кузнечном производствах».

Третьей премии удостоен инж. Г. А. Лукашенко (трест «Кавэлектромонтаж») за предложение «Схема автоматического управления перемещением электродов электропечи». Предложена схема автоматического управления тремя реверсивными шунтовыми электродвигателями, каждый из которых перемещает отдельно соответствующий электрод электропечи. Регулировка производится при непрерывно вращающихся генераторах. В основу данного предложения были положены теоретические исследования, освещенные в статье проф. С. И. Тельного (Электричество, № 5, 1946). Особенностью данного предложения является применение генераторов постоянного тока с переделанными обмотками возбуждения.

Коллектив сотрудников Научно-исследовательского кинофототеатра премирован за предложение, заключающееся в применении для питания кинопроекторных установок специально разработанного выпрямительного устройства ВУ-55 с селеновым вентилем и стабилизацией выпрямленного тока, которое поглощает почти вдвое меньшую мощность по сравнению с существующими ныне аналогичными установками. Годовая экономия электроэнергии от внедрения данного предложения для одного кинотеатра составляет 12 тыс. kWh.

Большое количество предложений, рассмотренных на конкурсе, связано с реконструкцией электротехнических печей и рационализацией технологических процессов в них.

Доц. Н. В. Окороков (Московский институт стали им. Сталина) получил одну из пятих премий за предложение «Реконструкция загрузочных окон дуговых сталеплавильных печей и рационализация загрузки мульдами». Обер-мастер электропечей Н. И. Козловский (Верх-Исетский металлургический завод) получил четвертую премию за рационализаторское предложение, связанное с изменением способа наварки подина сталеплавильных печей.

Одна из пятих премий присуждена начальнику термической мастерской завода им. Горбунова К. А. Ковалеву за предложение, связанное с рационализацией процесса закалки сверл.

Для скорейшей реализации принятых предложений Жюри конкурса постановило издать сборник предложений, премированных на конкурсе.

*Инж. А. К. Шадрин*

## В Научно-техническом обществе МЭИ

В апреле и мае 1948 г. НТО Московского энергетического института им. Молотова совместно с отделом научно-исследовательских работ института провело в отделениях и секциях НТО шесть научно-технических конференций, посвященных обсуждению исследовательских работ, выполненных сотрудниками института в 1947 г.

На конференции электроэнергетической секции были заслушаны следующие доклады, подводящие итоги работ кафедры техники высоких напряжений и кафедры электрических станций: кандидата техн. наук А. В. Разевига «Исследование индуцированных перенапряжений», Е. Я. Рябковой «Заземлители при импульсных токах», кандидата техн. наук, доц. П. В. Борисоглебского «Анализ погрешностей измерения угла диэлектрических потерь на мосте Шеринга по схеме В. В. Пучковского», доктора техн. наук, проф. А. А. Глазунова «Установление новых рациональных стандартных напряжений для электрических сетей высокого напряжения» и кандидата техн. наук, доц. С. А. Ульянова «Разработка простейшего метода расчета токов коротких замыканий и координация его с параметрами аппаратуры».

Конференция электромеханической секции в трех заседаниях заслушала доклады: доктора техн. наук, проф. В. Ю. Ломоносова «Магнитное поле лобовых частей обмотки», кандидата техн. наук, доц. Ф. А. Горянова «Рототрол в мостиковой схеме», доктора техн. наук, проф. А. Я. Буйлова «Новый метод расчета тяговых электромагнитов», доктора техн. наук, проф. С. И. Артоболевского «Механизмы свободного расщепления в автоматах защиты электросетей», доктора техн. наук, проф. С. М. Брагина «Исследование пропитывающего состава для силовых кабелей на основе Буна S и полиизобутилена взамен канифоли», кандидата техн. наук И. И. Шумского «Разработка методов испытания и установление показателей для лакотканей».

На конференции секции электрификации промышленности и транспорта с докладами выступили: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук, доц. В. П. Бычков «Методы форсирования процессов возбуждения генератора системы Леонарда», кандидат техн. наук, доц. Б. П. Петров «Автоматическое управление электроподвижным составом городского электротранспорта с компаундными и серийными двигателями», кандидат техн. наук, доц. Г. Г. Марквардт «Выбор рациональной системы токоприемника для троллейбуса», кандидат техн. наук, доц. А. М. Вайнберг «Выбор системы автоматического регулирования режима дуговых сталеплавильных печей», доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов и кандидат техн. наук, доц. А. С. Сандлер «Электрический привод аэродинамических труб», кандидат техн. наук, доц. И. П. Барбараш «Электропривод эскалаторов метро, инж. И. Б. Баиук «Электроспидометр для вагонов метрополитена» и инж. Н. А. Загайнов «Исследование блуждающих токов на трамвае».

Конференция секции теоретической электротехники и обсудила четыре доклада: проф. А. В. Талицкого «Новые конструкции приборов для массового производственного контроля катушек по числу витков и выявлению замкнутых витков», кандидата техн. наук Ф. В. Майорова «Магнитоотрицательный метод и приборы для измерения деформации в деталях машин», доктора техн. наук, проф. К. М. Поливанова «О свойствах ферро-

магнетиков в переменных полях», доктора техн. наук, проф. Г. В. Брауде «Расчет сложной схемы коррекций телевизионных усилителей».

На конференции теплотехнического отделения было сделано 15 докладов; на конференции гидроэнергетического отделения — 12.

В этот же период состоялось семь конференций, ознакомивших профессорско-преподавательский состав и студентов МЭИ с вопросами истории отечественной науки и с работами русских ученых. Доктор техн. наук, проф. Л. Д. Белькинд представил доклад «В. Н. Чиколев и русские электротехники», кандидат техн. наук И. Д. Артамонов — доклад «Жизнь и деятельность В. Н. Чиколева», доктор техн. наук, проф. А. Н. Ларионов — «Пути развития отечественного специального машиностроения», проф. В. А. Привезенцев — «Обзор развития техники производства обмоточных проводов и применения новых типов их в специальном электромашиностроении», доктор техн. наук, проф. Л. Д. Белькинд — «Исторический очерк техники электрического освещения в России в XIX столетии», доктор техн. наук, проф. К. М. Поливанов — «Роль русских ученых в развитии учения о ферромагнетизме», кандидат техн. наук, доц. Б. М. Манцев — «Ломоносов и его работы в области физики», доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов — «Роль русских электротехников в развитии электропривода», доктор техн. наук, проф. Д. К. Минов — «Роль русских ученых в развитии теории электрической тяги».

Деятельности русского ученого М. О. Доливо-Добровольского была посвящена конференция, состоявшаяся при участии электромеханического факультета. На этой конференции доктор техн. наук, проф. Г. Н. Петров выступил с докладом «Доливо-Добровольский и его роль в развитии электротехники». Кандидат техн. наук, доц. П. С. Сергеев сделал доклад «Работы Доливо-Добровольского в области трансформаторов и асинхронных двигателей». Ряд малоизвестных фактов был сообщен в докладе доктора техн. наук, проф. Л. Д. Белькинда «Московские электротехники 70—80-х годов XIX века». Кандидат техн. наук А. И. Сандлер в докладе «Русский электротехник Ленц» рассказал о работах Э. Х. Ленца и привел его биографические данные.

