

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

## СОДЕРЖАНИЕ

С. И. Вавилов — Наука и социалистическое производство	3
А. А. Булгаков — Теория и расчет индуктивных мостиковых фазорегуляторов	7
С. Р. Пясецкий — Электромашинный регулятор с критическим самовозбуждением	10
Н. Н. Сидоров — К вопросу классификации серийных характеристик тяговых электродвигателей	16
Н. И. Соколов — Построение и применение комплексных схем замещения при сложных несимметричных цепях	21
Г. Т. Адонц — К методу расчета сложных несимметричных режимов	29
Я. З. Цыпкин — Нерезонансные электрические цепи с переменным и нелинейным параметрами	35
С. П. Пивоваров — Высшие гармоники в электрической цепи, содержащей индуктивность с железом и емкость	38
А. Ф. Гикис — Перекрытие анодных токов	41
Е. В. Калинин — Параметры емкостного делителя	45
В. К. Медунов — Аналитический расчет характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении	50
В. О. Арутюнов — О расчете погрешностей электроизмерительных приборов	54
А. М. Осепян — Карбидные и ферросплавные электропечи как потребители сезонной гидроэнергии	59

## АВТОРЕФЕРАТЫ

В. С. Кальман — Моделирование рельсовых сетей	63
М. А. Быков — Новый вид полного уравнения двойного моста и его применение	65
Л. Ф. Котова — Применение матричного исчисления к активному линейному четырехполюснику	67

## ОБЗОРЫ И РЕФЕРАТЫ

И. Г. Герценштейн — Основные тенденции в развитии городских электрических сетей за рубежом	69
Л. М. Шильдинер и Д. Д. Захарченко — Электрификация железнодорожного транспорта на однофазном токе 50 гц	75

## СТАНДАРТЫ И НОРМЫ

С. М. Лившиц — Основные требования к стандартам на электрооборудование	78
Б. Ф. Вашура — Об определении перегрева обмоток по действующему стандарту	85
Л. М. Шницер — По поводу замечаний В. Ф. Вашуры	86

## ХРОНИКА

Научно-техническая сессия в Ленинграде по вопросам перенапряжений	87
Ленинградская конференция читателей журнала „Электричество“	88
Профессор В. К. Аркадьев	90

## БИБЛИОГРАФИЯ

Н. П. Богородицкий — Справочник по электрической изоляции	91
С. А. Гинзбург — Книга Ф. Е. Темникова и Р. Р. Харченко „Электрические измерения неэлектрических величин“	92
В. П. Хацинский — Книга А. И. Лурье „Электрические измерения в сетях сильного тока“	93
Н. В. Волоцкой — Книга Б. Л. Айзенберга „Замкнутая электрическая сеть без сетевых автоматов“	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

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

# Наука и социалистическое производство

Академик С. И. ВАВИЛОВ

Призыв нашей общественности об усилении помощи производству со стороны советской науки нашел живейший и деловой отклик. Значение этого вопроса первостепенно, так как в конечном итоге он имеет отношение не только к науке, промышленному производству и сельскому хозяйству, но для всего развития советского социалистического государства на пути к коммунизму. Отличительная и основная особенность нашей науки — ее служебная роль, помощь народу, советскому государству во всех его начинаниях, в деле усиления экономического благосостояния, в развитии советской культуры, в вопросах военной обороны.

Решительное изменение характера нашей отечественной науки после Великой Октябрьской социалистической революции произошло прежде всего по этой линии. Дореволюционная русская наука, существовавшая и развивавшаяся в условиях дворянско-капиталистической власти, на почве предрассудков буржуазного общества, несмотря на многие свои славные достижения, давала родной стране, несомненно, много меньше того, что она могла бы дать даже при крайней ограниченности круга людей, имевших возможность выбрать своей специальностью научное исследование. Блестящие успехи и новые идеи русских ученых, инженеров, изобретателей: Ломоносова, Петрова, Яблочкова, Лодыгина, Попова, Минчурнина, Докучаева и многих десятков других, часто оставались в старой России «голосом вопиющего в пустыне». Их идеи и изобретения усваивали, или чаще просто присваивали, за границей; в родной стране они лежали во многих случаях мертвым капиталом, не влияя ни на производство, ни на сельское хозяйство, не входя даже зачастую в логическую структуру развивающейся науки. Дореволюционная русская наука была поэтому нередко «чистой наукой» в том особенно трагическом смысле, что она волею неволею замыкалась сама в себе и не приносила реальной пользы жизни, родному народу.

Вот с этим нетерпимым положением прежде всего и покончила в области науки Великая Октябрьская социалистическая революция. Конечно, и в царском правительстве бывали люди, понимавшие значение науки и техники для подъема промышленности, сельского хозяйства, военного дела, но этим людям и царскому правительству в целом выгоднее казалось воспользоваться

готовой заграничной техникой, купить техническую помощь за народные деньги, оставляя в целом страну на чрезвычайно низком техническом уровне. При таком отношении со стороны царской власти наука неизбежно обращалась в «чистую науку» и отдельным русским ученым, стремившимся, несмотря на это, перевести свои научные результаты на жизненные рельсы, передать свои успехи в практику, приходилось преодолевать огромные препятствия, а иногда становиться объектом насмешек и издевательств.

Для победившей социалистической революции наука имела огромное значение, она была одним из очень важных условий укрепления революционных завоеваний, дальнейшего развития страны и построения социалистического общества. В самую основу нового государства впервые в истории человечества была положена научная теория, марксизм-ленинизм, великое учение о развитии общества Маркса—Энгельса—Ленина—Сталина. Молодой социалистической стране в громадном, невиданном ранее в России, объеме потребовалась техника для повышения производительных сил народа, для превращения отсталой, почти первобытной земледельческой страны в большую индустриальную державу, для качественного и количественного подъема сельского хозяйства. Эту технику в таких размерах и в таком разнообразии нельзя было рассчитывать получить в капиталистическом зарубежном мире и недостойно это было бы новой, бурно развивающейся социалистической культуры. Поэтому и выросла наша большая советская наука со своими многочисленными академиями, громадным числом высших школ и специальных институтов. Условия, созданные советской властью для развития науки, привлекли к делу научного исследования многие десятки тысяч молодых людей, пришедших из народных недр; выросли целые города новых институтов, лабораторий и высших школ.

Несомненно, что эта новая советская наука за три с лишним десятилетия уже многое сделала для своей родины. В важнейшем деле реализации сталинских пятилетних планов содержалась большая и многообразная помощь советской науки, выразившаяся в разработке принципиальных основ новых производств, в детальном установлении технологических процессов, в создании автоматических устройств, в электрификации промышленности и сельского хозяйства, в создании

новых важных конструкций гражданских и военных машин, в развитии многих сложных производств.

По всей советской стране, в цехах заводов и фабрик, на колхозных полях четвертый год идет напряженная и успешная работа по осуществлению послевоенного сталинского пятилетнего плана; широко развернулось социалистическое соревнование за выполнение пятилетки в четвёрте года. Роль советской науки и техники в реализации послевоенного пятилетнего плана выросла еще больше. Эта роль ясно отмечена в самом тексте государственного пятилетнего плана.

Вместе с тем потребность в усилении помощи науки производству не ослабевает, наоборот, с каждым годом желания и требования промышленности и сельского хозяйства в этом отношении возрастают, принимая все более конкретный и настойчивый характер. Это связано с новым огромным ростом нашей промышленности. Советский Союз победил страшного врага и наша страна идет к коммунизму. На этом славном пути требуется помощь науки в размерах, много больших, чем прежде.

Наши научные учреждения и все советские ученые давно поняли значение постоянной связи научной работы с практикой. Сейчас — дело в практическом осуществлении этой связи и в наиболее эффективных, действенных формах помощи производству со стороны науки. До сих пор, к сожалению, не всегда понимают, что деятельность советских ученых, направленная на разрешение текущих практических задач, не составляет какую-то добавочную, чужеродную часть того дела, которым в основном занят научный работник, некоторое «приложение» к нему. В стране социалистического труда теория и практика должны непрерывно переходить одна в другую и быть неразрывно между собою связанными. Практическая область, на поприще которой может и должен помогать ученый, не может быть не связанной по существу с основной теоретической работой этого ученого. Без этой связи не будет и должной помощи. Мы должны всеми силами стремиться, чтобы из наших теоретических исследований вырастала практика, а практическая работа служила источником новых теоретических выводов и обобщений, нового шага вперед в изучении и понимании природы и человеческого общества. Только на этом пути проблема связи науки и производства может найти истинное, диалектическое разрешение.

Надо, однако, сознаться, что рядом с несомненными и существенными достижениями наших научных учреждений в деле помощи выполнению пятилетнего плана, в их работе до сих пор, на отдельных участках, сохранилось еще отгораживание от требований практики, порой сознательное желание углубиться в ту «чистую науку», о которой уже приходилось упоминать, и «чистота» которой собственно вызвана отсутствием связи с запросами жизни. Эти недостатки особенно от-

четливо вскрылись в прошлом году в связи с обсуждением итогов сессии Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. Ленина. Изолированность и сознательная поддержка такой изолированности от запросов техники и сельского хозяйства существовали не только у ряда биологов. Этим страдали многие математики, физики, астрономы и даже в известной степени техники. В значительной степени этот недостаток развит в наших институтах, занимающихся общественными науками.

Поэтому призыв к укреплению деловой связи науки и производства чрезвычайно своевременен.

Академия наук СССР, много внимания уделявшая за последние годы вопросам внедрения в народное хозяйство научных результатов, полученных в ее институтах, приняла ряд новых решений. Наряду с общим большим планом исследовательской работы Президиум Академии наук СССР, между прочим, постановил ежегодно составлять планы внедрения результатов законченных научно-исследовательских работ, устанавливая по каждой работе по согласованию с министерствами и ведомствами ответственность за внедрение. При составлении таких планов внедрения Президиум Академии считает необходимым предусматривать деловую кооперацию работы учреждений Академии наук с отраслевыми научно-исследовательскими институтами, высшими учебными заведениями, конструкторскими бюро и предприятиями министерств.

Высшие учебные заведения также во многом конкретизировали своё участие в деле помощи промышленности и сельскому хозяйству. Многочисленны и разнообразны случаи активной повседневной помощи промышленности, оказываемой коллективами высших школ.

Связь науки и производства, теории и практики может иметь весьма разнообразные формы и одна из главных задач — установить наиболее правильные и действенные формы такой связи. Всякий научный результат, если он правилен хотя бы частично, может и должен получить практическое применение. Но путь от научного вывода к практическому применению иногда очень сложен и нерационален. Приведу один исторический пример. В середине прошлого века английским физиком Максвеллом были разработаны основы электродинамики. Одним из следствий теории Максвелла и его уравнений было существование электромагнитных волн различных частот, распространяющихся со скоростью света. Этот замечательный вывод получил свою экспериментальную проверку только через четверть века в известных опытах Герца. Сохранился рассказ о том, что Герц на вопрос журналиста о возможном значении электромагнитных волн ответил, что никаких практических перспектив у его открытия не имеется (!). Но через несколько лет, как мы знаем, петербургский профессор А. С. Попов впервые в мире открыл радио, т. е. осуществил при помощи электромагнитной системы передачу сигнала электромагнитными волнами. После этого началось то удивительное разви-

радно, свидетелем которого мы были за последние десятилетия. Таким образом, открытие, имеющее огромное значение для человечества, запоздало вследствие того, что Максвелл и Герц совершенно не думали о практическом использовании своей теории и эксперимента. Перед нами поучительный пример того, как «чистая» наука, именно потому, что она чистая, тормозит технический прогресс. Мысль Максвелла и Герца не была направлена в сторону жизненных, практических вопросов. Именно поэтому открытие радио произошло много позднее, чем оно могло быть сделано. Я напомнил этот небольшой эпизод из истории физики и техники, потому что из него можно сделать общий и важный вывод: ученый может заниматься абстрактными областями и на первый взгляд отвлеченными проблемами (такая абстрактность неизбежна и необходима для развития науки), но ученый, вместе с тем, не имеет права забывать, что цель науки — помощь людям, своему народу. Научный вывод и результат должны быть всегда обдуманы и рассмотрены с точки зрения возможного практического использования. История нашей отечественной науки имеет ряд замечательных примеров такого *соединения* теоретических высот с запросами жизни и общества. Величайшим примером такого единства для нас служит наука Ленина и Сталина, в которой самые общие и широкие проблемы философии и учения об общественном развитии неразрывно и органически соединены с жизнью, с практическим осуществлением в размерах и с результатами, ранее невиданными в истории человечества. Михаил Васильевич Ломоносов умел соединить свою материалистическую корпускулярную философию с химической технологией, с разработкой производства цветного стекла и смальт и с организацией промышленного производства художественных мозаик. У Дмитрия Ивановича Менделеева его грандиозный периодический закон неразрывно соединялся с химической технологией, с вопросами промышленности и экономики.

Широкое советское общественное движение, направленное на усиление помощи производству со стороны науки, никоим образом не ограничивает большой, принципиальной теоретической работы наших ученых в любых областях знания. Советской стране нужна теоретическая работа, нужна в значительно большем масштабе, чем до сих пор. Но ученый, занимающийся широкими теоретическими проблемами, советский ученый должен всегда оглядываться на свой народ, на животрепещущие запросы родной страны, должен всеми доступными для него способами извлекать выводы из своих теоретических обобщений, полезные для развития нашего советского государства.

В отдельных случаях ученый может быть использован как цеховой инженер, как агроном на колхозном поле и, конечно, при наличии у него специальных знаний и опыта может в этих

условиях принести немалую пользу. Такая помощь практике со стороны ученого очень конкретна, даже максимально конкретна, но она идет, так сказать, по линии наименьшего сопротивления. Приходится с удивлением констатировать, что именно о такой помощи со стороны научных учреждений иногда мечтают не только в научных учреждениях, но и в промышленности. Такое использование крупных ученых, обладающих большими специальными знаниями, умеющих руководить целыми лабораториями и решать крупные научные задачи, такое использование, естественно, напоминает старую эзоповскую басню о зарезанной курице, несущей золотые яйца. Не исключена, разумеется, в отдельных случаях возможность непосредственной работы ученого у станка, в цеху, на сельскохозяйственной машине. Но она должна происходить только как завершение, как последняя точка предварительной большой научной деятельности с широким кругозором. Наоборот, деятельность рабочего — стахановца и передовика колхозника может в наших условиях и должна подниматься в отдельных случаях до важных обобщений.

Известно, что внедрение новых научных результатов и изобретений в практику протекает у нас далеко не всегда просто и удовлетворительно. Нередко интересные и важные результаты годами покоятся в виде машинописных институтских отчетов, не превращаясь в живое дело. Можно было бы привести, к сожалению, очень многочисленные примеры этого в самых различных областях науки и промышленности. В большинстве случаев виноваты в таком положении дела обе стороны. Промышленность далеко не всегда доверчиво относится к нововведениям, предвидя в них технические и экономические трудности и сомневаясь в успехе. С другой стороны, научные учреждения не доводят работу до конца, приемлемого для производства, не активны и ограничиваются тем, что результат либо опубликован, либо разослан в виде отчета. Ясно, что такое нетерпимое положение дела может быть изжито только при реальном сотрудничестве и содружестве всех заинтересованных звеньев. Для пояснения этого напомним в виде примера, что свыше 10 лет в наших научно-исследовательских институтах, в Академии наук, во Всесоюзном электротехническом институте разработаны осветительные лампы нового типа, так называемые люминесцентные лампы. Преимущество и удобство этих ламп для всех очевидны. Они более экономичны, чем обычные лампы накаливания, они могут давать свет, не отличающийся по своему спектральному составу от дневного света, они имеют громадное преимущество при освещении специальных цехов, угольных шахт и т. д. Несмотря на то, что проблема изготовления таких ламп с технологической стороны разрешена около 10 лет назад, до сих пор эти лампы изготавливаются в очень небольшом количестве.