Кроме указанных выше докладов на очередных заседаниях Общества также был заслушан ряд докладов. На секции электрических систем обсуждался доклад кандидата техн. наук И. А. Сыроматникова «Работа турбогенератора при потере возбуждения». Секция теоретической электротехники заслушала доклад кандидата физико-матем. наук, доц. А. Д. Сахарова «Магнитные свойства элементарных частиц и их роль при намагничивании вещества». Радиотехническая секция заслушала доклады: доктора техн. наук, проф. А. Н. Казанцева «Развитие советской науки о распространении радиоволн». В светотехнической секции выступили: доктор техн. наук, проф. Н. М. Гусев с докладом «Проект норм естественного освещения», доктор техн. наук, проф. М. В. Соколов — «Моделирование осветительных установок», кандидат техн. наук, Б. И. Луговской — «Современное состояние стандартизации электрических ламп», С. Г. Юров и сотрудник ВЭИ В. С. Хазанов — «Фотометрические свойства селеновых фотоэлементов», доктор техн. наук, проф. С. О. Майзель — «Некоторые исследования в области физиологической оптики».

*Кандидат техн. наук, доц. В. А. Веников*

## Совещание по выбору рода тока для механизмов прерывистого режима в черной металлургии

Дом инженера и техника им. Дзержинского, Московское отделение научно-инженерно-технического общества энергетики (МОНИТОЭ), Московское проектно-конструкторское управление Центроэлектромонтажа и Энергосекция ВНИТО металлургов провели 15 апреля 1948 г. однодневное техническое совещание инженеров заинтересованных организаций по вопросу о выборе рода тока для механизмов прерывистого режима в черной металлургии.

На совещании было заслушано 4 доклада.

Инж. С. М. Лившиц (Центроэлектромонтаж) в докладе «Выбор рода тока для крановых и вспомогательных механизмов прерывистого режима в черной металлургии» отметил, что этот вопрос дважды рассматривался на общественно-технических конференциях советских энергетиков: на 1-ой энергетической конференции по электроприводу в Харькове в апреле 1930 г. и на Всесоюзном совещании по электрооборудованию металлургических заводов, созванном УКРНТОЭ в Харькове в июле 1938 г. На конференции 1930 г. был рекомендован постоянный ток; на совещании 1938 г. в результате накопленного опыта рекомендации 1930 г. были изменены, правда осторожно, в пользу более широкого применения переменного тока для кранов и вспомогательных механизмов. Эксплуатационный опыт работы механизмов на переменном токе показал достаточную надежность. Отдельные дефекты в конструкции выпускаемых электродвигателей и тормозов переменного тока вполне устранимы современными техническими средствами. Как известно, асинхронный электродвигатель в эксплуатации более надежен, чем двигатель постоянного тока; имеется возможность существенного усовершенствования систем управления переменного тока для достижения там, где это имеет практическое значение, технических параметров, равноценных системам управления на постоянном токе. В то же время капитальные затраты на электроприводы прерывистого режима, включая преобразовательные установки, при переменном токе в 2—2,5 раза меньше, чем при постоянном токе, а потери энергии в трансформаторах в 5—6 раз меньше, чем в преобразователях.

Применение переменного тока при крупном строительстве заводов черной металлургии, предусмотренном сталинской пятилеткой, обеспечит значительный экономический эффект.

Практика выбора постоянного тока для всех механизмов прерывистого режима по соображениям унификации двигательного парка является экономически и технически неоправданной и потому ошибочной. Новый ГОСТ 185-47 на краново-металлургические электродвигатели переменного тока обеспечивает получение высоких электродинамических показателей, ставящих эти машины на уровень лучших мировых конструкций.

Инж. Н. А. Тищенко (Проектно-восстановительный трест МЭП) в докладе «Вопросы применения электродвигателей переменного тока для механизмов прокатных цехов» отметил успешную эксплуатацию электродвигателей переменного тока на работающих в СССР прокатных станах. Наряду с широким применением переменного тока для интенсивно работающих механизмов применяется система Леонарда. Двигатели переменного тока индивидуальных рольгангов, с полным валом, питаются либо от сети 50 Hz, либо от преобразователей частоты. Небольшое количество механизмов

целесообразно питать от сети постоянного тока 220 V. Опыт эксплуатации прокатных станов в СССР подтверждает целесообразность применения напряжения 380 V переменного тока и 220 V постоянного тока.

Технико-экономические данные по применению смешанного рода тока для 4 типичных прокатных станов показывают значительную стоимость системы Леонарда, к применению которой поэтому нужно относиться с осторожностью.

При применении переменного тока особым преимуществом в отношении надежности обладают двигатели с короткозамкнутым ротором. Особое внимание нужно уделить внедрению надежных реле для защиты двигателей с короткозамкнутым ротором при «застопоривании» двигателя. Следует, по возможности, ограничивать применение электромеханических тормозов, широко внедряя электродинамическое торможение асинхронных двигателей.

Инж. А. А. Рабинович (завод «Динамо» им. Кирова) сделал доклад «О крановом электрооборудовании переменного тока для металлургических цехов».

Инж. С. Н. Вешеневский (Центроэлектромонтаж) сообщил об опыте внедрения переменного тока на металлургическом заводе «Красный Октябрь», где в процессе восстановления завода была переведена на переменный ток часть кранов и вспомогательных механизмов, работавших до 1941 г. на постоянном токе. Эксплуатационный персонал завода (инженеры, цеховые электрики, операторы, крановожаты) приветствовали перевод оборудования на переменный ток. Однако некоторые механизмы, работающие ныне на переменном токе (например, нажимные винты блуминга), целесообразно перевести на управление по системе Леонарда. Постоянный ток имеет известные преимущества для механизмов подъема. Но в большинстве случаев эти преимущества не используются из-за совмещения на кране операций подъема с работой механизмов движения. Для некоторых механизмов (разливочный кран и др.) преимущества постоянного тока практически несущественны по причине низкой абсолютной скорости подъема (2—5 m/min) и малого значения машинного времени подъема в общем цикле работы крана.

Большинство подъемных механизмов металлургических кранов (тиглер, пратцен, магнитные краны шихтового двора) могут работать с простейшими схемами управления — симметричной или со спуском на противовключение — благодаря наличию большой постоянной нагрузки на крюке, клещей, траверз, подъемных магнитов. Докладчик подробно остановился на необходимых улучшениях в оборудовании переменного тока: двигателях, тормозах, аппаратах управления.

В прениях инженеры-электрики из министерств черной металлургии и тяжелого машиностроения приветствовали расширение области применения переменного тока в крановых и стационарных механизмах металлургии. Выступавшие особо подчеркивали настоятельную необходимость улучшения качества и характеристик изготовляемого электрооборудования переменного тока для расширения применения переменного тока на технологических кранах.

Инж. С. М. Лившиц



## Районные электростанции-новостройки

**Гюмушская гидроэлектростанция.** Крупнейшей из семи каскадно располагаемых гидростанций на реке Занги, вытекающей из высокогорного озера Севан (Армения), будет сооружаемая Гюмушская гЭС. Ее гидроэнергетическая схема—деривационная. Общая протяженность туннелей и закрытых и открытых каналов деривации достигнет почти 18,5 км. Электроэнергия будет передаваться в Ереван и другие районы Армении. Строителям Гюмушской гЭС предстоит произвести более 2,5 млн. м<sup>3</sup> земельно-скальных и туннельных выемок, до 632 тыс. м<sup>3</sup> бетонных, железобетонных и каменных работ и др.

**Мингечаурская гидроэлектростанция.** Одной из крупнейших в стране будет сооружаемая в Азербайджанской ССР между Баку и Тбилиси Мингечаурская гидроэлектростанция на реке Кура у подножья горного хребта Боз-даг. Дешевой электроэнергией Мингечаурской гЭС усиливается электроснабжение промышленности Бакинского и Кировобадского районов республики и одновременно решается задача орошения значительной территории Кура-Араксинской низменности (всего более 1,32 млн. га). Кроме того, сооружение Мингечаурского гидроузла позволит ликвидировать заболачивание от ежегодных наводнений долины реки Куры, порождавшее малярийность, и улучшит условия судоходства на участке Каспий—Евлах. Грандиозным гидротехническим сооружением Мингечаурской гЭС будет ее земляная плотина высотой 76,5 м и длиной 1540 м. Строительство Мингечаурского гидроузла включает 34 млн. м<sup>3</sup> земляных и 850 тыс. м<sup>3</sup> бетонных работ.

**Горьковская гидроэлектростанция.** Сооружение Горь-

ковской гЭС на реке Волге разрешит помимо энергетической задачи важную проблему улучшения условий судоходства на значительном участке Волги от города Шербакова до устья Оки. Основными гидротехническими сооружениями Горьковской гЭС являются: водосливная бетонная плотина длиной 336 м, земляная дамба протяжением 12,6 км, большой двухступенчатый шлюз для пропуска пароходов, барж и плотов. Строителям Горьковской гЭС предстоит вынуть и насыпать более 30 млн. м<sup>3</sup> грунта, что в два раза превысит объем земляных работ на Днепрострое. В здание гЭС, в плотину и в сооружения шлюза будет уложен 1 млн. м<sup>3</sup> бетона и железобетона; будет смонтировано до 10 тыс. т металлоконструкций. На площадку строительства уже прибыло большое количество машин для механизации строительно-монтажных работ.

**Щекинская электростанция.** В одном из районов месторождения подмосковных бурых углей сооружается районная Щекинская тепловая электростанция.

**Нижне-Туринская электростанция.** На базе угля богословских и волчанских месторождений ведется сооружение мощной районной тепловой электростанции Среднего Урала — Нижне-Туринской электростанции. Эта станция будет иметь оригинальную тепловую схему; она сооружается с котлами высокого давления и с предвключенными турбинами.

**Южно-Кузбасская электростанция.** В Кузнецком угольном бассейне ведется строительство мощной районной тепловой электростанции. Эта электростанция будет одной из наиболее крупных электростанций Сибири.



## К УСТАНОВЛЕНИЮ ПРЕМИИ ИМЕНИ П. Н. ЯБЛОЧКОВА И ИЗДАНИЮ ЕГО ТРУДОВ

Президиум Академии наук СССР утвердил состав ряда комиссий для рассмотрения и оценки работ, представляемых на соискание премий имени выдающихся русских ученых в различных областях техники и технических наук. Комиссия по премии имени П. Н. Яблочкова за лучший труд по электротехнике и светотехнике, учрежденной постановлением Совета Министров СССР 17 сентября 1947 г. в размере 20 000 рублей, утверждена в составе: академиков В. П. Никитина (председатель), В. С. Кулебакина, В. Ф. Миткевича, членов-корр. АН СССР М. П. Костенко, К. А. Круга, М. А. Шателена и доктора техн. наук, проф. М. В. Соколова.

В связи с постановлением Совета Министров СССР об издании трудов П. Н. Яблочкова, Отделение технических наук АН СССР внесло в Редакционно-издательский совет Академии наук СССР (РИСО) предложение об учреждении Комиссии по изданию трудов П. Н. Яблочкова. На заседании РИСО 12 июля с. г. под председательством академика С. И. Вавилова представление ОТН было принято и Комиссия по изданию трудов П. Н. Яблочкова была утверждена в следующем составе: член-корр. АН СССР М. А. Шателен (председатель), академик В. Ф. Миткевич, академик В. П. Никитин, член-корр. АН СССР К. А. Круг, доктор технических наук, проф. Л. Д. Белькинд и доктор техн. наук, проф. М. В. Соколов (ученый секретарь).

## Книга о русской технике

**В. В. ДАНИЛЕВСКИЙ. РУССКАЯ ТЕХНИКА.** Ленинградское газетно-журнальное и книжное издательство, 1947, стр. 484, тираж 10 000, ц. 30 руб.

Появление книги В. В. Данилевского «Русская техника» справедливо отмечено широкой печатью как заметное событие в жизни советской науки. Эта патристическая книга, повествующая о замечательных подвигах русского народа в развитии техники, о научно-техническом творчестве русских людей и огромном значении сделанного ими вклада в мировую науку и технику, заслужила высокую оценку, которая выразилась в присуждении автору Сталинской премии.

В. В. Данилевский осветил в своей книге вопросы, связанные с развитием—за период от древней Руси до конца XIX века—только трех основных и важнейших отраслей техники—металлургии, машиностроения и энергетики, и привлек для этого материалы из архивных фондов, патентных публикаций, старых технических изданий и т. п. Несмотря на сделанное ограничение, автор тем не менее поставил перед собой большую задачу, разрешение которой в объеме одного тома представляет значительные трудности. В. В. Данилевский разрешил эту задачу в плане доступного изложения, рассчитанного на широкий круг читателей, изложения, освобожденного от громоздкого аппарата примечаний и пояснений и, повидимому, не претендующего на систематическое, последовательно-хронологическое и исчерпывающее освещение истории указанных трех основных отраслей русской техники.

Книга состоит из ряда тематических разделов—очерков: «Русский металл», «Горнозаводская техника», «Русская механика», «Машины и машиноведение», «Русская технология», «Гидросиловые установки», «Русский свет», «Промышленная электроэнергетика», «Русские крылья», «Народ—техник». Этими очерками автор приводит читателя к обобщающим выводам о роли и приоритете русских новаторов—ученых, инженеров, изобретателей, мастеров своего дела в разрешении важных технических проблем, определявших развитие отдельных отраслей техники. Перед читателем проходят одно за другим сотни широко известных и забытых имен смелых, самоотверженных, талантливых сынов русского народа, двигавших вперед науку и технику в условиях помещичье-капиталистического гнета царской России, когда многие открытия и изобретения не находили себе применения.

Чтобы судить об общем стиле повествования, далеко от сухого анализа обширного фактического материала, можно привести названия отдельных глав, которые, например, посвящены вопросам электротехники: «Голубиная книга», «Грозовая машина», «Электрическая сила», «Пионеры электропередачи», «Творцы электрической сварки» и т. д.

Из 432 страниц основного текста автор отвел вопросам русской науки об электричестве и русской электротехники 84 страницы. Так же как и в других областях науки и техники, в области исследований электричества перед читателем вырисовывается огромное значение трудов великого М. В. Ломоносова. Это удалось достаточно ярко показать В. В. Данилевскому в своей книге. «Сыскать подлинную электрической силы причину и составить ее теорию»—этими ломоносовскими словами, которые сформулировала задачу, поставленную перед учеными всего мира Российской Академией наук, открывается раздел книги, называющийся «Русский свет». Автор рассказывает, какими путями шел М. В. Ломоносов к разработке оригинальной теории электричества, которая отличается своей ясной материалистичностью от господствовавших в

XVIII в. метафизических представлений в этой области.

«Мысли Ломоносова об электричестве,—пишет В. В. Данилевский,—получили свое дальнейшее развитие в делах В. В. Петрова, В. Н. Каразина, Б. С. Якоби, П. Л. Шиллинга, П. Н. Яблочкова и многих других русских электриков XIX в.

Русский народ, как показывают творческие дела его сынов, услышал и крепко запомнил обращенные к нему слова Ломоносова, прозорливо еще в 1760 г. указавшего на электрические опыты «и приятные и великую надежду к человеческому благополучию показующие» (стр. 301).