Если мысленно просуммировать работу всей нашей научно-исследовательской сети от Академии наук до высших школ, отраслевых институ-

тов и заводских лабораторий, то перед нами предстанет огромная совокупность усилий, направленных на разрешение народнохозяйственных задач.

Надо приложить все наши усилия к тому, чтобы весь этот огромный труд, напряжение сил, умения, знаний, талантов и больших материальных ценностей, сосредоточенных в оборудовании наших институтов, перешли в дело, принесли бы конкретную помощь нашей стране. Вот почему проблема внедрения науки в жизнь, проблема связи науки и практики — важнейшая проблема, которую мы во что бы то ни стало должны научиться разрешать так, как этого требует советский народ, большевистская партия и советское правительство.

Метод всякого рода согласительных комиссий в вопросе внедрения — метод нежизненный. Нет другого способа хорошей передачи научного результата в производство кроме прямой связи научных учреждений между собою, с заводами и с сельским хозяйством. Надо понять и лицам, стоящим у руководства, и каждому человеку в научных учреждениях и на производстве, что ведомственное разделение в советской стране имеет только практический, организационный смысл. Надо достигнуть того, чтобы для нашего сознания творческая научно-техническая мысль и производство разных видов слились в единую систему. Необходимо, чтобы наши институты и лаборатории хорошо знали дорогу на заводы и не только в директорские кабинеты, но и в цехи. Необходимо дальше, чтобы и обратный путь с завода в лабораторию был бы хорошо известен инженерам, техникам и передовым рабочим. Нашим ученым и инженерам есть чему учиться у рабочих и колхозников; есть чему учиться советским рабочим и колхозникам у наших ученых и инженеров.

Ведомственная изоляция, к сожалению, еще велика. Она существует не только между промышленностью и наукой, между отдельными звеньями нашей научно-исследовательской сети, между академиями, высшими школами и отраслевыми институтами. Такая изоляция не редка, к несчастью, даже в пределах одной системы, одной академии, одного университета. Поэтому наряду с проблемой внедрения результатов науки в практику существует и другая проблема, также очень важная, проблема внедрения научных результатов в отдельные науки. Она также во многих случаях не разрешена, а от правильного решения ее зависит, между прочим, во многих случаях и успех внедрения научных результатов в производство.

Существенный недостаток многих наших от-

раслевых институтов состоит в том, что они, как это ни странно, ведомственно пребывая в министерствах при технических советах или при соответственных главках, отгораживаются от заводов. Напрашивается организация институтов при больших заводах со сложными, тонкими производствами, требующими постоянной научно-технической помощи. Многие наши заводы давно заработали право иметь при себе не только небольшие заводские лаборатории, но и специальные институты со всеми правами и обязанностями больших научных учреждений. Организация такого рода заводских институтов вне всякого сомнения в весьма сильной степени повысила бы и с количественной, и с качественной стороны передачу новых научных результатов в дело, в жизнь, на производство.

Вместе с конкретной исследовательской работой для промышленности и сельского хозяйства обязанность всей нашей научно-технической общестственности состоит в том, чтобы еще шире, чем раньше, развернуть научную пропаганду всеми доступными способами. Выражением стремления научной интеллигенции широко вести научную пропаганду служит Всесоюзное общество по распространению политических и научных знаний. Это Общество непрерывно и очень быстро растет. Необходимо развернуть шире и глубже техническую пропаганду в цехах наших заводов разных специальностей.

Наряду с конкретной исследовательской работой обязанность вести научную пропаганду — важнейшая и почетная обязанность каждого советского ученого и инженера.

Советская современная наука с её широтой, глубиной и разнообразием, помноженная на массы народные, должна и может превратиться в условиях советского государства в огромное, невиданное по своей силе и действенности орудие социалистического прогресса. Наука, перешедшая из состояния идей в реальное дело, превратившаяся в жизнь, такая внедренная наука — одно из самых важных условий наших успехов на пути к коммунизму.

Вспомним замечательные слова товарища Сталина, в которых с поразительной отчетливостью и глубиной 17 мая 1938 г. была определена наша советская наука: «За процветание науки, той науки, которая не отгораживается от народа, не держит себя вдали от народа, а готова служить народу, готова передать народу все завоевания науки, которая обслуживает народ не по принуждению, а добровольно, с охотой».

Можно не сомневаться, что постоянное единение советской науки, социалистической промышленности и сельского хозяйства, к которому нас всегда призывает наш вождь и учитель, великий Сталин, будет усиливаться с каждым днем.



# Теория и расчет индуктивных мостиковых фазорегуляторов

Кандидат техн. наук А. А. БУЛГАКОВ

Институт автоматики и телемеханики АН СССР

Мостиковые фазорегуляторы с изменяемой индуктивностью в плече являются наиболее распространенным видом устройств для сеточного управления ионными выпрямителями, в частности в электроприводах. Их

преимущества: надежность, довольно большой диапазон изменения фазы, возможность питания сеточных трансформаторов большой мощности, например, пиктрансформаторов, электрическая изоляция цепи управления от цепи выпрямителя. Недостаток — относительно большая инерция управляющей цепи.

Простейший фазорегулятор (рис. 1, б) состоит из трансформатора  $T_\phi$ , омического сопротивления  $R$  в одном плече и дросселя насыщения  $D$ , управляемого постоянным током, в другом. В диагональ моста включена первичная обмотка сеточного трансформатора  $T_c$ .

Основной задачей проектирования индуктивных фазорегуляторов является получение максимального диапазона изменения фазы напряжения диагонали при соблюдении следующих условий: 1) достаточное постоянство напряжения диагонали при изменении фазы; 2) минимальная мощность управления и 3) минимальные габариты устройства. Выполнению этих условий препятствует, главным образом, наличие в диагонали моста индуктивной нагрузки — сеточного трансформатора.

Для идеализированной схемы фазорегулятора

Рассматривается теория индуктивных мостиковых фазорегуляторов с сеточным трансформатором в диагонали для управления фазой зажигания ионных преобразователей. Приведены основные количественные соотношения мостика, круговые диаграммы и дана методика определения конструктивных параметров по параметрам нагрузки в диагонали, исходя из условий постоянства напряжения диагонали, максимального диапазона изменения фазы и минимальных габаритов фазорегулятора.

(рис. 1, а) действительна система уравнений:

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}_R R + \dot{I}_\partial Z_\partial;$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_\lambda jX_\lambda - \dot{I}_\partial Z_\partial;$$

$$\dot{I}_R - \dot{I}_\lambda - \dot{I}_\partial = 0. \quad (1)$$

Здесь

$$X_\lambda = \lambda X_0 \quad (2)$$

— реактивное сопротивление подмагниченного, а  $X_0$  — неподмагниченного дросселя.

Система (1) дает при  $\dot{U}'_2 = \dot{U}_2$  для напряжения диагонали выражение:

$$\dot{U}_\partial = \dot{I}_\partial Z_\partial = -\dot{U}_2 Z_\partial \frac{R - jX_0 \lambda}{R Z_\partial + j[R + Z_\partial] X_0 \lambda}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что напряжение диагонали при изменении параметра  $\lambda$  имеет геометрическим местом окружность, положение центра которой выражается вектором:

$$\dot{u} = -\frac{1}{2} \dot{U}_2 \frac{R(r_\partial + jx_\partial)}{r_\partial^2 + x_\partial^2 + r_\partial R}. \quad (4)$$

Это уравнение показывает, что центр окружности смещается с оси  $\dot{U}_2$  тем меньше, чем меньше реактивное сопротивление диагонали  $X_\partial$  и сопротивление плеча  $R$ . Но чем больше смещение центра окружности, тем резче изменяется напряжение диагонали вместе с фазой. Одновременно сужается и диапазон изменения фазы напряжения диагонали. Для улучшения характеристик фазорегулятора по схеме рис. 1, б необходимо, следовательно, увеличение его мощности и габаритов, вместе с которыми растет и управляющая мощность.

Эти противоречия можно устранить, если сеточный трансформатор шунтировать конденсатором (рис. 1, б), а для напряжения полуобмотки трансформатора, присоединенной к сопротивлению  $R$ , выбрать более высокое значение, чем для напряжения полуобмотки, присоединенной к дросселю насыщения. Шунтирование сеточного трансформатора конденсатором компенсирует реактив-

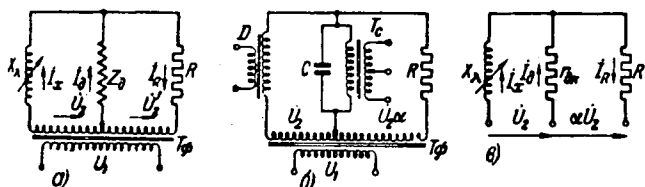


Рис. 1. Схемы индуктивного мостикового фазорегулятора.



ную составляющую диагонали, благодаря чему центр окружности смещается только по оси напряжения  $\dot{U}_2$ . Увеличение же напряжения соответствующей полуобмотки трансформатора компенсирует это смещение, обусловленное падением напряжения в плече  $R$ . Кроме этого, конденсатор увеличивает полное сопротивление диагонали моста и тем значительнее, чем меньше  $\cos \varphi$  сеточного трансформатора, обычно равный величине порядка 0,1.

Таким образом, улучшенная схема позволяет: 1) обеспечить постоянство напряжения диагонали, 2) уменьшить управляющую мощность, 3) увеличить диапазон изменения фазы сеточного напряжения.

Необходимая для полной компенсации величина емкости конденсатора определяется условием резонанса:

$$C = \frac{L_\partial}{r_\partial^2 + \omega^2 L_\partial^2} \approx \frac{1}{\omega x_\partial}. \quad (5)$$

Активное сопротивление настроенной в резонанс диагонали

$$r_{\partial\kappa} = \frac{r_\partial^2 + x_\partial^2}{r_\partial} = \frac{Z_\partial}{\cos \varphi_0} \approx \frac{x_\partial^2}{r_\partial}. \quad (6)$$

Требуемое увеличение напряжения полуобмотки трансформатора, определим, положив в уравнении (1)  $\dot{U}'_2 = \dot{U}_2 a$  и заменив  $Z_\partial = r_{\partial\kappa}$  (рис. 1, в). Тогда напряжение диагонали

$$\dot{U}_\partial = \dot{U}_2 r_{\partial\kappa} \frac{R - j\alpha X_0 \lambda}{R r_{\partial\kappa} + j(R + r_{\partial\kappa}) X_0 \lambda}, \quad (7)$$

а векторы центра окружности и ее радиуса

$$\begin{aligned} \dot{\mu} &= -\dot{U}_2 \frac{R + r_{\partial\kappa} (1 - \alpha)}{2(R + r_{\partial\kappa})}; \\ \dot{\rho} &= -\dot{U}_2 \frac{R + r_{\partial\kappa} (1 + \alpha)}{2(R + r_{\partial\kappa})}. \end{aligned} \quad (8)$$

Имея в виду, что напряжение диагонали будет постоянным при  $\mu = 0$ , из (8) найдем соответствующее значение  $\alpha = \alpha_0$ :

$$\alpha_0 = \frac{R + r_{\partial\kappa}}{r_{\partial\kappa}}. \quad (9)$$

Рабочие характеристики фазорегулятора удобно определять с помощью круговой диаграммы

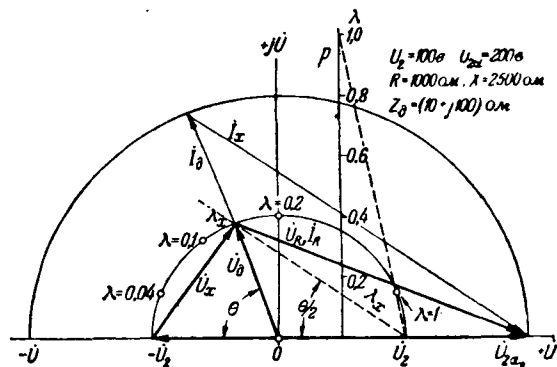


Рис. 2. Круговая диаграмма фазорегулятора по схеме рис. 1, б.

(рис. 2), которая строится на основании следующих соотношений.

Геометрическим местом напряжения диагонали и плеч  $R$  и  $X_\lambda$  будет окружность, уравнение которой можно получить из (7), подставив в него  $\alpha = \alpha_0$  из (9):

$$\dot{U}_\partial = -\dot{U}_2 \frac{R r_{\partial\kappa} - j(R + r_{\partial\kappa}) X_0 \lambda}{R r_{\partial\kappa} + j(R + r_{\partial\kappa}) X_0 \lambda} = -\dot{U}_2 e^{-j\Theta}, \quad (10)$$

где

$$\Theta = 2 \arctg \frac{X_0 \lambda}{R_\partial} \quad (11)$$

— фазовый угол вектора напряжения диагонали, а

$$R_\partial = \frac{R r_{\partial\kappa}}{R + r_{\partial\kappa}} \quad (12)$$

— эквивалентное сопротивление параллельно соединенных  $R$  и  $r_{\partial\kappa}$ .

Для шкалы параметра  $\lambda$  окружности напряжений из (10) можно получить уравнение:

$$P = \frac{1}{2} \dot{U}_2 \frac{R_{\partial\kappa} + jX_0 \lambda}{R_{\partial\kappa}} = \frac{1}{2} \dot{U}_2 \left( 1 + j \tg \frac{1}{2} \Theta \right). \quad (13)$$

Точка окружности напряжений для данного  $\lambda_x$  определяется пересечением окружности с лучом, проведенным из точки  $\dot{U}_2$  через деление шкалы  $\lambda_x$ . Геометрическими местами всех трех токов фазорегулятора — диагонали и плеч  $R$  и  $X_\lambda$  — будут также окружности, уравнения которых находятся из системы (1) после подстановки  $Z_\partial = r_{\partial\kappa}$  и  $\alpha_0$  из (9). Именно: для тока диагонали

$$\dot{I}_\partial = \frac{\dot{U}_2}{r_{\partial\kappa}}; \quad \dot{\mu}_{I\partial} = 0; \quad \dot{\rho}_{I\partial} = \frac{\dot{U}_2}{r_{\partial\kappa}}; \quad (14)$$

для тока плеча с активным сопротивлением

$$\begin{aligned} \dot{I}_R &= -\frac{\dot{U}_2}{r_{\partial\kappa}} \cdot \frac{(R + 2r_{\partial\kappa}) r_{\partial\kappa} + jX_0 (R + r_{\partial\kappa}) \lambda}{R r_{\partial\kappa} + jX_0 (R + r_{\partial\kappa}) \lambda}; \\ \dot{\mu}_{IR} &= \frac{\dot{U}_2}{R_{\partial\kappa}}; \quad \dot{\rho}_{IR} = \frac{\dot{U}_2}{R}; \end{aligned} \quad (15)$$

для тока индуктивного плеча

$$\dot{I}_x = -2 \frac{\dot{U}_2}{R_{\partial\kappa}} \cdot \frac{R_{\partial\kappa}}{R_{\partial\kappa} + jX_0 \lambda}; \quad \dot{\mu}_{Ix} = \dot{\rho}_{Ix} = \frac{\dot{U}_2}{R_{\partial\kappa}}. \quad (16)$$

Практически, на круговой диаграмме удобно центры окружности всех трех токов совместить с центром окружности напряжений, а окружность тока  $\dot{I}_R$  совместить с окружностью напряжений, взяв масштаб всех трех токов, равным

$$m_I = \frac{m_u}{R} \left[ \frac{a}{\text{мм}} \right], \quad (17)$$

где  $m_u$  — масштаб напряжений  $\left( \frac{\text{В}}{\text{мм}} \right)$ .