Среди материалов, посвященных русской электротехнике, следует особо отметить главу о пионерах передачи электроэнергии на дальние расстояния. Здесь В. В. Данилевский обращает внимание на мало известные и вместе с тем имеющие важное значение в истории электротехники труды Ф. А. Пироцкого.

В 1874 г. Ф. А. Пироцкий произвел в Петербурге в больших по тому времени масштабах опыты, показавшие возможность передачи на дальние расстояния значительных мощностей. Интересно по смелости и оригинальности постановки вопроса статья Ф. А. Пироцкого «О передаче работы воды, как двигателя, на всякое расстояние посредством гальванического тока», которая была опубликована в «Инженерном журнале» в 1877 г. Редакция журнала сопроводила эту публикацию характерным примечанием: «Помещая эту статью, редакция слагает с себя всякую ответственность относительно практической стороны дела и смотрит лишь на предложение автора как на мысль, во всяком случае заслуживающую внимания».

Ф. А. Пироцкий в своей статье писал: «Ввиду громадных издержек, необходимых на содержание паровых двигателей больших заводов и фабрик, нам пришла мысль о возможности передачи работы воды, как самого дешевого двигателя, на известное расстояние посредством гальванического тока, полученного какой-либо динамомашинной. ...У нас в России передача работы может иметь огромное применение, в чем нетрудно убедиться, взглянув на карту».

Ф. А. Пироцкий не ограничился высказыванием этих положений, которые сами по себе представляют большой интерес (следует учесть, что они были выдвинуты за несколько лет до известных опытов и опубликованных работ М. Депре!), но и произвел расчеты и сопоставления производства электроэнергии в условиях водноэнергетической и теплоэнергетической установок. Доказав эффективность использования водных сил для производства электроэнергии, он пришел к выводу:

«Не странно ли после этого видеть употребление динамоэлектрических машин исключительно лишь для освещения и частью для гальванопластики, тогда как они далеко с большей пользою могли бы служить для передачи работы, огня и света (как это показано на чертежах) и даже для передачи звука».

Таким образом, Ф. А. Пироцкий в 1876 г. указал на возможность и необходимость универсального использования электроэнергии в ряде новых конкретных направлений, следуя в этом отношении традициям русских ученых и инженеров, работавших до него в области исследования и применения электричества.

В. В. Данилевский уделяет место и трудам другого замечательного русского пионера в области передачи

электроэнергии—Д. А. Лачинова, разработавшего теоретические основы электропередачи также до опубликования соответствующих работ М. Депре. В 1880 г. Д. А. Лачинов, как известно, опубликовал в журнале «Электричество» (№ 1, 2, 5, 6 и 7) труд «Электромеханическая работа», где теоретически доказал возможность и целесообразность передачи электрической мощности на расстояние. Знаменательно, что Д. А. Лачинов в этой статье подчеркнул большое значение разработки теоретических основ электротехники.

Рассказывая о достижениях русской научно-технической мысли, В. В. Данилевский не преуменьшает значения работ тех зарубежных ученых и инженеров, которые внесли свой ценный вклад в развитие мировой техники. Так, например, говоря о заслугах Пироцкого и Лачинова, автор указывает на большое значение работ Фонтэна и Депре в области передачи электроэнергии. Автор пишет, что установка Мисбах—Мюнхен (1882 г.) и последующие практические труды Депре закрепили именно за ним известность творца первых линий электропередачи на большие расстояния. «Чтя память Марселя Депре—замечательного пионера электрических передач на большие расстояния,—мы должны вместе с тем отдать должное почиту Д. А. Лачинова, сделавшего и опубликовавшего открытие, к которому французский новатор пришел только через пятнадцать месяцев после того, как был опубликован труд русского автора теории передачи электрической энергии на большие расстояния.

Слава Марселя Депре—это одновременно и слава его предшественника—Дмитрия Лачинова» (стр. 346).

В своем предисловии к книге В. В. Данилевский признает, что в его книге, обобщающей обширные материалы, трудно было избежать упущений и недостатков. Некоторые из них позволим себе отметить в настоящей рецензии.

Наиболее существенный и общий недостаток книги В. В. Данилевского, который отмечался и в дискуссии, проведенной в начале 1948 г. Отделением технических наук Академии наук СССР, заключается в том, что его очерки слабо связаны со всей историей, социально-экономическим и политическим развитием России.

Как правильно отмечал в своем выступлении в дискуссии А. С. Нифонтов (Институт истории Академии наук СССР), нельзя дать правильного представления о достижениях русских техников-новаторов, игнорируя общий процесс исторического развития нашей родины. На протяжении тысячелетия (от походов Олега в X в. до 1917 г.) русский народ прошел через все этапы и феодальных и капиталистических общественных отношений, что имело решающее влияние на развитие техники и на творческую деятельность техников-новаторов. В работе В. В. Данилевского этот коренной вопрос обойден молчанием. Достаточно сказать, что в ней нет ни слова о техническом и промышленном перевороте в России на протяжении XIX в., хотя вопрос об этом перевороте представляет большой интерес. В книге В. В. Данилевского люди показаны вне конкретной исторической действительности, без учета, при анализе технического творчества, развития производительных сил и производственных отношений на каждом этапе и феодального и капиталистического строя. В результате этого в книге стираются грани между подневольным трудом при феодально-крепостническом строе, кабальным наемным трудом при капитализме и свободным трудом при советской власти.

Конечно, для того чтобы уделить место анализу развития техники в определенных социально-экономических и политических условиях России, автору пришлось бы при том же объеме книги ограничиться систематическим рассмотрением наиболее важных событий истории русской техники, но тогда книга, несомненно, выиграла бы в смысле глубины, обоснованности и последовательности изложения.

В. В. Данилевский, как отмечалось выше, стремится осветить труды русских деятелей науки и техники с учетом развития мировой науки и техники. Однако, для того, чтобы показать все величие и значение русского вклада в мировую технику, необходимо было бы более подробно остановиться на проблемах, стоявших перед наукой и техникой на разных этапах. Вместо этого автор нередко только перечисляет имена изобретателей и ученых, не

указывая подчас даже, над какими конкретными вопросами они работали. При этом среди большого количества имен имеется немало случайных.

Вот как, например, выглядит описание состояния учения об электричестве до появления на исторической арене М. В. Ломоносова:

«... Вплоть до XVII в. в области изучения собственно электрических явлений почти не было добавлено к тому, что было известно со времен Талеса, Теофраста, Плиния. Новая эпоха в этом деле началась с издания в 1600 г. Уильямом Джильбертом книги «О магните, магнитных телах и большом магните—Земле». Джильберт, исходя из произведенных им опытов, выступил с попыткой дать теорию наблюдавшихся им электрических явлений, объясняя их истечениями. В 1639 г. появился труд по «Магнетической философии» Николло Кабео, подобный труду Джильберта. Много нового внесли в изучение электрических явлений в XVII в. Отто Герике и Исаак Ньютон. В XVIII в. изучением электричества занялось уже большое число ученых, сделавших немало замечательных открытий и создавших целую серию приборов для получения и изучения электричества: Уолл, Гауксби, Грэй, Дю-Фей, Мушенбрек, Клейст, Нолле, Уатстон, Бенджамен Франклин и другие.

Представители разных стран много потрудились, но все дело было еще в самом зародыше, когда во многовековой труд по изучению электричества включились русские исследователи в главе с М. В. Ломоносовым» (стр. 290).

Что узнает читатель из этих строк, в которые уложена вся история учения об электричестве от Гильберта до Ломоносова? Кроме нескольких имен в этом абзаце ничего не содержится. Утверждение о том, что новая эпоха начинается с Гильберта и что много нового в изучение электричества внес Ньютон, ничем не подтверждается автором.