Тогда (рис. 2) окружность тока  $\dot{I}_x$  пройдет через точку  $\dot{U}_2 \alpha_0$ . Вектор тока  $\dot{I}_R$  будет равен по величине и фазе вектору своего напряжения. Вектор тока диагонали представится продолжением вектора напряжения диагонали, заключен-

ным между окружностями напряжений и тока  $\vec{I}_x$ . Вектор тока  $\vec{I}_x$  замыкает треугольник токов  $\vec{I}_0 + \vec{I}_x - \vec{I}_R = 0$ .

При расчете фазорегулятора следует исходить из заданных параметров сетевого трансформатора: кажущейся мощности  $S_T$  и активной  $P_T$ , номинального напряжения  $U_T$  и тока  $I_T$ . Согласно (10) получаем, что  $U_2 = U_0 = U_T$ .

Реактивное сопротивление сетевого трансформатора можно принять с достаточной точностью, ввиду низкого  $\cos \varphi$ , равным

$$x_T \approx \frac{U_T}{I_T} = \frac{U_T^2}{S_T}. \quad (18)$$

Активное сопротивление трансформатора

$$r_T = \frac{P_T}{I_T^2}. \quad (19)$$

Активное сопротивление компенсированной диагонали согласно (6) будет

$$r_{\partial k} = \frac{U_T^2}{P_T}. \quad (20)$$

Емкость конденсатора при резонансной компенсации из (5)

$$C = \frac{3_T}{2\pi f U_T^2} 10^6 [\text{мкф}]. \quad (21)$$

Кажущаяся мощность дросселя насыщения, обуславливающая его габариты, определится полным вторичным напряжением трансформатора фазорегулятора из условия  $X_\lambda = \infty$  и максимальным током дросселя из условия  $X_\lambda = 0$ . Значение последнего из (16)

$$I_{x \text{ макс}} = 2 \frac{U_2}{R_{\partial k}}. \quad (22)$$

Отсюда выражение габаритной мощности дросселя, учитывая (20),

$$P_x = U_2 (1 + \alpha_0) I_{x \text{ макс}} = 2P_T \frac{(R + r_{\partial k})(R + 2r_{\partial k})}{Rr_{\partial k}}. \quad (23)$$

Оптимальную величину сопротивления плеча  $R$  найдем из условия минимальной габаритной мощности дросселя насыщения, которому отвечает и минимальная мощность управления. Из уравнения  $\frac{dP_x}{dR} = 0$  находим

$$R_{\text{опт}} = \sqrt{2} r_{\partial k}. \quad (24)$$

Из (23) можно найти, что практически достаточно взять  $R = r_{\partial k}$ . Отсюда, согласно (9), определяется значение  $\alpha_0 = 2$ . Габаритная мощность дросселя насыщения, таким образом,  $P_{x \text{ опт}} = 12P_T$ .

Напряжения полуобмоток трансформатора будут  $U_2 = U_T$  и  $U'_2 = 2U_T$ , а эквивалентное сопротивление  $R_{\partial k} = \frac{1}{2} r_{\partial k}$ .

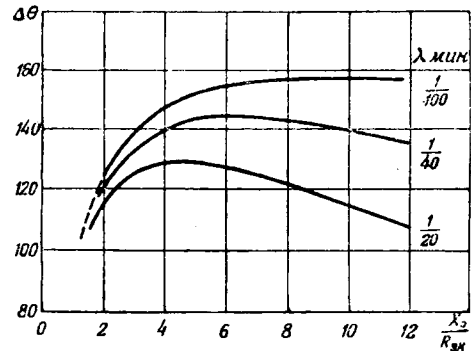


Рис. 3. Диапазон регулирования фазы  $\Delta\theta = f\left(\frac{X_0}{R_{\partial k}}\right)$  при различной глубине регулирования дросселя  $\lambda_{\min}$ .

Далее определяется начальное реактивное сопротивление  $X_0$  дросселя насыщения и глубина его регулирования  $\lambda_{\min}$ , исходя из условия максимального диапазона регулирования фазы. Диапазон регулирования фазы зависит от отношения реактивного сопротивления дросселя к эквивалентному сопротивлению моста  $X_0/R_{\partial k}$  и от минимального значения коэффициента  $\lambda_{\min}$ . Зависимость диапазона регулирования от указанного отношения (рис. 3)

$$\Delta\theta = \theta_{\text{макс}} - \theta_{\min} = 2 \left( \arctg \frac{X_0}{R_{\partial k}} - \arctg \frac{X_0}{R_{\partial k} \lambda_{\min}} \right) \quad (25)$$

имеет максимум при определенном соотношении  $X_0/R_{\partial k}$  и  $\lambda_{\min}$ , именно при  $X_0 = X \frac{R_{\partial k}}{\sqrt{\lambda_{\min}}}$ . Отсюда

и определяется оптимальная величина  $X_0$ , исходя из принятого по кривым рис. 3 значения  $\lambda_{\min}$ . Дальнейший расчет дросселя производится известными методами [Л. 1]. При расчете, кроме полученных выше данных дросселя, учитываются условия, обеспечивающие максимальную крутизну характеристики моста — угол регулирования  $\theta$  в функции управляющего тока.

Трансформатор фазорегулятора рассчитывается на основании определенных выше вторичных напряжений и максимальных токов в плечах. Максимальный ток плеча с сопротивлением  $R$  будет иметь место при  $X_\lambda = 0$ . Из (15) его величина при  $R = r_{\partial k}$ :

$$I_{R \text{ макс}} = 3 U_2 \frac{1}{r_{\partial k}} = 3 \frac{P_T}{U_2}. \quad (26)$$

Расчетная вторичная мощность трансформатора фазорегулятора, учитывая (22) и (26), будет:

$$P_\phi = U_2 I_{x \text{ макс}} + 2 U_2 I_{R \text{ макс}} = 10 P_T. \quad (27)$$

#### Литература

1. Л. А. Бессонов. Электрические цепи со сталью. Госэнергоиздат, 1948.

[1. 6. 1948]



# Электромашинный регулятор с критическим самовозбуждением

Кандидат техн. наук С. Р. ПЯСЕЦКИЙ

Москва

В практике электрического привода и регулирования большое распространение получают специальные электрические машины, применяемые в качестве электромашинных регуляторов или так называемых электромашинных усилителей.

Электромашинный усилитель с поперечным полем („амплидин“), как известно, представляет собой машину специальной конструкции. Она освоена в настоящее время в сравнительно небольшом диапазоне мощностей, значительно сложнее в производстве, чем машины нормальной конструкции, стоимость ее высокая. Здесь освещаются основные вопросы теории другого электромашинного регулятора, который представляет собой генератор постоянного тока нормальной конструкции в схеме самовозбуждения. Магнитная система его принимается ненасыщенной — т. е. полагают его характеристику холостого хода прямолинейной. Регулирование осуществляется с помощью одной или нескольких сигнальных обмоток, расположенных на главных полюсах вместе с основной обмоткой возбуждения. Для краткости в дальнейшем электромашинный регулятор будем называть — просто генератором.

Для построения теории генератора с критическим самовозбуждением принимаем следующее идеализированное условие: э. д. с. якоря как при холостом ходе, так и при нагрузке точно равна омическому падению напряжения в контуре самовозбуждения. При отсутствии остаточного магнетизма это условие, как увидим ниже, сводится к равенству сопротивления контура возбуждения его критическому значению. Естественно, что это условие практически строго выдержано не может быть вследствие изменения сопротивления обмотки возбуждения при нагреве и непостоянства скорости двигателя, приводящего во вращение генератор. Это обстоятельство ниже рассматривается.

**Холостой ход генератора.** Обратная связь отсутствует. Рассмотрим генератор шунтовой возбуждения на холостом ходу (рис. 1). При

Рассматривается электромашинный регулятор с критическим самовозбуждением, представляющий собой нормальную машину постоянного тока, у которой сопротивление контура возбуждения равно критическому значению. Дан теоретический анализ для режима холостого хода и при работе в схеме Леонарда. Показано, что такой генератор является астатическим и дает устойчивое напряжение только при наличии обратной связи. Приводятся результаты экспериментов.

выключении сигнальной обмотки его можно рассматривать как обычный шунтовой генератор.

На рис. 1 кривая  $BV$  изображает характеристику холостого хода генератора. Угол наклона вольтамперной характеристики возбуждения (пунк-

тир), как известно, определяется сопротивлением контура возбуждения. Ее уравнение

$$e_a = (R_s + R_a) i_s, \quad (1)$$

где  $e_a$  — э. д. с. генератора;

$R_s$  — сопротивление обмотки возбуждения;

$R_a$  — сопротивление якоря;

$i_s$  — ток возбуждения.

На некотором участке  $B_1 B_1$  характеристику холостого хода можно считать прямолинейной. Уравнение этого отрезка

$$e_a = R_k i_s, \quad (2)$$

где  $R_k$  — критическое сопротивление контура возбуждения.

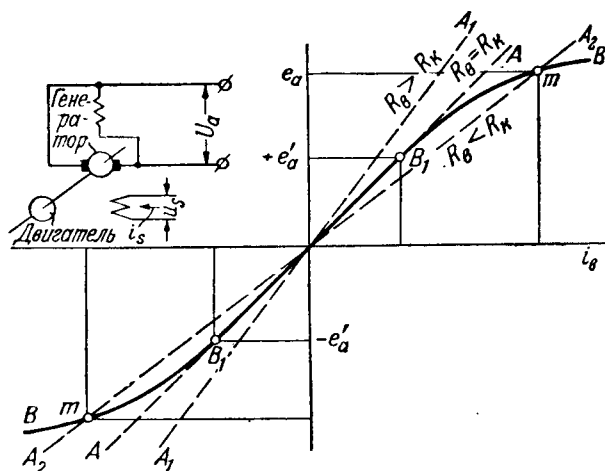


Рис. 1. Схема электромашинного регулятора без обратной связи.

AA — вольтамперные характеристики обмотки самовозбуждения; BV — характеристика холостого хода электромашинного регулятора.

Если угол наклона вольтамперной характеристики (АА-пунктир) больше угла наклона отрезка  $B_1B_1$ , то, как известно, генератор не возбуждётся. В обычных машинах постоянного тока, работающих с самовозбуждением, величина э. д. с. определяется точками пересечения вольтамперной прямой и характеристики холостого хода  $mm$  (рис. 1).

Согласно принятому выше условию, необходимо совпадение прямой АА и отрезка  $B_1B_1$ . Как следует из равенств (1) и (2), при этом критическое сопротивление должно равняться сумме сопротивлений в контуре возбуждения

$$R_k = R_s + R_a. \quad (3)$$

При таком совпадении в обычной машине мы не имели бы возможности регулировать величину ее э. д. с. В рассматриваемом генераторе эта возможность обеспечивается наличием сигнальной обмотки.

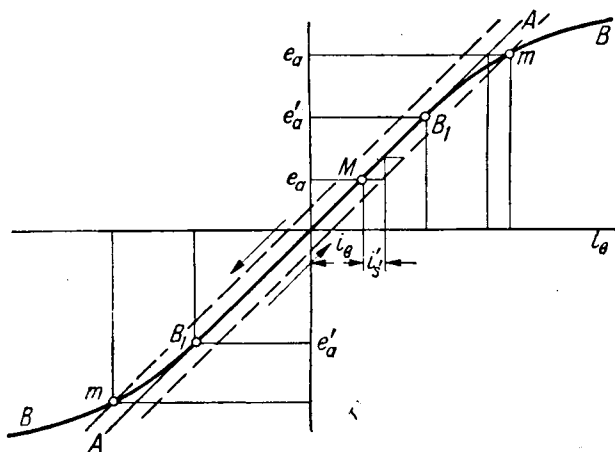


Рис. 2.

В дальнейшем ток сигнальной обмотки будем приводить к числу витков основной обмотки возбуждения:

$$i'_s = i_s \frac{w_s}{w_g} = i_s \nu, \quad (4)$$

где  $w_s$ ,  $w_g$  — числа витков сигнальной и основной обмотки возбуждения;  
 $\nu$  — их отношение.

Действие сигнальной обмотки в такой схеме поясняет рис. 2. Если при выключенной сигнальной обмотке э. д. с. генератора определялась точкой М, то при ее включении на некоторое постоянное напряжение появится сигнальный ток, эквивалентный добавочному току возбуждения  $i'_s$ . Это равносильно сдвигу вольтамперной характеристики относительно оси ординат вправо или влево, в соответствии со знаком тока сигнальной обмотки, что вызывает повышение или понижение э. д. с. генератора до величины, определяемой точкой пересечения вольтамперной характеристики с характеристикой холостого хода в зоне насыщения  $mm$ .

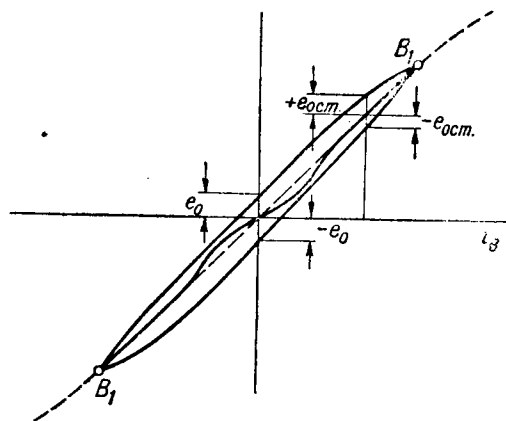


Рис. 3. Начальная характеристика холостого хода и петля гистерезиса электромашиного регулятора.