Читателю следовало бы пояснить, что главное в трудах Гильберта не теоретические изыскания, а экспериментальные исследования, увенчавшиеся открытием целого ряда новых фактов, чем и заслужил известность Гильберт в истории науки. Автор даже не упоминает, что именно Гильберт первый стал резко отличать явления электрические от магнитных.

Вряд ли можно утверждать, что Исаак Ньютон много внес в изучение собственно электрических явлений. Как известно, Ньютон специально этими вопросами не занимался. В истории учения об электричестве известен лишь один его опыт, наглядно демонстрировавший явление притяжения и отталкивания наэлектризованным телом ненаэлектризованного.

Недоумение вызывают имена Мушенбрека и Клейста. С ними обыкновенно связывается открытие лейденской банки. Однако, заслуги Мушенбрека заключаются только в том, что он сообщил Парижской Академии наук об опыте лейденского экспериментатора Кунеуса, который изобрел электрический конденсатор. Упоминать же имя Клейста, значит повторять утверждение немецких шовинистических историков науки, что лейденская банка немецкого изобретения и что принятый в литературе и употреблявшийся в течение двух веков термин «лейденская банка» следует заменить термином «банка Клейста».

Автор в своей книге, к сожалению, не обращает должного внимания на притязания иностранных дельцов на изобретения русских ученых. А ведь еще в прошлом веке было установлено, например, что так называемый «аппарат Уитстона и Кука» есть не что иное, как телеграф П. Л. Шиллинга. Изворотливый англичанин Кук, ознакомившись с аппаратом Шиллинга, ловко сообразил, что сулит практическое применение такого нововведения, особенно на железнодорожном транспорте. Кук тотчас же заказал себе такой аппарат, повез его в Англию, вошел в компанию с Чарльзом Уитстоном и нажил состояние на «телеграфе Кука и Уитстона». На изобретении, сделанном в России, нажился и немецкий предприниматель Вернер Сименс. Дошедшие до нас документы неопровержимо свидетельствуют, что так называемый телеграфный аппарат Сименса является изобретением Б. С. Якоби. Доклад Б. С. Якоби (9 октября 1857 г.) Петербургской Академии наук, в котором сообщается о факте плагиата, совершенном



В. Сименсом, был опубликован не один раз и неоднократно цитировался в нашей литературе, в частности в журнале «Электричество», но об этом ничего не говорится в рецензируемой книге, как не упоминается и явный факт плагиата, совершенного Шуккертом, который присвоил себе изобретение В. Н. Чиколева, о чем также в свое время сообщалось в журнале «Электричество».

Не получили необходимого освещения в книге важнейшие работы П. Н. Яблочкова в области трансформации и применения переменного тока.

Правда, эти работы Яблочкова гораздо меньше освещены в литературе, чем его труды в области электрического освещения; последние, как известно, довольно подробно изучены, и автор уделяет им почти все страницы своей книги, посвященные Яблочкову. О работах же, свя-

занных с трансформатором и переменным током, упоминается весьма кратко. Виднейшему электротехнику XIX в. В. Н. Чиколеву—основателю светотехники в России, труды которого в мировой литературе считаются классическими, в рецензируемой книге уделено буквально несколько строк и то в виде цитаты (стр. 362).

Отмеченные недостатки не могут снизить определенной ценности книги В. В. Данилевского, в последующих переизданиях которой автором, следует надеяться, будут в возможной мере учтены все критические замечания.

В заключение необходимо подчеркнуть, что книга В. В. Данилевского представляет собою значительный шаг вперед в разработке истории русской техники, и также помогает воспитанию советского патриотизма.

Инж. Я. А. Климович



## Избранные труды М. О. Доливо-Добровольского о трехфазном токе

М. О. ДОЛИВО-ДОБРОВОЛЬСКИЙ. ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ (О ТРЕХФАЗНОМ ТОКЕ). Классики русской энергетики. Под общей редакцией академика С. И. Вавилова. Государственное энергетическое издательство, 1946, 214 стр., ц. 9 руб.

Общепризнано, что у истоков современной электрификации стоит замечательная фигура знаменитого русского электротехника М. О. Доливо-Добровольского. Разработанная им система применения трехфазного тока послужила той научно-технической базой, на которой развивалась электроэнергетика. Естественно, поэтому, что Государственное энергетическое издательство, предпринимая издание классических трудов по энергетике, придерживалось не хронологического принципа, а начало именно с произведений М. О. Доливо-Добровольского, без работ которого нельзя себе представить победного проникновения электрического тока во все виды производства.

Работы, включенные в настоящее издание, относятся почти ко всему творческому периоду жизни М. О. Доливо-Добровольского — с 1891 по 1919 гг. Всего помещено пять мемуаров: «Передача энергии посредством переменных токов различных фаз (трехфазный ток)» (1891); «О коэффициенте полезного действия трансформатора» (1892); «Современное развитие техники трехфазного тока» (1900); «Из истории трехфазного тока» (1911) и «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния» (1919).

Работам М. О. Доливо-Добровольского предпослана статья Г. М. Кржижановского «Работы М. О. Доливо-Добровольского и их значение». Книга заканчивается краткой биографией Доливо-Добровольского, написанной Л. Д. Белькиным, и им же составленным перечнем главнейших работ М. О. Доливо-Добровольского. Кроме того, от издательства дано еще предисловие. В нем изложены принципы, которых придерживалась редакция, публикуя работы, относящиеся к разным периодам, и отмечена цель, которую преследует издательство, выпуская настоящее издание. Она определена следующими словами: «Цель настоящего сборника — широко ознакомить советских электротехников с главнейшими работами М. О. Доливо-Добровольского по вопросам трехфазного тока; пять статей, включенных в сборник, тесно примыкают по содержанию одна к другой, хотя относятся к разным периодам деятельности автора».

Далее в кратких чертах охарактеризовано значение каждой из публикуемых работ Доливо-Добровольского, названного в предисловии «последним представителем блестящей плеяды русских электротехников второй половины XIX в., насчитывающей славные имена П. Н. Яблочкова, А. Н. Лодыгина, В. Н. Чиколева и А. С. Попова». Это утверждение не совсем точно. А. Н. Лодыгин (1847—1923), хотя и был намного старше М. О. Доливо-Добровольского, но умер позднее.

Нельзя также полностью согласиться с общим принципом публикации работ Доливо-Добровольского, принятым редакцией рецензируемого издания. В своей статье Г. М. Кржижановский подчеркивает: «Громадное по своему значению научное и техническое наследство М. О. Доливо-Добровольского только частично заключается в его статьях-докладах и рефератах, до сих пор сохранивших свое значение как фундаментальный вклад в электротехническую науку; основное наследство Доливо-Добровольского — это до мельчайших деталей разработанная система применения трехфазного тока, построение первых асинхронных трехфазных двигателей, трехфазных трансформаторов, фазометра и других приборов. Ему принадлежит осуществление с высочайшим к. п. д. первой в мире передачи электрической энергии на расстояние при помощи трехфазного тока, положившей начало широкой электрификации, приведшей к неизмеримо большим изменениям в народном хозяйстве отдельных стран и в мировой экономике (стр. 11).

Из этих слов видно, что одни только выступления и печати не характеризуют еще всего облика крупнейшего русского электротехника, и можно было бы ожидать, что, хотя бы в виде приложения, будут даны главнейшие патенты М. О. Доливо-Добровольского, исключительного новатора в области электромашиностроения. К сожалению, этого мы не находим в рецензируемом издании, которое, несомненно, во многом выиграло бы от публикации таких материалов.