Для схемы рис. 1 при постоянной величине напряжения, приложенного к сигнальной обмотке, и некоторых допущениях (приложение 1) можно получить следующие выражения для сигнального тока, тока возбуждения и э. д. с. генератора:

$$i_s = \frac{U_s}{R_s \beta}; \quad (5)$$

$$i_g = \frac{I_s \nu}{\beta} \left( \frac{t}{T_g} - 1 \right) + I_{g.н}; \quad (6)$$

$$e_a = \frac{a \cdot U_s}{\beta} \cdot \frac{t}{T_g} + E_n, \quad (7)$$

где  $U_s$  — напряжение, приложенное к сигнальной обмотке;

$R_s$  — сопротивление сигнальной обмотки;  
 $I_{g.н}$ ,  $E_n$  — начальные значения тока возбуждения и э. д. с. генератора;

$T_g = \frac{L_g}{R_g + R_a} = \frac{L_g}{R_k}$  — постоянная времени контура возбуждения;

$$I_s = \frac{U_s}{R_s}; \quad \beta = 1 + \alpha \nu;$$

$$\alpha = \frac{R_k}{R_s} \cdot \nu; \quad \nu = \frac{w_s}{w_g}.$$

Из расчетного графика (рис. 8) видно, что сигнальный ток  $i_s$  устанавливается мгновенно и остается неизменным в течение переходного процесса, ток возбуждения  $i_g$  совершает отрицательный бросок и затем нарастает по прямой, а э. д. с.  $e_a$  изменяется все время линейно (данные экспериментального обреза приведены ниже).

Таким образом, э. д. с. генератора при постоянной величине напряжения  $U_s$ , приложенного к сигнальной обмотке, в пределах прямолинейного участка характеристики холостого хода изменяется линейно со скоростью, пропорциональной тому же напряжению  $U_s$ . Следовательно, рассматриваемый генератор является астатическим регулятором.

**Влияние обратной связи.** Рассматриваем режим холостого хода генератора (рис. 4, рубиль-

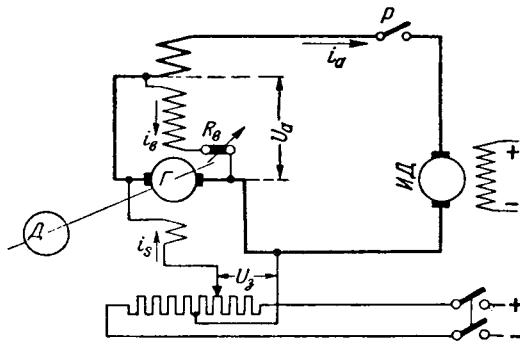


Рис. 4. Электромашинный регулятор с обратной связью в схеме Леонарда.

Г—электромашинный регулятор; Д—приводной двигатель; ИД—исполнительный двигатель; Р—рубильник.

ник Р отключен). Из схемы (рис. 4) видно, что в контуре обратной связи напряжение на сигнальной обмотке равно разности напряжения заданного потенциометром и напряжения на щетках генератора. Естественно, что вместо потенциометра может быть использован любой прибор управления, например электронный усилитель. В дальнейшем будет показано, что если выполнены перечисленные ниже три условия (8), то при установившемся режиме сигнальный ток будет равен нулю и напряжение генератора при регулировании будет точно следовать за напряжением потенциометра:

- $$\left. \begin{array}{l} \text{а) сопротивление контура возбуждения постоянно и равно критическому } R_g + R_a = R_k; \\ \text{б) скорость вращения генератора постоянна и равна номинальной } n = n_N; \\ \text{в) остаточный магнетизм отсутствует } e_{ост} = 0. \end{array} \right\} \quad (8)$$

В действительности имеют место некоторые отклонения от этих идеализированных условий. Сопротивления обмоток возбуждения и якоря генератора изменяются при нагреве машины, в результате чего нарушается первое условие. Второе условие, строго говоря, также не удовлетворяется.

Для учета указанных отклонений введем коэффициенты:

$$k_r = \frac{R_g + R_a}{R_k}; \quad k_n = \frac{n}{n_N}. \quad (9)$$

Остаточной э. д. с. генератора (рис. 3) будем называть разность ординат начальной характеристики холостого хода и соответствующей ветви петли гистерезиса при некотором значении э. д. с. генератора.

В установившемся режиме э. д. с. генератора с учетом указанных выше поправок (рис. 4)

$$E_a = k_n R_k (I_g + I_s) + e_{ост}. \quad (10)$$

Для контура возбуждения при установившемся режиме

$$E_a = R_g I_g + R_a (I_g - I_s). \quad (11)$$

Приравнявая эти два равенства, получим выражение для установившегося значения сигнального тока при холостом ходе

$$I_s = \frac{R_k (k_r - k_n) I_g - e_{ост}}{R_k k_n + R_a}. \quad (12)$$

Заметим, что если условия (8) выдержаны, то значение сигнального тока, как указывалось ранее, равно нулю.

Из анализа схемы рис. 4, при отключенном двигателе (приложение 2), можно получить следующие выражения для сигнального тока, тока возбуждения и э. д. с. генератора при мгновенном изменении заданного напряжения на управляющем потенциометре  $U_3$

$$i_s = \frac{\Delta I_g}{\lambda} e^{-\frac{t}{\lambda T_g}}; \quad (13)$$

$$i_g = I_g - \frac{1 + \lambda}{\lambda} \Delta I_g e^{-\frac{t}{\lambda T_g}}; \quad (14)$$

$$e_a = E_n + \Delta E_n \left( 1 - e^{-\frac{t}{\lambda T_g}} \right), \quad (15)$$

где  $\lambda = \frac{\gamma a + \delta}{a}$ ;  $\delta = 1 + \frac{R_{ном} (1 - \xi) \xi}{R_s}$ .

$\xi = \frac{r}{R_{ном}}$  — отношение рабочего плеча потенциометра к сопротивлению одной его секции;

$\Delta I_g = I_g - I_{г.н}$  и  $\Delta E_a = E_a - E_n$  — приращения, которые получают в результате переходного процесса ток возбуждения и напряжение на щетках генератора. Здесь  $I_{г.н}$  — начальное значение тока возбуждения;  $E_n$  — начальное значение э. д. с. генератора.

Коэффициенты  $\delta$  и  $\lambda$  всегда положительны. Следовательно, показатель степени, входящий в полученные выражения, всегда отрицателен, т. е. эти выражения представляют собой аperiodически затухающие функции. На расчетном графике (см. ниже рис. 10) показаны кривые сигнального тока  $i_s$ , тока возбуждения  $i_g$  и напряжения на щетках генератора  $e_a$  при мгновенном возрастании напряжения потенциометра от нуля до некоторой постоянной величины.

**Генератор с критическим самовозбуждением в схеме Леонарда** (рис. 4 рубильник Р включен). Рассмотрим установившийся режим.

Для контура возбуждения:

$$E_a = R_k k_r I_g - R_{эк} I_s + R_{эк} I_a, \quad (16)$$

где  $R_{эк}$  — эквивалентное сопротивление якоря генератора, учитывающее активное сопротивление и реакцию якоря. С другой стороны, э. д. с. генератора

$$E_a = R_k k_n (I_g + I_s) + k_c I_a + e_{ост}, \quad (17)$$

где  $k_c$  — коэффициент последовательной обмотки.

Приравнявая равенства (16) и (17), получим выражение для сигнального тока при установившемся режиме схемы привода

$$I_s = \frac{R_k(k_r - k_n)I_b - e_{ост} + (R_{ак} - k_c \cdot k_n)I_a}{R_k \cdot k_n \nu + R_{ак}}. \quad (18)$$

Если пренебречь отклонением скорости вращения генератора (положить коэффициент  $k_n = 1$ ), то это выражение упростится:

$$I_s = \frac{(R_b - R_k)I_b - e_{ост} + R_{рез}I_a}{R_k \nu + R_{ак}}, \quad (19)$$

где

$$R_{рез} = R_{ак} - k_c.$$

Так же как для случая холостого хода, если условия (8) выдержаны ( $k_r = 1$ ;  $k_n = 1$ ;  $e_{ост} = 0$ ) и, кроме того, компаундная обмотка подобрана таким образом, чтобы она точно компенсировала активное сопротивление и реакцию якоря генератора ( $R_{рез} = 0$ ), то сигнальный ток равен нулю [формулы (18) и (19)].

Анализ схемы рис. 4 приводит к дифференциальным уравнениям третьего порядка (приложение 3). Устойчивость системы приближенно определяется неравенством:

$$R_{д.с} > \frac{R_s + R_{ном}(1 - \xi)}{R_k \nu(1 + \nu)} \cdot (R_a - R_{рез}). \quad (20)$$

Отсюда видно, что устойчивость возрастает при увеличении:  $R_{д.с}$  — сопротивления внешней части силового контура (якорь двигателя и последовательная обмотка генератора),  $R_k$  — критического сопротивления контура возбуждения генератора,  $\nu$  — отношения числа витков сигнальной обмотки к виткам обмотки возбуждения,  $R_{рез}$  — результирующего сопротивления якоря генератора, что соответствует уменьшению числа витков последовательной обмотки. Наоборот, устойчивость системы понижается при увеличении:  $R_s$  — сопротивления сигнальной обмотки;  $R_{ном}$  — сопротивления потенциометра,  $R_a$  — сопротивления якоря генератора.

Заметим, что увеличение коэффициента  $\nu$  и уменьшение сопротивлений  $R_{ном}$ ,  $R_s$  равносильно усилению обратной связи. Значит усиление обратной связи, как и следовало ожидать, повышает устойчивость системы.

**Экспериментальное исследование.** В качестве генератора с критическим самовозбуждением был использован электродвигатель постоянного тока типа „СЛ-369“ 175 Вт, 110 В, 3600 об/мин с приводным двигателем типа „СЛ-570“ 76 Вт, 3000 об/мин, с центробежным регулятором скорости на валу. Исполнительный двигатель типа „СЛ-369“ 55 Вт, 110 В, 3600 об/мин. Нагрузка его осуществлялась с помощью тормозного шкива.

Для получения прямолинейной характеристики холостого хода был снижен магнитный поток генератора, что соответственно понизило его номинальную мощность (до 75 Вт). Сигнальная обмотка была подсчитана, исходя из допустимого значения сигнального тока, который появляется в результате увеличения сопротивления обмотки возбуждения при нагреве генератора и в результате неустойчивости его скорости вращения. Предполагалось, что в холодном состоянии генератора сопротивление цепи возбуждения устанавливается так, чтобы сигнальный ток равнялся нулю. Последовательная обмотка была

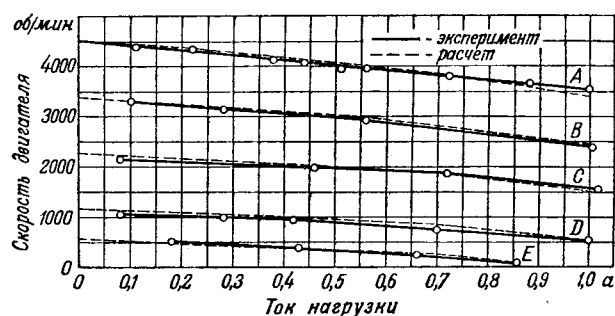


Рис. 5. Скорость исполнительного двигателя в зависимости от нагрузки при различных установках (А, В, С, D, Е) потенциометра управления (рис. 4).

определена также, исходя из допустимой величины сигнального тока, но для случая регулирования скорости исполнительного двигателя от номинального значения вниз до нуля, при номинальном моменте на валу двигателя.

На рис. 5 и 6 нанесены кривые зависимости скорости исполнительного двигателя и сигнального тока от нагрузки в схеме Леонарда при регулировании скорости (пунктиром показаны расчетные кривые). Относительное понижение скорости при номинальной нагрузке и регулировании исполнительного двигателя вниз составляет от 13 до 5%. Наибольший сигнальный ток по абсолютному значению имеет место при низких скоростях. Коэффициент усиления  $K_y$  падает от весьма высокого значения при наивысших скоростях (38 000) до сравнительно небольшой величины (44) при низких скоростях.

На рис. 7 приведена осциллограмма возбуждения генератора на холостом ходу при включении сигнальной обмотки (схема рис. 1) на некоторое постоянное напряжение ( $U_s$ ).

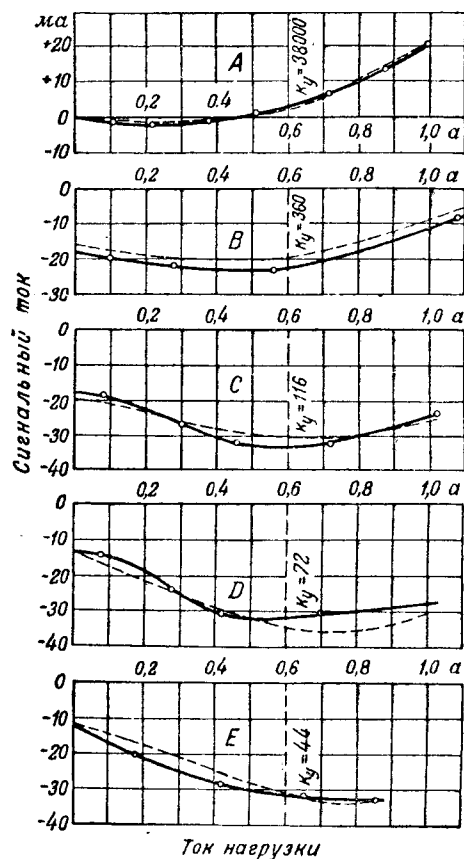


Рис. 6. Ток сигнальной обмотки в зависимости от нагрузки исполнительного двигателя при тех же установках (А, В, С, D, Е) потенциометра управления, что и на рис. 5

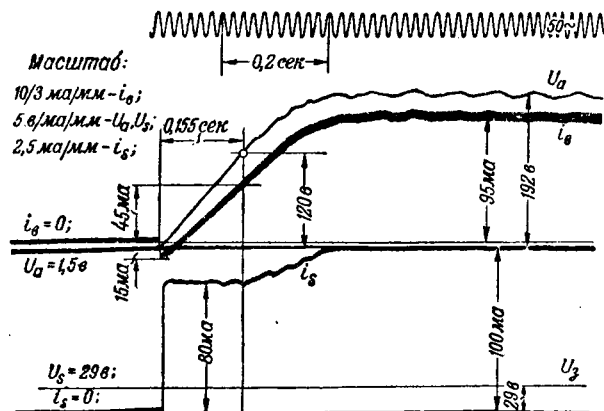


Рис. 7. Возбуждение электромашинного регулятора при постоянной величине напряжения, приложенного к сигнальной обмотке (рис. 1).

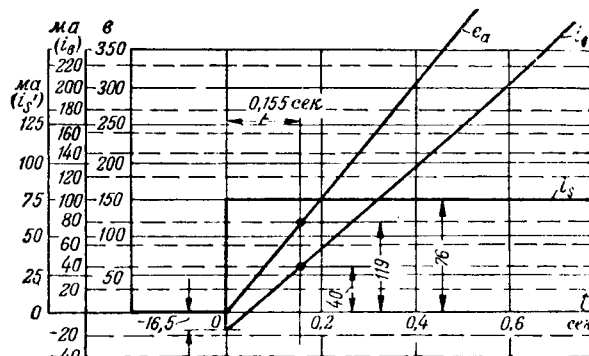


Рис. 8. Расчетный график, соответствующий осциллограмме рис. 7.