Выпущенное Госэнергоиздатом издание не свободно от других недостатков, которых можно было бы избежать, если бы был учтен опыт подобных изданий классических трудов, как правило, снабженных не только исследовательскими статьями, биографическими очерками и библиографическими справками, но и комментариями к собственному слову. Правда, в предисловии говорится, что «сохранены... некоторые устаревшие термины (например, ваттны, безваттны и др.), так как замена их другими, принятыми в настоящее время, создала бы неправильное представление о стиле автора и современной ему терминологии» (стр. 10).

Разумеется, ни издательству, ни редактору, ни переводчику не дозволено нарушать стиль автора, и издаваемое сочинение классика должно быть точно воспроизведено. Но к таким произведениям должны быть приложены соответствующие примечания, в которых все анахронизмы должны быть отмечены и объяснены. Правда, в работах М. О. Доливо-Добровольского, являющегося, по существу, нашим современником, таких мест немного. При

изданий же произведений более ранних авторов речь будет идти о значительном количестве устаревших, с точки зрения современной науки, положений, утверждений и выводов, и не оговаривать их в специальных примечаниях, — значит механически воспроизводить текст. Надо надеяться, что в последующих выпусках серии «Классики русской энергетики» раздел комментариев будет обязательной частью.

Необходимо отметить допущенную во вступительной статье к сборнику неточность в отношении известной установки по передаче электроэнергии Лауфен—Франкфурт, в устройстве которой М. О. Доливо-Добровольский принимал руководящее участие. В статье говорится, что на этой установке удалось передать 300 kW трехфазным током при напряжении 8 500 V (стр. 16). Между тем, в статье М. О. Доливо-Добровольского «Из истории трехфазного тока» (стр. 173, 176 и др.) определенно указывается, что в электропередаче Лауфен—Франкфурт напряжение достигало 30 000 V и выше. Кстати сказать, эта неточность (8 500 V) в отношении данной электропередачи допускалась в ряде изданий (Б. Г. Кузнецов, «История энергетической техники», ОНТИ, 1937; Ф. Л. Вейтков, «Как создавалась электрификация страны Советов», Госполитиздат, 1947 и др.).

Отмеченные недостатки, разумеется, не снижают общей большой ценности рецензируемого издания. По существу, издательство осуществило этим выпуском важное мероприятие для изучения творчества самого крупного русского электротехника, оказавшего огромное влияние на мировую электротехнику. Ведь до сих пор кроме кратких сообщений о М. О. Доливо-Добровольском в литературе ничего не появлялось. Это тем более досадно, что его труды имеют не только чисто исторический интерес. Немало поучительного в них найдет и специалист-электротехник, работающий над современными проблемами. Достаточно упомянуть о статье «О границах применения переменных токов для передачи энергии на большие расстояния» (в сокращенном виде вновь опубликованной в журнале «Электричество», № 3, 1945); в этой статье М. О. Доливо-Добровольский с исключительной проницательностью охарактеризовал возможности и границы применения переменного тока, а также наметил перспективные применения постоянного тока и подземных кабельных линий для передачи электроэнергии на большие расстояния.

Глубокая инженерная интуиция и смелое техническое предвидение, свойственные М. О. Доливо-Добровольскому, позволили ему в конце жизненного пути (1919 г.) предсказать перспективы системы постоянного тока высокого напряжения. Не следует, однако, забывать, что на более раннем этапе своей деятельности М. О. Доливо-Добровольский с меньшей смелостью и новаторством выступал в деле утверждения и развития системы трехфазного тока. Вслед за П. Н. Яблочковым, знаменитая

«свеча» которого содействовала внедрению в электротехнику переменного тока и трансформаторов, М. О. Доливо-Добровольский прогвоздился яростным нападкам на переменный ток со стороны крупнейших технических авторитетов того времени, находившихся в плену устарелых представлений. В статье «Из истории трехфазного тока» он пишет:

«В сентябре 1889 г. Эдисон посетил Берлин. При сделанном ему предложении осмотреть новый двигатель переменного тока он буквально замахал руками: «Нет, нет, переменный ток это вздор, не имеющий будущего. Я не только не хочу осматривать двигатель переменного тока, но и знать о нем». И он не пришел!» (стр. 153).

Г. М. Кржижановский, обрисовывая образ М. О. Доливо-Добровольского, пишет: «Глубокое знание основ электротехники и конструкций помогало ему правильно понимать и оценивать сложные физические явления, создавать для себя рабочие гипотезы и производить на их основе инженерно-технические расчеты и конструкции. Конструкции, выполненные на основе таких расчетов, после испытания и всестороннего анализа результатов давали ему возможность оценить правильность понимания физической сущности явления и пригодность принятой гипотезы. Некоторые методы расчетов, установленные Доливо-Добровольским, не потеряли своего интереса до сих пор» (стр. 19).

Следует надеяться, что Госэнергоиздат не замедлит сделать дальнейший шаг и выпустит обстоятельную монографию об этом гиганте электротехнической мысли, которым по праву гордилась русская научная общественность уже на заре его блестящей деятельности. Л. Д. Белькинд весьма уместно привел слова председателя I Всероссийского электротехнического съезда, почетного академика Н. И. Петрова, произнесенные им при открытии съезда: «Тем отраднее для нас право, позволяющее сказать, что и тут дело двигает русский человек Михаил Осипович Доливо-Добровольский. Он не только понял все важное значение замены постоянных токов переменными, не только оценил всю пользу трансформации токов,—он быстро и полнее самого Феррариса овладел идеей открытого им вращающегося магнитного поля и первый опередил американцев, устроив сильный (в 100 сил) электродвигатель с трехфазным током».

В заключение несколько слов о полиграфическом оформлении рецензируемого издания. Хороший набор, четкая печать, малое количество погрешностей (хотя и не обошлось без досадных опечаток—дата под первым именем Доливо-Добровольского явно искажена) свидетельствуют о возможностях издательства, которые, надо полагать, будут неизменно расширяться и полностью использоваться.

М. Малин



## Игнитронные выпрямители

**Б. М. ШЛЯПОШНИКОВ. ИГНИТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ. ПРАКТИЧЕСКОЕ ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ.** Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1947, 735 стр., ц. 40 руб.

Рассматриваемая работа состоит из трех отделов: в первом освещаются физические процессы в вентиллях—игнитронах, рассматриваются их конструкции и рабочие характеристики; второй отдел посвящен теории выпрямительных схем. Это касается всех типов выпрямителей, в вентиллях которых падение напряжения мало по сравнению с преобразуемым напряжением; в третьем отделе рассматривается применение игнитронных выпрямителей на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог.

В главе первого отдела описываются принцип действия и устройство игнитронов. Подробно освещаются конструкции отечественных стеклянных и стекляннно-металлических игнитронов. В главе II рассматриваются тепловые режимы газоразрядных вентилей. Основные характеристики газоразрядного вентиля—падение напряжения в нем в проводящий полупериод и максимально допустимое

отрицательное напряжение на аноде в непроводящем полупериоде—сильно зависит от плотности ртутного газа в разрядном пространстве, которая связана с тепловыми режимами вентилей.

Далее рассмотрены вопросы поджигания игнитрона. Приводятся различные гипотезы, поясняющие механизм образования светлого пятна на ртутном катоде при появлении положительного напряжения на поджигающем электроде. Здесь же рассматриваются основные типы схем включения поджигателя: зависимая и независимая; выясняется роль шунтирующего электрода; изучается регулирование момента поджигания. Разбираются параметры поджигателей, выясняются изменения напряжения и тока поджигания от периода к периоду, происходящие по закону вероятности, устанавливается понятие о требуемой и допустимой мощности поджигателя. Освещаются вопро-



сы о применении лик-трансформаторов, насыщенных реакторов, релаксационных конденсаторных схем для управления целью поджигания.