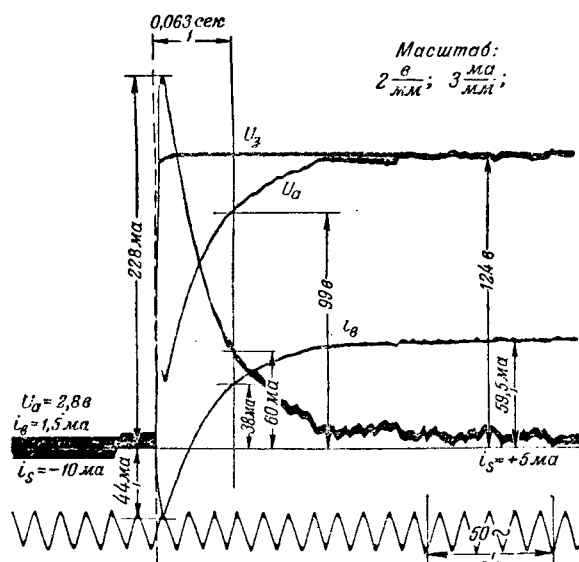


Рис. 9. Возбуждение электромашинного регулятора с обратной связью на холостом ходу (рис. 4, рубильник Р выключен).

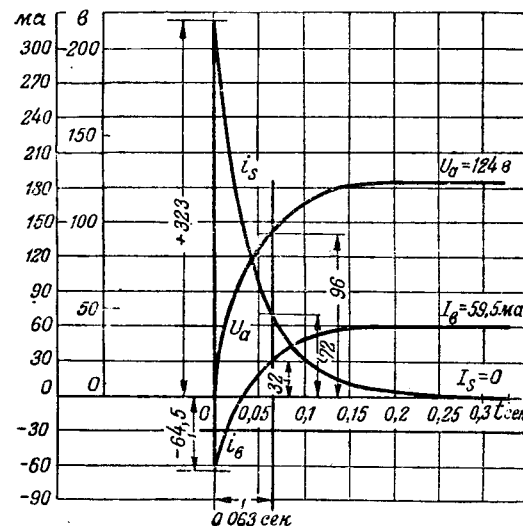


Рис. 10. Расчетный график, соответствующий осциллограмме рис. 9.

Расчетные кривые (рис. 8) в области, в которой еще не сказывается насыщение генератора (до ~ 150 в), близки к кривым осциллограммы.

На рис. 9 приведена осциллограмма возбуждения генератора на холостом ходу при включении сигнальной обмотки по схеме обратной связи (рис. 4) и мгновенного изменения напряжения потенциометра от нуля до номинальной величины (расчетный график дан на рис. 10).

На рис. 11 приведена осциллограмма разгона исполнительного двигателя при полной нагрузке со шкивом на валу. Разгон до 90% номинальной скорости происходит за 0,69 сек. В режиме холостого хода время разбега составляет 0,13 сек. Возрастание времени разбега при нагрузке объясняется сравнительно большим моментом инерции тормозного шкива на валу двигателя.

**Выводы.** 1. Генератор с критическим самовозбуждением можно рассматривать как астатический регулятор и в системе регулирования его можно определить как интегрирующее звено.

2. При соответствующей регулировке сопротивления в цепи возбуждения такой генератор имеет весьма высокий коэффициент усиления практически бесконечно большой.

3. Генератор с критическим самовозбуждением в схеме Леонарда может быть использован для привода сервомеханизмов<sup>1</sup>, так как при зн

<sup>1</sup> Некоторая нежесткость скоростных характеристик (рис. 5) не имеет существенного значения в приводе сервомеханизмов, так как момент нагрузки — обычно величина постоянная или функция скорости.

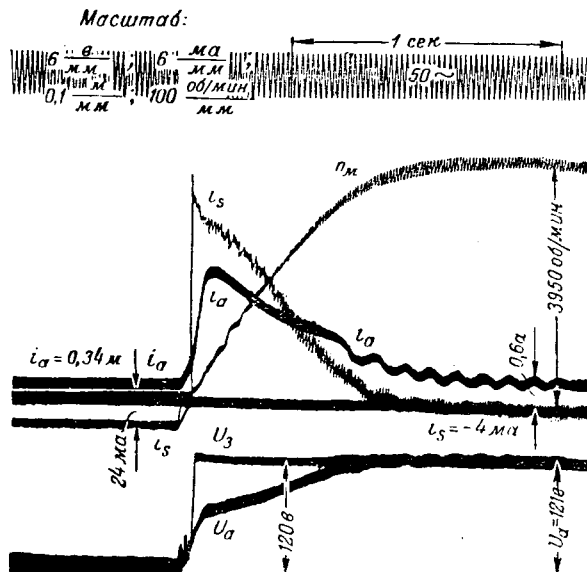


Рис. 11. Разгон исполнительного двигателя при нагрузке.

чительных регулировочных возможностях он обладает сравнительно высокой скоростью реакции.

**Приложение 1** (схема рис. 1). Примем следующие допущения: скорость вращения генератора полагаем постоянной, сопротивление контура возбуждения постоянно и равно критическому сопротивлению  $R_g + R_a = R_k = \text{const}$ , остаточным магнитизмом пренебрегаем; магнитную связь между обмотками возбуждения ( $L_g$ ) и сигнальной ( $L_s$ ), полагаем жесткой

$$k_{\mu} = \frac{M}{\sqrt{L_g L_s}} = 1.$$

Для контура сигнальной обмотки

$$U_s = i_s R_s + L_s p i_s + M p i_g; \quad (21)$$

для контура основной обмотки возбуждения

$$e_a = i_g (R_g + R_a) + L_g p i_g + M p i_s; \quad (22)$$

э. д. с. генератора

$$e_a = R_k (i_g + i'_s). \quad (23)$$

При решении этих трех уравнений исходим из того, что магнитный поток генератора и его э. д. с. в момент включения сигнальной обмотки не могут измениться мгновенно  $[(e_a)_{t=0} = E_n]$ . В результате получим приведенные выше [формулы (5) — (7)] выражения для сигнального тока, тока возбуждения и э. д. с. генератора.

**Приложение 2** (схема рис. 4). Примем следующие допущения: 1) условия (8) удовлетворены; 2)  $k_{\mu} = 1$ ; 3) реакцией и индуктивностью потоков рассеяния якоря и падением напряжения в якоре от сигнального тока пренебрегаем.

Для контура сигнальной обмотки

$$u_s = e_a - i_g R_a + i_s R_s + L_s p i_s + M p i_g; \quad (25)$$

Напряжение потенциометра

$$u_3 = U_3^0 - R_{ном} (1 - \xi) \xi i_s, \quad (26)$$

где  $U_3^0$  — напряжение потенциометра при сигнальном токе, равном нулю. Для контура обмотки возбуждения и э. д. с. справедливы (22) и (23).

Решая полученную систему уравнений, интегрируя и находя постоянную интегрирования из того же начального условия, что и в предыдущем случае, получим приведенные выше для формулы (13) — (15).

**Приложение 3** (схема рис. 4). Примем следующие допущения: 1) условия (8) удовлетворены; 2) сопротивление контура возбуждения равно критическому  $R_k \approx R_g$ , где  $R_g$  — суммарное сопротивление обмотки возбуждения и реостата в ее цепи; 3) магнитную связь между обмотками возбуждения полагаем полной  $[K_{\mu}(gs) = K_{\mu}(bs) = K_{\mu}(cs) = 1]$ ; 4) падением напряжения от тока возбуждения в индуктивном сопротивлении якоря генератора, сравнительно с падением напряжения во внешней части контура возбуждения, пренебрегаем

$$L_a p i_g \approx 0;$$

5) реакцией якоря исполнительного двигателя также пренебрегаем; 6) ток возбуждения и момент сопротивления на валу исполнительного двигателя полагаем постоянными.

Для контура зажимы генератора — исполнительный двигатель

$$u_a = R_{cd} i_a + L_d p i_a + e_d + L_c p i_a + M_{sc} p i_g + M_{Sc} p i_s; \quad (27)$$

зажимы генератора — потенциометр

$$u_a = u_3 - i_s R_s - L_s p i_s - M_{gs} p i_g - M_{cs} p i_a; \quad (28)$$

зажимы генератора — якорь генератора

$$u_a = e_a - R_{жк} (i_a + i_g + i_s) - L_{ap} (i_a + i_s); \quad (29)$$

для контура возбуждения

$$e_a = i_g R_g + R_{жк} (i_a + i_g + i_s) + L_a p (i_a + i_s) + L_g p i_g + M_{cs} p i_a + M_{sg} p i_s. \quad (30)$$

Уравнение движения исполнительного двигателя

$$M = J \cdot p \omega + M_s, \quad (31)$$

э. д. с. генератора

$$e_a = R_k (i_g + i'_s) + k_c i_a, \quad (32)$$

где  $R_{с.д} = R_c + R_d$  — сумма омических сопротивлений последовательной обмотки генератора и якоря двигателя;

$L_d$  — индуктивность якоря двигателя;

$M, \omega$  — вращающий момент и скорость двигателя;

$J$  — момент инерции привода, приведенный к валу двигателя.

Решая полученную систему уравнений, приходим к дифференциальным уравнениям третьего порядка с характеристическим уравнением вида

$$A p^3 + B p^2 + D p + Q = 0, \quad (33)$$

в котором коэффициенты выражаются

$$A = \tau \cdot T_d; \quad (34)$$

$$B = \tau \left[ \frac{R_{d.c}}{R_d} + \frac{\delta}{\alpha(1+\nu)} \cdot \left( \frac{R_{pez} - R_a}{R_d} + \frac{T_d}{T_g} \right) \right] - T_a \cdot \frac{R_g}{R_k \cdot \nu} (1+\nu); \quad (35)$$

$$D = \frac{\tau}{T_g} \cdot \frac{R_{d.c}}{R_d} \cdot \frac{\delta}{\alpha(1+\nu)} + 1 + \nu + \frac{\delta}{\alpha} - \frac{1}{R_k \cdot \nu} \times \\ \times \left[ R_d \cdot \frac{T_d}{T_g} + R_{жк} (1+\nu) \right]; \quad (36)$$

$$Q = \frac{1}{T_g} \left( 1 + \frac{\delta}{\alpha(1+\nu)} - \frac{R_{жк}}{R_k \cdot \nu} \right); \quad (37)$$

где  $\tau = J \frac{\omega_N}{M_N} \cdot S_N$  — электромеханическая постоянная исполнительного двигателя;

$S_N = \frac{I_N \cdot R_d}{E_N}$  — относительное понижение скорости исполнительного двигателя при номинальном режиме;

$\omega_N, M_N, I_N, E_N$  — номинальные значения угловой скорости, момента, тока якоря и противо-э. д. с. исполнительного двигателя;

$T_d = \frac{L_d}{R_d}; T_a = \frac{L_a}{R_a}$  — постоянные времени якорей исполнительного двигателя и генератора.

Система устойчива, если: 1)  $A > 0, B > 0, D > 0, Q > 0$ , 2)  $BD > AQ$ . Практически коэффициенты  $A, D, Q$  всегда положительны.

Как показывает подсчет, если соблюдено первое условие и коэффициент  $B$  положителен, то обычно выполняется и второе, так как произведение  $A \times Q$  — сравнительно небольшая величина. Если пренебречь в выражении коэффициента  $B$  (35) сравнительно малозначущими членами, то критерий устойчивости схемы в первом приближении выразится приведенным выше неравенством (20).

Настоящая работа выполнена автором под руководством профессора, доктора техн. наук Е. В. Нитусова.

#### Литература

1. А. А. Фельдбаум. Связь статизма и устойчивости в электроприводе с бустер-генератором. ВЭП, № 1, 1946.

2. А. Б. Челюсткин. Рототрол и его применение. Америк. техн. и пром., т. 21, № 7, 1944.

[1. 9. 1948]



# К вопросу классификации серийных характеристик тяговых электродвигателей

Кандидат техн. наук, доц. Н. Н. СИДОРОВ

Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта

Уже давно известно влияние формы характеристик серийных тяговых двигателей на потребление энергии и средний квадратичный ток при работе их на линии. В частности, было обращено

внимание на то, что для применения в моторных вагонах так называемые „малонасыщенные“ серийные характеристики являются весьма экономичными. Однако, до настоящего времени понятие о таких характеристиках является довольно неопределенным с неустановившейся терминологией и отсутствием количественных критериев. Поэтому нам представилось целесообразным попытаться внести некоторую ясность в этот вопрос и сделать ряд предложений по классификации, терминам и способам количественной оценки формы серийных характеристик тяговых двигателей.

В трудах ряда авторов этот вопрос затрагивался в той или иной мере. Например, в книгах А. Б. Лебедева и В. Е. Розенфельда по электрической тяге имеются указания, что форма характеристик тяговых двигателей с последовательным возбуждением зависит от насыщения магнитной цепи двигателя и что „идеальной“ или „чисто серийной“ характеристикой следует считать характеристику при прямолинейном изменении магнитного потока в зависимости от тока двигателя. Другие исследователи предлагали способы количественной оценки степени насыщения магнитной цепи двигателя или непосредственно формы кривых его характеристик<sup>1</sup>. Одним из существенных недостатков всех этих способов является то, что оценка характеристик производится лишь по двум точкам каждой. Таким образом, влияние формы характеристики между и за этими точками в них не учитывается. Кроме того, вопрос подразделения и классификации серийных характеристик по существу совсем не разрабатывался. Однако, в настоящее время

*Вопросы выбора наиболее выгоднейшей формы серийных характеристик тяговых двигателей вызвали практическую необходимость как классификации, так и количественной оценки их формы. Разработана классификация с основным делением характеристик на серийные и сверхсерийные. Предложен метод количественной оценки их формы путем сравнения с идеальной, вполне ненасыщенной серийной характеристикой.*

назрела практическая необходимость в разрешении этих задач в связи с техническим прогрессом электрической тяги.

Прежде всего представляется необходимым уточнить общее определе-

ние серийных характеристик. Примем, что характеристики тягового двигателя (при  $U = \text{const}$ ) относятся к классу серийных, если они отвечают нижеследующим условиям:

1. Скоростная характеристика  $v = f(I)$  дает увеличение скорости с уменьшением тока  $I$ , причем кривая скорости никогда не пересекает оси  $v$ .

Абсолютные значения производной  $\frac{dv}{dI}$  могут быть весьма велики и приближаться к бесконечности. В соответствии с этим магнитный поток в машине меняется в широких пределах.

2. Сила тяги  $F$  уменьшается с увеличением скорости  $v$ , однако кривая  $F = f(v)$  нигде не пересекает оси абсцисс  $v$ .

Таким образом, характеристики  $v = f(I)$  и  $F = f(v)$  целиком размещаются в первом квадранте соответствующей системы координат. Автоматический переход в генераторный режим при неизменном направлении вращения невозможен.

Будем называть идеальной такую серийную характеристику, какую будет иметь двигатель, в котором результирующий магнитный поток  $\Phi$  изменяется по прямолинейному закону в зависимости от тока двигателя  $I$ .

Такое понятие установилось в литературе и на практике достаточно прочно. Для возможности сравнения характеристик двигателей с идеальной серийной будем считать, что все они заранее пересчитаны в относительные (процентные). За единицы измерения рассматриваемых величин примем их значения при часовом режиме работы двигателя, как обычно поступают. Далее назовем степень приближения формы данной серийной характеристики к идеальной, оцененной тем или иным способом, — „мягкостью“ характеристики.

<sup>1</sup> [Л. 1—3]. Можно указать также на способ В. Е. Скобелева, который был им доложен на конференции ВНИТО ГЭТ в 1946 г. в Ленинграде.