Во втором разделе рассматриваются различные схемы включения вентилей при разомкнутой и замкнутой вторичной обмотке трансформатора. Поясняются способы преобразования числа фаз трансформатора, а также способы параллельного присоединения нескольких вентилей к одной фазе трансформатора. Указывается характер связи между способом соединения первичной обмотки трансформатора и начальной кривой выпрямленного напряжения. В последующих главах анализируются вспомогательные цепи выпрямителя. Выясняются особенности работы цепи поджигания у регулируемых и нерегулируемых многофазных выпрямителей. Далее излагаются вопросы о выпрямленном напряжении, выпрямленном токе, а также о мощности, отдаваемой выпрямителем. Следуя установившейся традиции, токи в обмотках трансформатора рассматриваются при допущении, что коммутация осуществляется мгновенно, и сглаживающий реактор имеет бесконечно большую величину  $L$ . Затем дается анализ соотношения ампервитков первичной и вторичной обмоток трансформатора, работающего на вентили. Производится анализ первичного тока (линейного и фазового), даются уравнения, определяющие эффективное значение первичного тока. Разбирается вопрос о работе уравнивающего реактора для общего случая любого числа фаз у реактора и любой схемы включения вентилей. Далее рассмотрены ток, напряжение и мощность на вторичной и на первичной сторонах трансформатора при  $L = \infty$  с учетом длительности коммутации для различных классов схем включения вентилей. Затем даются характеристики выпрямительного агрегата: внешние характеристики, характеристики к. п. д., характеристики коэффициента мощности. Даны уравнения, определяющие номинальную и типовую мощность трансформатора, нагруженного через вентили. Излагаются принципы проектирования выпрямителей и области применения разных схем включения вентилей. Рассматривается параллельная работа выпрямителей как при идентичных, так и при неидентичных внешних характеристиках. Изучается распределение нагрузок, рассмотрены вопросы защиты. Приведены методы защиты выпрямителей при обратных зажиганиях, коротких замыканиях, недопустимых по величине перегрузках, а также при перенапряжениях. Анализируются аварийные режимы выпрямителей.

В третьем разделе весьма подробно описан опытный игнитронный выпрямитель Ленинградского политехнического института им. Калинина (ЛПИ), который был установлен на тяговой железнодорожной подстанции. Приведен экспериментальный материал (измерения и осциллограммы), связанный с испытанием и наладкой этого выпрямителя. Затем описывается переоборудование этого опытного выпрямителя в эксплуатационный. Приведены схемы поджигания, защиты и управления.

В отдельной главе рассматриваются вопросы проектирования игнитронных выпрямителей для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог. Дан подробный сравнительный расчет ртутного выпрямителя обычного типа и игнитронного выпрямителя. Разработан вариант конструктивного оформления игнитронного выпрямителя в закрытой части тяговой подстанции.

Наконец, в последней главе описана мощная типовая подстанция с игнитронными выпрямителями на 600–800 В на электрохимическом заводе.

Как видно из вышеприведенного краткого перечня, в книге приведен большой материал по силовым и вспомо-

гательным электрическим схемам игнитронных выпрямителей, а также по характеристикам и конструкциям игнитронных выпрямителей и по вопросам их применения электротяге. Приведено много оригинальных теоретических и экспериментальных данных, впервые полученных автором.

Однако, необходимо указать, что объем книги весьма велик—60 учетно-издательских листов. В этом объеме можно было бы уместить значительно более энциклопедический материал.

Нужно отметить, что при рассмотрении теории работы игнитронного выпрямителя под нагрузкой (гл. X, § 1 и далее) автор, исходя из наличия значительной индуктивности серийных двигателей электровоза пренебрегает полностью гармониками выпрямленного тока, считая коэффициент волнистости  $W_1 = 0$ , и пользуется кривыми анодных токов с постоянной по величине амплитудой, частью, что, конечно, облегчает анализ работы выпрямителя. Однако, развиваемая автором подробная теория в лишне громоздко изложена и построена при этом на основании большого количества поправочных коэффициентов, которые дают переход от холостого хода к нагрузочным режимам. В действительности, индуктивность двигателей цепи выпрямленного тока все же является недостаточной для уменьшения гармоник выпрямленного тока до такой степени, чтобы полностью отсутствовало их влияние на линии связи. Вследствие этого для уменьшения гармоник тока в линии до необходимой степени приходится применять систему фильтров (резонансного шунта 14 на рис. 416), которые одновременно повышают весьма заметные пульсации выпрямленного тока в самой системе выпрямительного устройства (осциллограмма рис. 438). Это, очевидно, существенно ограничивает область применения теории, разработанной автором. Приходится высказывать сожаление, что, несмотря на чрезвычайную обширность теоретической части, осталась незатронутой теория работы выпрямителей с фильтрами, имеющая самое непосредственное отношение к основному предмету труда, который посвящен игнитронным выпрямителям на тяговых подстанциях.

В книге имеются отдельные графики и данные, которые, быть может, уместны в лабораторном отчете, но, безусловно, могут быть опущены в труде, рассчитанном на более широкий круг читателей. Ряд графиков и кривых мог бы быть скомбинирован на одном рисунке. За счет этого надлежало бы дать материал по разборным конструкциям (выпрямители с непрерывной откачкой), которые, безусловно, еще в течение ряда лет будут иметь важное промышленное значение. За счет указанного сокращения можно было бы также поместить материал по производству ртутных вентилей, по вакуумной технологии.

К недочетам книги надлежит также отнести обилие различных коэффициентов. Несмотря на наличие в книге подробного указателя принятых обозначений, такое обилие коэффициентов затрудняет чтение. Во многих местах вместо того, чтобы вводить новые коэффициенты, можно было бы оставить соотношения в виде дробей.

В заключение необходимо отметить, что рецензируемая книга является собранием обширного теоретического и экспериментального материала и принесет пользу инженерно-техническим и научным работникам, занимающимся электрификацией железных дорог и проблемами преобразования тока. Книга может также служить пособием при дипломном проектировании.

Доктор техн. наук, проф. Г. И. Бабан



#### ПОПРАВКА

В заголовке, посвященный 40-летию деятельности проф. А. А. Горева (Электричество, № 6, 1948, стр. 92), в левой колонке, во втором абзаце сверху следует читать: «В 1920 г. А. А. Горев был привлечен к разработке плана ГОЭЛРО...»

Сдано в пр-во 3/VII 1948 г.

Тираж 10500 экз.

А 07493

Подписано к печати 29/VII 1948 г.

Тип. знаков в 1 печ. л. 55 000

Объем 12 п. л.

Уч.-авт. л. 18

Формат бумаги 6х9 см

Заказ 118

# Правила для авторов журнала „Электричество“

1. Оригинал, предназначенный для опубликования в журнале, должен представляться отпечатанным на машинке через два интервала в двух полностью комплектах экземплярах (первый и второй экземпляр с машинки) с одной стороны листа стандартного размера, с полями с левой стороны в 3—5 сантиметров. Текст должен быть отчетливым, без помарок и вставок.

2. Средний размер статьи может составлять 0,5 авт. листа (12 стр. текста на машинке с 5—7 рис.); в необходимых случаях размер статьи может быть увеличен с согласия редакции. Автореферат (краткое содержание научно-исследовательской работы) не должен, как правило, превышать 4—5 стр. на машинке.

3. К статье должна прилагаться аннотация (краткое изложение основных положений статьи) размером не более 0,5 стр. на машинке с 2—3 рис.

4. Статьи, обзоры и авторефераты, сообщающие о результатах работ, проведенных по заданию и плану организаций, представляются вместе с письменным разрешением этих организаций на опубликование.

5. Представляемый автором оригинал должен быть тщательно проверен (особое внимание следует обратить на формулы и чертежи) и подписан, с указанием полного наименования автора, даты, точного почтового адреса и места работы.

6. Разделы (главы) статей и авторефератов должны выделяться особыми подзаголовками; соподчинение внутренних подразделов должно быть четко показано; в необходимых случаях желательно выделять некоторые места текста *курсивом* или разрядкой. Выводы, обобщающие содержание статьи, помещаются в конце ее.

7. Вспомогательные математические выкладки и промежуточные преобразования формул, а также примеры расчетов выносятся обязательно в отдельные приложения.

8. Обозначения величин и единиц измерения должны соответствовать союзным стандартам (Электричество, № 1—2, 1945).

9. Формулы помещаются в отдельной строке, а не в строке текста. Формулы и обозначения показателей степени и индексы должны быть вписаны от руки чернилами ясно и отчетливо. Особенно ясно должны различаться сходные по начертанию заглавные и строчные буквы (*C* и *c*, *K* и *k*, *O* и *o*, *S* и *s*, *U* и *u*, *V* и *v*, и т. д.) и буквы, трудно отличимые в рукописном изображении: *e* и *l*, *I* и *J*, *g* и *q*, *n* и *u*, *V* и *U* и др., а также  $\pi$  (греческая) и  $\chi$  и  $\alpha$  (греческая). Прописные (заглавные) буквы рекомендуется подчеркивать карандашом двумя черточками снизу (например, O), а строчные — сверху. 0 (нуль) не подчеркивать. Греческие буквы заключать в кружок карандашом.

10. Следует ставить: над символами комплексных величин точки (например  $\dot{I}$ ), над сопряженными комплексами  $\wedge$  (например  $\dot{I}^{\wedge}$ ), над векторами черту ( $\vec{H}$ ).

11. При перечислении предпочтительно пользоваться цифрами и во вторую очередь буквами (русского алфавита).

12. Таблицы должны снабжаться заголовками и порядковыми номерами.

13. Сноски нумеруются (звездочек не применять) в порядке их последовательности в тексте.

14. Сокращения слов не допускаются, за исключением общепринятых известных сокращений: ВЭИ, МЭИ, гэс, к. п. д., э. д. с. и т. д.

15. Указания на фамилии иностранных авторов в тексте статей даются в русской транскрипции. Лишь в тех случаях, когда русская транскрипция не дает ясного представления об оригинальной транскрипции, то после упоминания автора в первый раз дается в скобках оригинальная транскрипция. Русские авторы, при упоминании в тексте, обязательно указываются с инициалами.

16. Иностранные географические названия даются по-русски и лишь в необходимых случаях после упоминания названия в первый раз дается в скобках оригинальное название.

17. Цитируемые или рекомендуемые литературные источники должны быть приведены в конце статьи в библиографическом указателе (литература). Ссылки на источник в тексте сопровождаются взятыми в квадратные скобки буквой *L* и порядковым номером источника в библиографическом указателе статьи, например [*L*. 3], [*L*. 1—4].

18. Библиографический указатель (литература) должен составляться в следующем порядке: а) для журналов — инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), название статьи (по оригиналу, а в заголовках рефератов — в русском переводе), название журнала, часть журнала (для журналов *El. Eng.*, *JIEE* и др., имеющих разделение на части), том (для журналов, не имеющих счета томов, — номер), страница начала статьи (в заголовках рефератов указываются через тире страницы начала и конца статьи), год издания; б) для книг — инициалы и фамилия автора (в оригинальной транскрипции), заглавие книги (по оригиналу) и том, наименование издательства, место издания (для иностранных изданий), число страниц, год издания.

После фамилии автора, а также после названия статьи ставится точка; остальные библиографические данные разделяются запятыми. Названия книг, статей и журналов в кавычки заключать не следует. В ссылках на журнальные статьи слово „журнал“ не пишется. При обозначении года слово „год“ опускается.

19. Требования к графическому материалу, представляемому авторами в журнал „Электричество“, перечислены на обороте.

20. С другими особенностями оформления представляемых материалов можно ознакомиться при просмотре номеров журнала „Электричество“ за истекший и текущий годы.

## Правила для авторов журнала „Электричество“

(продолжение)

### Требования к графическому материалу, представляемому авторами в журнал „Электричество“

1. Рисунки (чертежи, графики, диаграммы, номограммы и пр.) вычерчиваются черной тушью на плотной белой бумаге; они могут быть выполнены также на миллиметровой бумаге или на кальке. Графики, диаграммы и т. п. должны иметь сетку. Значения делений должны быть четко проставлены простым карандашом. Обозначения величин указывать карандашом над осью абсцисс и с правой стороны оси ординат, а единицы измерения — под осью абсцисс и с левой стороны оси ординат. Стрелки по концам осей не ставить.

2. Все линии чертежей, графиков и прочих рисунков, выполненных тушью, должны быть четкими, без расплывов по краям, без утолщений в местах соединений и пересечений. В случае применения в рисунках штриховки, нанесение ее должно производиться с учетом возможного уменьшения размера рисунка при изготовлении клише.

3. Пометки и надписи, относящиеся к графическому материалу, должны быть сделаны вне площади рисунка, на свободном поле и на достаточном расстоянии от рисунка.

4. Условные обозначения в площади рисунка должны быть предельно краткими и общепонятными. Проставлять их следует простым карандашом, так как надписи тушью в площади рисунка выполняются в целях единообразия почерка графическим бюро издательства. Расшифровка примененных условных обозначений дается без сокращений на свободном поле или в приложении к каждому рисунку вместе с его наименованием для набора надлежащей подписи к рисунку. При этом следует максимально разгружать рисунок от второстепенных надписей и сложных обозначений, которые целесообразно выносить в подпись к рисунку.

5. Фотографии должны быть отпечатаны на белой гладкой бумаге. Изображение должно быть контрастным, с резкой проработкой всех деталей. Фотосъемка должна быть выполнена при достаточно сильном освещении. Подсвечивание главного предмета съемки должно быть достаточно ярким; свет должен усиливать восприятие основных линий и деталей изображения. Главный предмет съемки не должен сливаться с фоном или с другими предметами, изображенными на фотоснимке, и должен быть заснят под таким углом, чтобы иллюстрация, поясняющая текст, отличалась максимальной выразительностью.

6. Для иллюстрации авторы должны отбирать графический материал такого размера, чтобы при изготовлении клише было возможно уменьшать изображение примерно в 2 раза.

7. Рисунки, фотографии и пр. должны быть пронумерованы и перечислены в специальной описи. Ссылки в тексте статьи на рисунки, фотографии и пр. должны строго соответствовать сделанной нумерации. Масштаб уменьшения должен быть указан автором на лицевой стороне рисунка. На обороте рисунка следует указывать фамилию автора статьи и соответствующий ссылкам в тексте номер.

8. В описи должны быть точно указаны источники предлагаемого авторами графического материала. Графический материал, заимствованный автором из неопубликованных работ научно-исследовательских институтов, предприятий и учреждений или иллюстрирующий работы этих организаций, должен сопровождаться разрешениями организаций на опубликование. При заимствовании графического материала из опубликованных работ надлежит указывать литературный источник.