Обозначим относительные значения тока, результирующего потока, скорости и силы тяги (или момента), выраженные в процентах, соответственно через  $i\%$ ,  $\Phi\%$ ,  $v\%$ ,  $f\%$ . Относительное падение напряжения в двигателе при часовом режиме

$$\delta_h = 100 \frac{I_{hr}}{U} \% \quad (1)$$

Тогда формулы идеальной серийной характеристики представятся в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \Phi\% &= i\%, \\ v\% &= 100 \frac{100^2 - i\% \delta_h}{i\% (100 - \delta_h)}, \\ f\% &= \frac{i\%^2}{100}, \\ f\% &= \frac{100^5}{[100v\% + (100 - v\%) \delta_h]^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Если пренебречь сравнительно малым значением  $\delta_h$ , то получим:

$$v\% = \frac{100^2}{i\%}, \quad (3)$$

$$f\% = \frac{i\%^2}{100}, \quad (4)$$

$$f\% = \frac{100^3}{v\%^2}. \quad (5)$$

Эти формулы будем считать характерными для идеальной характеристики — идеальной в том смысле, что внутреннее сопротивление двигателя принимается равным нулю.

Из формул (3), (4) и (5) можно усмотреть, что зависимость скорости от тока изображается равнобокой гиперболой, момента от тока — параболой, а момента от скорости — политропой с показателем у скорости, равным двум.

Так как в основу определения идеальной характеристики лег критерий формы изменения магнитного потока в двигателе, то при дальнейшем подразделении серийных характеристик логично исходить из этого же признака. Нам представляется целесообразным все серийные характеристики разделить на две основные группы: собственно серийные или просто серийные и сверхсерийные.

Серийными будем называть характеристики двигателя, отвечающие изменению в нем результирующего магнитного потока  $\Phi$  по кривой, которая с увеличением тока двигателя  $I$  дает возрастание потока  $\Phi$  с одновременным последовательным уменьшением производной  $\frac{d\Phi}{dI}$  ( $\frac{d^2\Phi}{dI^2} < 0$ , например кривая 1 рис. 1).

Сверхсерийными будем называть характеристики двигателя, отвечающие изменению в нем результирующего магнитного потока  $\Phi$  по кривой, которая с увеличением тока двигателя  $I$  дает увеличение потока  $\Phi$  с одновременным последовательным возрастанием значения производной  $\frac{d\Phi}{dI}$  ( $\frac{d^2\Phi}{dI^2} > 0$ , например кривая 2 рис. 1).

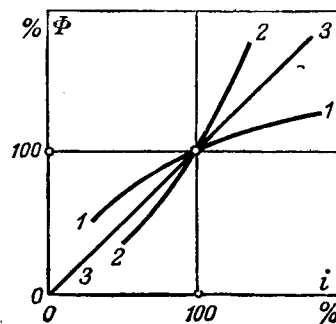


Рис. 1. Основные формы изменений магнитного потока.

Следовательно, идеальная серийная характеристика, для которой  $\frac{d\Phi}{dI} = \text{const}$ , разграничи-

вает области серийных и сверхсерийных характеристик. Другой границей сверхсерийных характеристик логично считать так называемую характеристику постоянной мощности. Для нее справедливы соотношения:  $i\% = 100 = \text{const}$ ,

$\Phi\% = f\%$  и  $v\% = \frac{100^3}{f\%}$ ; здесь скорость обратно пропорциональна силе тяги. Действительно, при постоянном токе двигателя и магнитном потоке  $\Phi$ , независимом от тока нагрузки  $I$ , производная  $\frac{d\Phi}{dI}$  будет иметь наибольшее предельное

значение ( $\frac{d\Phi}{dI} = \infty$ ). Одновременно при  $I = \text{const}$

будет, очевидно, выполняться условие  $vF = \text{const}$ , если пренебречь изменением к. п. д. двигателя. Таким образом, зависимость  $v$  от  $F$  должна иметь указанный выше гиперболический характер.

На рис. 2 указаны области расположения кривых серийных и сверхсерийных характеристик. Заметим, что увеличение мягкости характеристики вызывает как бы поворот кривой  $v\% = f(i\%)$  вокруг точки часового режима в направлении по часовой стрелки, а кривой  $f\% = f(v\%)$  в направлении против часовой стрелки. Предельным положением первой кривой будет служить вертикальная прямая  $i\% = 100\%$ , а второй — гипербола  $f\%v\% = 100^2$ .

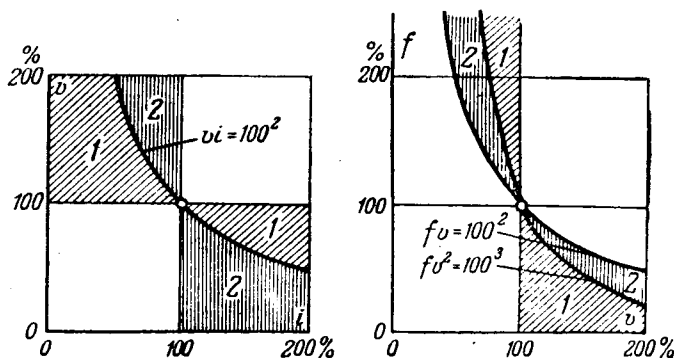


Рис. 2. Области расположения серийных характеристик.

1—серийные характеристики; 2—сверхсерийные.

Приведем теперь для примера частные случаи серийных и сверхсерийных характеристик, предполагая изменение магнитного потока в зависимости от тока двигателя по закону параболы.

**Серийная характеристика.** Положим  $\Phi_{o/o}^2 = 100 i_{o/o}$ , или  $\Phi_{o/o} = 10 i_{o/o}^{0,5}$ . Тогда  $\frac{d\Phi_{o/o}}{di_{o/o}} = \frac{5}{i_{o/o}^{0,5}}$  с увеличением тока  $i_{o/o}$  уменьшается  $\left(\frac{d^2\Phi_{o/o}}{di_{o/o}^2} = -\frac{5}{2i_{o/o}^{1,5}} < 0\right)$ . Нетрудно вывести для этого случая основные соотношения. В результате получим:  $v_{o/o} = \frac{100^{1,5}}{i_{o/o}^{0,5}}$ , или  $v_{o/o} i_{o/o}^{0,5} = 100^{1,5}$  — поллитропу с показателем степени 0,5 у тока;  $f_{o/o} = \frac{i_{o/o}^{1,5}}{10}$  — полукубическую параболу;  $f_{o/o} = \frac{100^4}{v_{o/o}^3}$ , или  $f_{o/o} v_{o/o}^3 = 100^4$  — поллитропу с показателем степени 3 у скорости.

**Сверхсерийная характеристика.** Теперь пусть:  $\Phi_{o/o}^2 = \frac{i_{o/o}^2}{100}$ , тогда  $\frac{d\Phi_{o/o}}{di_{o/o}} = \frac{2i_{o/o}}{100}$  с увеличением тока  $i_{o/o}$  увеличивается  $\left(\frac{d^2\Phi_{o/o}}{di_{o/o}^2} = \frac{1}{50} > 0\right)$ . В результате вывода основных соотношений, получим:  $v_{o/o} = \frac{100^3}{i_{o/o}^2}$ , или  $v_{o/o} i_{o/o}^2 = 100^3$  — поллитропу с показателем степени 2 у тока;  $f_{o/o} = \frac{i_{o/o}^3}{100^2}$  — кубическую параболу;  $f_{o/o} = \frac{100^{2,5}}{v_{o/o}^{1,5}}$ , или  $f_{o/o} \times v_{o/o}^{1,5} = 100^{2,5}$  — поллитропу с показателем степени 1,5 у скорости.

Если теперь построить по полученным зависимостям кривые в логарифмических координатах, то, как известно, получатся прямые линии. Угловые коэффициенты этих прямых будут равны показателям степеней величин, откладываемых по оси абсцисс с соответственным знаком. В табл. 1 приведены их значения для рассмотренных случаев, а также для сверхсерийной характеристики постоянной мощности.

Полученные частные результаты ценны в том отношении, что могут дать ключ к способу простой оценки степени приближения данной характеристики к чисто идеальной серийной, которая принята за эталон. В самом деле, если бы все характеристики имели форму поллитроп или парабол с разными показателями степени, то, найдя угловой коэффициент данной характеристики, построенной в логарифмических координатах, и сравнивая его с коэффициентом идеальной серийной характеристики, можно было бы количественно оценить „мягкость“

одним числом. Удобство такого подхода заключается в том, что задание мягкости характеристики одновременно позволяет судить о форме всей характеристики в целом и дает возможность практически ее воспроизвести.

Характеристики реальных тяговых двигателей, конечно, не имеют формы чистых поллитроп или парабол. Но если оценивать реальные характеристики угловыми коэффициентами поллитроп или парабол, ближе всего совпадающими с ними, то такой метод будет практически удобным, даже если при подборе кривых допустить определенную условность и известную погрешность.

За исходную зависимость для определения „мягкости“ характеристики удобно и естественно взять тяговую, т. е.  $f_{o/o} = f(v_{o/o})$ . Тогда мягкость характеристики можно просто и наглядно оценивать следующей величиной. Обозначим через  $a_m$  абсолютное значение углового коэффициента рассматриваемой характеристики, а через  $a_s$  — то же, но чисто серийной. Мягкость характеристики будем измерять отношением  $a_s$  и  $a_m$  и выражать ее в процентах:

$$\sigma = 100 \frac{a_s}{a_m}. \quad (6)$$

Так как  $a_s = 2$ , то

$$\sigma = \frac{200}{a_m}. \quad (7)$$

Таким образом, получаем для идеальной серийной характеристики  $\sigma = 100\%$ , сверхсерийных  $\sigma > 100\%$ , серийных  $\sigma < 100\%$  и для характеристики постоянной мощности  $\sigma = 200\%$ . В последней графе табл. 1 даны значения  $\sigma$  для рассмотренных ранее частных случаев.

Для того чтобы убедиться в возможности применения изложенного способа к характеристикам реальных двигателей, для ряда выполненных и спроектированных двигателей были построены относительные тяговые характеристики в логарифмических координатах. Часть полученных результатов дана на рис. 3. Как видно, каждая из рассмотренных характеристик с большой точностью сводится к двум прямым, расположенным под некоторым углом друг к другу. Определив угловые коэффициенты этих прямых и по формуле (7) значения мягкости  $\sigma$  обеих частей характеристики и зная ординату точки пересечения прямых, можно тремя цифрами полностью — количественно и качественно — описать рассматриваемую характеристику. Наоборот, зная мягкость верхней и нижней ветвей тяговой характеристики и ординату точки перелома, легко сравнить ее с другими, а также построить ее целиком с большим приближением. Последнее не потребует дополнительных разъяснений, если напомнить, что характеристика в логарифмических координатах обязательно должна проходить через точку часового режима с координатами 2,0; 2,0. Примем следующий порядок расположения цифр: первая по порядку цифра — значение  $\sigma$  верхней ветви тяговой характеристики, вторая — ордината точки перелома, третья цифра — значение  $\sigma$  нижней ветви тяговой характеристики. Цифры

Значения угловых коэффициентов характеристик в логарифмических координатах

Таблица 1

Наименование характеристики	Формула изменения магнитного потока	Зависимости:			Мягкость характеристики $\sigma$
		$v_{o/o} = f(i_{o/o})$	$f_{o/o} = f(i_{o/o})$	$f_{o/o} = f(v_{o/o})$	
Серийная . . . . .	$\Phi_{o/o} = 100 i_{o/o}^{0,5}$	— 0,5	1,5	— 3,0	66,7
Идеальная серийная . . . . .	$\Phi_{o/o} = i_{o/o}$	— 1,0	2,0	— 2,0	100,0
Сверхсерийная . . . . .	$\Phi_{o/o} = \frac{i_{o/o}^2}{100}$	— 2,0	3,0	— 1,5	133,0
С сверхсерийная постоянной мощности . .	$\Phi_{o/o} = f_{o/o} = \frac{100^3}{v_{o/o}}$	— $\infty$	$\infty$	— 1,0	200,0

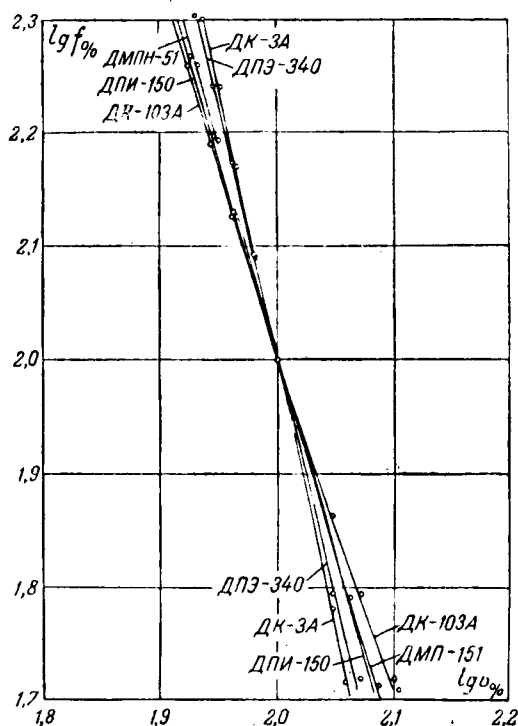


Рис. 3. Тяговые характеристики реальных двигателей (логарифмические координаты).

отделяются друг от друга с помощью тире, а вся группа заключается в квадратные скобки. Например: [63,7—1,89—70,1]. Назовем такую группу цифр, индексом "характеристики". В табл. 2 приведены индексы тяговых характеристик ряда существующих и спроектированных тяговых двигателей. Рис. 4 приведен для пояснения индексации характеристики.

Для общего сравнения характеристик друг с другом желательно оценивать их только одним хотя бы условным числом. По существу, за такое число удобно принять средневзвешенное значение  $\sigma_{cp}$ , исчисленное для определенного раз навсегда зафиксированного диапазона изменения силы тяги. При работе двигателя сила тяги его меняется обычно в пределах приблизительно от 250 до 20% от значения ее при часовом режиме. На диаграмме  $f\% = f(v\%)$  в логарифмических координатах это соответствует приблизительно точкам характеристики с ординатами 2,4 и 1,3. Обозначим ординату точки

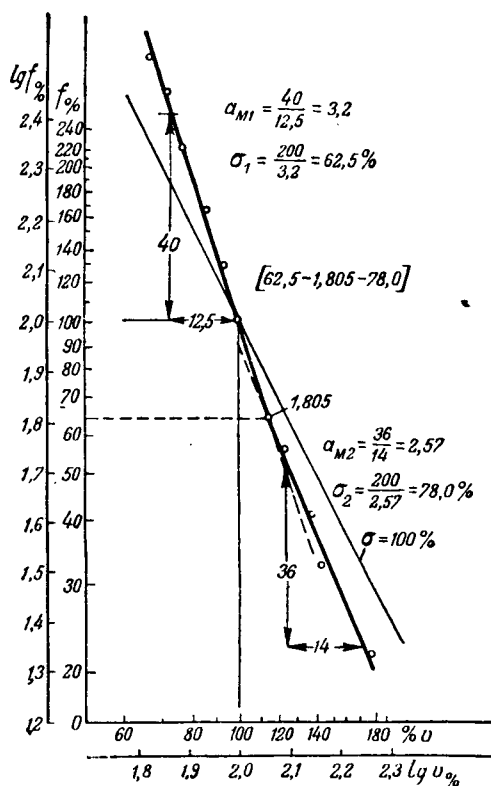


Рис. 4. Пояснение к индексации характеристики.

Е перелома характеристики через  $y$ . Тогда средневзвешенное значение  $\sigma_{cp}$ :

$$\sigma_{cp} = \frac{(2,4 - y) \sigma_1 + (y - 1,3) \sigma_2}{1,1} \% \quad (8)$$

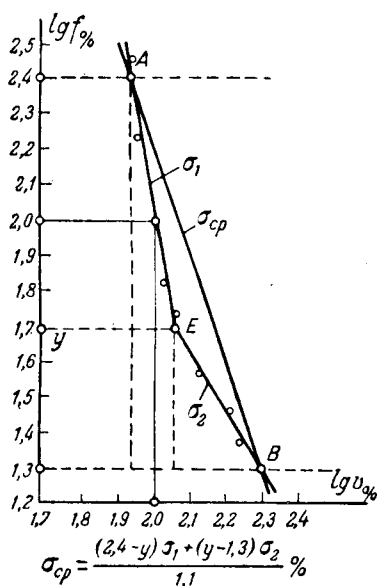
т. е., как нетрудно видеть,  $\sigma_{cp}$  равно мягкости характеристики, соответствующей угловому коэффициенту прямой  $AB$  (рис. 5). Условимся выписывать  $\sigma_{cp}$  справа от индекса характеристики, как это сделано в табл. 2, и впредь под индексом характеристики понимать всю группу из четырех цифр.

Теперь представляется возможным установить дальнейшее подразделение серийных характеристик по величине  $\sigma_{cp}$ . В самом деле, как видно из табл. 2, двига-

Таблица 2

Индексы характеристик тяговых двигателей

Тип двигателя	Завод или фирма	Часовая мощность, кВт	Напряжение, кв	Индекс характеристики
ДПЗ-340	Завод „Динамо“	340	1,5/3,0	[45,1—1,88—50,0] 47,7
ДПЗ-400	„	400	1,5/3,0	[45,5—1,92—48,0] 46,6
ДК-3А	„	450	1,5/3,0	[48,0—1,77—61,6] 53,8
ДК-103А	„	170	1,5/3,0	[56,2—1,92—73,9] 66,2
ДПИ-150	„	170	0,75/1,5	[55,2—1,63—70,6] 59,8
ДМП-151М	„	150	0,75	[52,2—1,90—70,7] 62,3
ПТ-35А	„	40	0,55	[57,0—2,00—57,0] 57,0
ДТИ-60	„	56	0,55	[55,8—1,50—72,7] 58,9
Универсальная характеристика	—	20÷100	до 0,75	[54,5—1,60—66,9] 57,9
Универсальная характеристика	—	100÷250	0,75	[57,0—1,73—64,3] 60,0
Универсальная характеристика	—	250÷550	1,5	[46,5—1,75—58,6] 51,4
Проект для метро 1947 г.	Завод „Динамо“	70	0, 75/0,75	[60,6—1,82—79,5] 69,5
Проект 1947 г.	ЛИИЖТ	220	1,5/3,0	[58,6—1,96—82,0] 72,7
Проект 1947 г.	„	106×2	0,75/3,0	[68,5—1,93—85,0] 77,8
57—1 103, однофазный, 15 гц	АСЭА	350	0,29	[58,0—1,98—85,0] 74,7

Рис. 5. К определению  $\sigma_{cp}$ .

тели нормального исполнения как ДПЭ-340, ДК-ЗА, ДПИ-150, ДМП-151М, ДГИ-60, ПТ-35А и ряд других, на основании которых были также рассчитаны универсальные характеристики, имеют значения  $\sigma_{cp}$ , лежащие в пределах от 45 до 65%. Такие характеристики отнесены к подгруппе нормального насыщения. Характеристики дви-

гателей, для которых  $\sigma_{cp}$  имеет значение свыше 65%, следует отнести к подгруппе малонасыщенных. Едва ли в настоящее время практически потребуется более подробное подразделение характеристик. Таким образом, классификацию серийных характеристик можно изобразить схемой, представленной с помощью табл. 3.

Таблица 3

## Классификация серийных характеристик

Серийные: $\sigma_{cp} = 0 \div 100\%$	Нормального насыщения $\sigma_{cp} = 45 \div 55\%$
	Малого насыщения $\sigma_{cp} = 65 \div 100\%$
Сверхсерийные	$\sigma_{cp} = 100 \div 200\%$

В заключение заметим, что переход от тяговых характеристик к электромеханическим приближенно можно произвести, используя кривую относительного к. п. д.  $\eta' = f(v\%)$ , которую легко получить на основании ряда кривых к. п. д. выполненных двигателей.

## Литература

1. М. Д. Находкин. Наиболее рациональные характеристики для тяговых двигателей моторвагонного подвижного состава. Бюллетень ЦНИИ железнодорожного транспорта, 1947.
2. К. Krauss. Die Charakteristik des Bahnmotors. Wiss. Veröf. Siemens Konzern, 15. Oct. 1925.
3. Pannel. Continuous current Railway Motors. JIEE, 54, 1926.

[23, 12, 1947].



# Построение и применение комплексных схем замещения при сложных несимметричных цепях

Кандидат техн. наук, доц. Н. И. СОКОЛОВ

Московский энергетический институт и.м. Молотова

Разложение на симметричные составляющие, широко применяющееся при расчетах многофазных несимметричных цепей, не только является математическим приемом, облегчающим вычисления, но и облегчает представление физической сущности явлений.

Метод симметричных составляющих, не имея каких-либо принципиальных преимуществ при стационарных цепях, без вращающихся машин, делается почти единственным применимым при анализе несимметричных режимов в системах, содержащих вращающиеся машины. Попытки решений, в последнем случае, путем составления уравнений Кирхгофа встречают очень большие трудности, возникающие вследствие необходимости учета влияния взаимоиндукции между фазами обмоток машин. Достаточно сказать, что из-за влияния вращающегося ротора сопротивления взаимоиндукции между фазами статора от первой фазы ко второй и обратно оказываются различными. При решении по методу симметричных составляющих последнего затруднения не существует; влияние вращающегося ротора учитывается различными по величине сопротивлениями для токов прямой и обратной последовательностей. Сами реактивности имеют простой физический смысл и легко определяются экспериментально.

В многофазных цепях местные несимметрии, однократные или многократные, вызывают появление напряжений и токов обратной и нулевой последовательностей; наличие же элементов, имеющих неодинаковые сопротивления для токов различных последовательностей, указывает на то, что наиболее удобным способом решения было бы отдельное рассмотрение схем для токов всех последовательностей или же построение комплексных схем, аналогичных общеизвестным схемам, применяемым в расчетах токов короткого замыкания.

Широко известно применение комплексных схем при расчетах токов к. з. для случаев однофазного, двухфазного и трехфазного замыкания

*Излагаются способы построения и использования комплексных схем замещения для несимметричных трехфазных цепей в применении к расчетам токов короткого замыкания при сложных повреждениях в электрических системах.*

на землю, а также при обрывах одной или двух фаз [Л. 1—2]. Значительно меньшее распространение получили схемы для

других случаев местной несимметрии, включая и многократные местные несимметрии. Высказывались мнения, что для решения таких схем необходимы специально приспособленные расчетные модели переменного тока. Однако, комплексные схемы, составленные из соответствующим образом соединенных между собой схем прямой, обратной и нулевой последовательностей, оказываются полезными в сложных случаях, облегчая возможность устанавливать влияние отдельных параметров на величины токов и напряжений, строить векторные диаграммы и т. п. Больше того, само решение комплексных схем, как будет показано ниже, не представляет серьезных затруднений.

Построение комплексной схемы может быть сделано для любого, сколь угодно сложного случая, однократного или многократного, короткого замыкания и для всех случаев местной несимметрии. Всякий вид сложной несимметрии можно разложить на несколько простых видов, для которых известны схемы замещения и тогда комплексная схема для сложного случая может быть составлена из известных элементарных схем.

Комплексные схемы можно разбить на два вида:

1) Схемы, в которых объединены только эквипотенциальные точки. Напряжение любой последовательности в каждой точке может быть определено замером или расчетом относительно общего нуля всей комплексной схемы (как-то: комплексные схемы для двухфазного к. з. и двухфазного к. з. на землю).

2) Схемы, которые строго справедливы только для токов, в то время как напряжения в них могут быть определены только относительно нулевой шины схемы своей последовательности; объединение же схем отдельных последовательностей представляется возможным лишь путем искусственного смещения потенциалов всех точек

отдельных схем на одну и ту же величину (как, например, в комплексной схеме однополюсного к. з. на землю) [Л. 2].

Неограниченно можно объединять схемы только первого вида. Соединение двух или более схем второго вида не может быть произведено, так как наличие смещения потенциалов, в общем случае различного для отдельных простых схем, неизбежно вызовет появление в объединенной комплексной схеме токов, которых на самом деле не должно быть. При объединении схем только первого вида полная комплексная схема также будет принадлежать к первому виду.

Если в общей схеме будет участвовать элементарная комплексная схема второго вида, то общая схема также будет относиться ко второму виду. Необходимо отметить, что любую схему второго вида можно превратить в схему первого вида, введя промежуточные идеальные трансформаторы, не имеющие рассеяния и намагничивающего тока.

**Общий вид комплексной схемы для любого случая несимметрии в одном месте.** Комплексная схема при любой местной несимметрии может быть получена, если трехфазное несимметричное сопротивление разложить на симметричные составляющие.

Падение напряжения всех последовательностей для фазы  $a$  в несимметричном элементе, составленном из трех сопротивлений, связанных между собой взаимной индукцией, выражаются через токи и составляющие сопротивлений посредством системы уравнений [Л. 1, стр. 66]:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{a0} &= (\dot{Z}_{aa0} + 2\dot{Z}_{ab0}) i_{a0} + (\dot{Z}_{aa2} - a\dot{Z}_{ab2}) i_{a1} + \\ &\quad + (\dot{Z}_{aa1} - a^2\dot{Z}_{ab1}) i_{a2}; \\ \Delta \dot{U}_{a1} &= (\dot{Z}_{aa1} - a^2\dot{Z}_{ab1}) i_{a0} + (\dot{Z}_{aa0} - \dot{Z}_{ab0}) i_{a1} + \\ &\quad + (\dot{Z}_{aa2} + 2a\dot{Z}_{ab2}) i_{a2}; \\ \Delta \dot{U}_{a2} &= (\dot{Z}_{aa2} - a\dot{Z}_{ab2}) i_{a0} + (\dot{Z}_{aa1} + 2a^2\dot{Z}_{ab1}) i_{a1} + \\ &\quad + (\dot{Z}_{aa0} - \dot{Z}_{ab0}) i_{a2};\end{aligned}\quad (1)$$

здесь

$$\left. \begin{aligned}\dot{Z}_{aa0} &= \frac{1}{3} (\dot{Z}_{aa} + \dot{Z}_{bb} + \dot{Z}_{cc}); \\ \dot{Z}_{aa1} &= \frac{1}{3} (\dot{Z}_{aa} + a\dot{Z}_{bb} + a^2\dot{Z}_{cc}); \\ \dot{Z}_{aa2} &= \frac{1}{3} (\dot{Z}_{aa} + a^2\dot{Z}_{bb} + a\dot{Z}_{cc}); \\ \dot{Z}_{ab0} &= \frac{1}{3} (\dot{Z}_{ab} + \dot{Z}_{bc} + \dot{Z}_{ac}); \\ \dot{Z}_{ab1} &= \frac{1}{3} (\dot{Z}_{ab} + a\dot{Z}_{bc} + a^2\dot{Z}_{ac}); \\ \dot{Z}_{ab2} &= \frac{1}{3} (\dot{Z}_{ab} + a^2\dot{Z}_{bc} + a\dot{Z}_{ac});\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

где  $\dot{Z}_{aa}$ ;  $\dot{Z}_{bb}$ ;  $\dot{Z}_{cc}$ ;  $\dot{Z}_{ab}$ ;  $\dot{Z}_{ac}$  и т. д. — сопротивления несимметричного элемента.

В уравнениях (1) составляющие напряжений связываются с составляющими токов линейным

образом. Следовательно, эти уравнения могут быть записаны в следующей форме:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{U}_{a0} &= \dot{Z}_{00} i_{a0} + \dot{Z}_{01} i_{a1} + \dot{Z}_{02} i_{a2}; \\ \Delta \dot{U}_{a1} &= \dot{Z}_{10} i_{a0} + \dot{Z}_{11} i_{a1} + \dot{Z}_{12} i_{a2}; \\ \Delta \dot{U}_{a2} &= \dot{Z}_{20} i_{a0} + \dot{Z}_{21} i_{a1} + \dot{Z}_{22} i_{a2};\end{aligned}\quad (3)$$

коэффициенты при токах в уравнениях (1) и (2) соответственно равны. Рассматривая уравнения (3), мы видим, что они аналогичны уравнениям падений напряжений при протекании токов  $i_{a0}$ ,  $i_{a1}$ ,  $i_{a2}$  через три сопротивления, имеющих кажущиеся сопротивления самоиндукции  $\dot{Z}_{00}$ ,  $\dot{Z}_{11}$ ,  $\dot{Z}_{22}$  и взаимной индукции  $\dot{Z}_{01}$ ,  $\dot{Z}_{02}$ ,  $\dot{Z}_{12}$ ,  $\dot{Z}_{20}$  и т. д.

Отсюда можно сделать важное заключение. Если в симметричной трехфазной сети имеется несимметричный трехфазный элемент, то, разложив сопротивление последнего на системы симметричных составляющих, можно составить три отдельных схемы — прямой, обратной и нулевой последовательности, введя вместо несимметричного сопротивления в каждую схему собственные сопротивления своей последовательности ( $\dot{Z}_{00}$ ,  $\dot{Z}_{11}$ ,  $\dot{Z}_{22}$ ) и связав схемы между собой через сопротивления взаимной индукции  $\dot{Z}_{01}$ ,  $\dot{Z}_{02}$ ,  $\dot{Z}_{10}$ ,  $\dot{Z}_{20}$ ,  $\dot{Z}_{12}$ ,  $\dot{Z}_{21}$ . Токи, протекающие в каждом элементе каждой из схем, будут соответствовать токам прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Сопротивления в выражениях (3) не являются обычно применяемыми сопротивлениями для токов прямой, обратной и нулевой последовательности, а получаются в результате разложения исходных сопротивлений на симметричные составляющие по формулам (2). Все симметричные трехфазные элементы должны быть введены в схемы соответствующими сопротивлениями для токов прямой, обратной и нулевой последовательностей. При местных несимметриях в разных точках следует разложить отдельно каждое сопротивление и связать схемы в точках местной несимметрии сопротивлениями взаимной индукции. Само определение токов возможно из уравнений Кирхгофа.

В общем случае при разложении коэффициенты взаимной индукции могут быть комплексными, попарно сопряженными. Последнее обстоятельство указывает на то, что токи в схемах разных последовательностей должны быть повернуты на определенный угол (обычно на  $\pm 120^\circ$ ).

Указанный прием, давая возможность составить комплексную схему для любого случая, может быть значительно упрощен для большинства частных случаев, где можно составить более простые комплексные схемы. Полученную схему трех взаимно связанных сопротивлений возможно за-

менить схемой, в которой связи между отдельными последовательностями осуществляются через промежуточные идеальные трансформаторы (с коэффициентом трансформации равным единице), поворачивающими, в общем случае, фазы тока и напряжения на необходимый угол.

В табл. 1 даны схемы разложения для некоторых несимметричных сопротивлений по уравнениям (2).

**Комплексные схемы для простейших случаев.** Как уже указывалось, выше способ разложения несимметричного сопротивления на составляющие, являясь универсальным, не всегда удобен в практических расчетах. Удобно пользоваться готовыми комплексными схемами для простейших случаев несимметрии. Объединяя эти простейшие комплексные схемы, можно получить схемы для сложных или многократных видов несимметрии. Комплексные схемы для простых случаев, приведенные в табл. 2, как легко можно убедиться, имеют для несимметричного элемента одинаковые собственные сопротивления и сопротивления взаимной индукции, как и в исходной матрице табл. 1.

В качестве примера рассмотрим случай включения сопротивления лишь в одну фазу участка цепи.

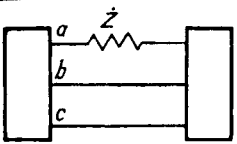
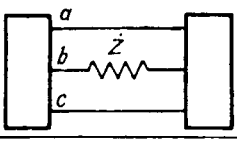
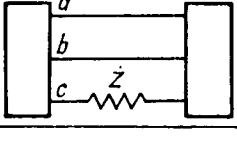
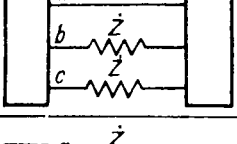
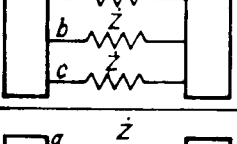
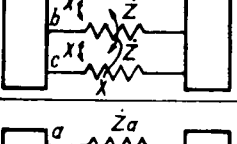
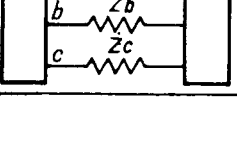
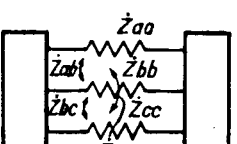
Предполагаем сопротивление  $Z$  включенным в фазу  $a$ . Для этой же фазы  $a$  строим комплексную схему. Из табл. 1  $a$  имеем матрицу, составленную из коэффициентов:

	0	1	2
0	$\dot{Z}$	$\dot{Z}$	$\dot{Z}$
$\frac{1}{3}$ 1	$\dot{Z}$	$\dot{Z}$	$\dot{Z}$
2	$\dot{Z}$	$\dot{Z}$	$\dot{Z}$

Этой матрице будет соответствовать схема, изображенная в табл. 2 (схема  $a$ , первого вида). Очевидно, что схема второго вида будет состоять из схем всех трех последовательностей, связанных между собой общим сопротивлением  $\frac{\dot{Z}}{3}$ .

При многократных несимметриях комплексная схема, как и в простейших случаях, строится для одной фазы, условно называемой фазой  $a$ . Однако, при многократной несимметрии не всегда представляется возможным выбрать за исходную такую фазу, которая позволила бы применить обычные простейшие схемы. Например, при обрыве одной фазы и замыкании на землю другой, удобно было бы для первого повреждения принять за начальную — оборванную фазу, для второго повреждения — фазу, замкнувшуюся

Таблица 1  
Коэффициент разложения на симметричные составляющие несимметричных сопротивлений

	0	1	2
а) 	0 $\frac{1}{3}\dot{Z}$	1 $\frac{1}{3}\dot{Z}$	2 $\frac{1}{3}\dot{Z}$
б) 	0 $\frac{1}{3}\dot{Z}$	1 $\frac{1}{3}a^2\dot{Z}$	2 $\frac{1}{3}a\dot{Z}$
в) 	0 $\frac{1}{3}\dot{Z}$	1 $\frac{1}{3}a\dot{Z}$	2 $\frac{1}{3}a^2\dot{Z}$
г) 	0 $\frac{2}{3}\dot{Z}$	1 $-\frac{1}{3}\dot{Z}$	2 $-\frac{1}{3}\dot{Z}$
д) 	0 $\dot{Z}$	1 $\dot{Z}$	2 $\dot{Z}$
е) 	0 $\dot{Z} + 2X$	1 $\dot{Z} - X$	2 $\dot{Z} - X$
ж) 	0 $\frac{1}{3}(\dot{Z}_a + \dot{Z}_b + \dot{Z}_c)$	1 $\frac{1}{3}(\dot{Z}_a + a^2\dot{Z}_b + a\dot{Z}_c)$	2 $\frac{1}{3}(\dot{Z}_a + a\dot{Z}_b + a^2\dot{Z}_c)$
з) 	0 $\frac{1}{3}(\dot{Z}_{aa} + \dot{Z}_{bb} + \dot{Z}_{cc})$	1 $\frac{1}{3}(\dot{Z}_{aa} + a^2\dot{Z}_{bb} + a\dot{Z}_{cc})$	2 $\frac{1}{3}(\dot{Z}_{aa} + a\dot{Z}_{bb} + a^2\dot{Z}_{cc})$

**Примечание.** Разложение справедливо только при условии неизменности детерминанта, составленного из коэффициентов исходных уравнений и уравнений после разложения на симметричные составляющие. Этому условию удовлетворяют случаи  $a$ — $ж$ . Для общего случая разложения это условие не всегда выполняется, и необходимо производить проверку.

на землю. Появляется необходимость строить комплексные схемы для простых повреждений, но когда повреждения расположены произвольно относительно начальной фазы. Комплексная схема для случая, когда одно сопротивление включено в другую фазу нежели та, для которой строится схема, представлена в табл. 2



Схема замещения для простейших случаев несимметрии.

Таблица 2

	Схемы 1-го вида	Схемы 2-го вида

Примечание. Простейшие схемы приведены только для некоторых случаев. Схемы для остальных случаев легко могут быть построены на основании приведенных схем.

(схема б). Отличие этой схемы от схемы а заключается только в том, что введенные в схему трансформаторы не только изолируют друг от друга отдельные последовательности, но и поворачивают на заданный угол фазы токов и напря-

жений. Можно считать, что эти трансформаторы обладают коэффициентом трансформации, выраженным комплексным числом с модулем, равным единице.

Рассмотренный выше способ построения ком-

плексной схемы при последовательно включенном сопротивлении остается справедливым и тогда, когда сопротивление равно бесконечности (т. е. фаза оборвана).

Практически удобно вводить промежуточные трансформаторы не между схемами отдельных последовательностей, а между схемами каждой последовательности и специальной связывающей частью. Там, где необходим поворот фаз тока и напряжения, промежуточным трансформаторам задаются поворотные множители так, чтобы токи и напряжения в связывающей части соответствовали токам и напряжениям той фазы, для которой возможна схема замещения без применения поворотных множителей (табл. 2, схема б).

**Комплексные схемы для сложных случаев.** При сложной несимметрии в одной точке или при многократной несимметрии схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей связываются друг с другом столько раз, сколько имеется простейших случаев несимметрии и в тех точках, где есть несимметрия. Связь между схемами прямой, обратной и нулевой последовательностями появляется только при наличии несимметричных элементов или повреждений, например, обрывы одной или двух фаз, несимметричное к. з.

Токи могут быть получены после совместного решения уравнений Кирхгофа, составленных для комплексной схемы.

Если в рассматриваемой исходной схеме имеются трансформаторы с группами соединений отличающимися от двенадцатой, то и в комплексных схемах замещения должны быть введены дополнительные промежуточные поворачивающие на соответствующий угол трансформаторы.

В схеме прямой последовательности поворотный множитель, считая со стороны высшего

напряжения исходной схемы, будет  $e^{j\frac{\pi}{6}(12-n)}$ .

В схеме обратной последовательности  $e^{-j\frac{\pi}{6}(12-n)}$ , где  $n$  — группа соединений трансформатора.

Обрыв одной фазы с замыканием оборванного конца на землю. Рассмотрим обрыв на линии, связывающей между собой две части системы (рис. 1).

Строим комплексную схему для поврежденной фазы. Между схемами последовательностей вводятся две связывающих части: первая по месту обрыва, вторая по месту короткого замыкания. Первая связывающая часть обеспечивает условие равенства падений напряжений между собой по месту обрыва и равенство суммы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей нулю, вторая — равенства нулю суммы напряжений всех последовательностей по месту к. з. и равенство между собой токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в ответвлении к. з. Для разрешения полученной комплексной схемы достаточно задаться тремя независимыми

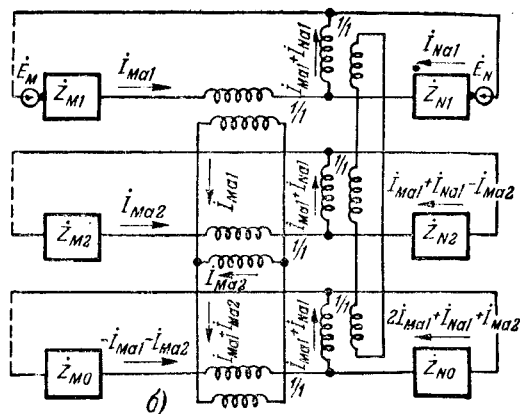
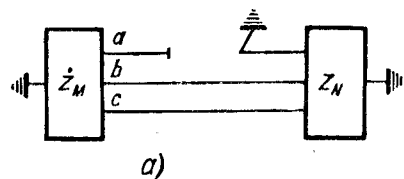


Рис. 1. Обрыв и замыкание на землю фазы а.

тока, а следовательно, необходимо составить и решить систему из трех уравнений.

Составим уравнения Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_N - i_{Na1} \dot{Z}_{N1} + [-(i_{Ma1} + i_{Na1} - i_{Ma2}) \dot{Z}_{N2}] + \\ + [-(2i_{Ma1} + i_{Na1} + i_{Ma2}) \dot{Z}_{N0}] = 0; \\ [i_{Ma1} \dot{Z}_{M1} - \dot{E}_M + \dot{E}_N - i_{Na1} \dot{Z}_{N1}] = \\ = [i_{Ma2} \dot{Z}_{M2} - (i_{Ma1} + i_{Na1} - i_{Ma2}) \dot{Z}_{N2}]; \\ [i_{Ma2} \dot{Z}_{M2} - (i_{Ma1} + i_{Na1} - i_{Ma2}) \dot{Z}_{N2}] = \\ = [(-i_{Ma1} - i_{Ma2}) \dot{Z}_{N0} - \\ - (2i_{Ma1} + i_{Na1} + i_{Ma2}) \dot{Z}_{N0}]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Преобразуя уравнения, будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} i_{Ma1} (\dot{Z}_{N2} + 2\dot{Z}_{N0}) + i_{Na1} (\dot{Z}_{N1} + \dot{Z}_{N2} + \dot{Z}_{N0}) + \\ + i_{Ma2} (\dot{Z}_{N0} - \dot{Z}_{N2}) = \dot{E}_N; \\ i_{Ma1} (\dot{Z}_{M1} + \dot{Z}_{N2}) + i_{Na1} (\dot{Z}_{N2} - \dot{Z}_{N1}) - \\ - i_{Ma2} (\dot{Z}_{N2} + \dot{Z}_{M2}) = \dot{E}_M - \dot{E}_N; \\ i_{Ma1} (\dot{Z}_{N2} - \dot{Z}_{M0} - 2\dot{Z}_{N0}) + i_{Na1} (\dot{Z}_{N2} - \dot{Z}_{N0}) - \\ - i_{Ma2} (\dot{Z}_{M2} + \dot{Z}_{N2} + \dot{Z}_{M0} + \dot{Z}_{N0}) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Определив токи  $i_{Ma1}$ ,  $i_{Ma2}$ ,  $i_{Na1}$ , можно определить токи и напряжения в любом месте комплексной схемы замещения.

Обрыв фазы а, замыкание на землю фазы б (рис. 2). Комплексная схема может быть построена как для оборванной фазы, так и для замкнутой на землю.

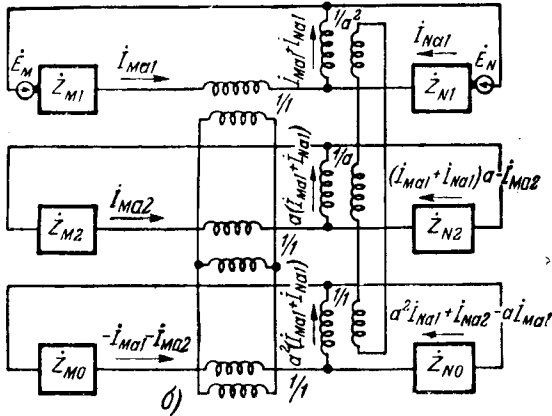
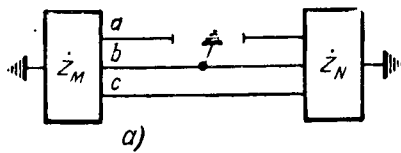


Рис. 2. Обрыв фазы *a*, замыкание на землю фазы *b*.

Составим комплексную схему для оборванной фазы. Связывающая часть по месту к. з. имеет поворачивающие трансформаторы с коэффициентами трансформации  $1/a^2$ ;  $1/a$ ;  $1/1$  так, чтобы связывающий контур соответствовал бы фазе *b*. Здесь мы также получим три уравнения с тремя неизвестными. Сами уравнения похожи на уравнения предыдущего случая:

$$\left. \begin{aligned} i_{Ma1}(\dot{Z}_{N2} - a^2 \dot{Z}_{N0}) + i_{Na1}(\dot{Z}_{N1} + \dot{Z}_{N2} + \dot{Z}_{N0}) + \\ + i_{Ma2}(a \dot{Z}_{N0} - a^3 \dot{Z}_{N2}) &= \dot{E}_N; \\ i_{Ma1}(\dot{Z}_{M1} + a \dot{Z}_{N2}) + i_{Na1}(a \dot{Z}_{N2} - \dot{Z}_{N1}) - \\ - i_{Ma2}(\dot{Z}_{M2} + \dot{Z}_{N2}) &= \dot{E}_M - \dot{E}_N; \\ i_{Ma1}(a \dot{Z}_{N2} + a \dot{Z}_{N0} - \dot{Z}_{M0}) + \\ + i_{Na1}(a \dot{Z}_{N2} - a^2 \dot{Z}_{N0}) - \\ - i_{Ma2}(\dot{Z}_{M2} + \dot{Z}_{M0} + \dot{Z}_{N0} + \dot{Z}_{N2}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

И в данном случае численное решение не представляет значительных трудностей.

Двухфазное к. з. за трансформатором при обрыве одной фазы на первичной стороне (рис. 3). Наличие трансформатора, имеющего одиннадцатую группу соединений, вызывает необходимость введения в комплексной схеме дополнительных трансформаторов, поворачивающих фазы тока и напряжения в схеме прямой последовательности на  $30^\circ$  против часовой стрелки относительно векторов тока и напряжения высокой стороны и на  $30^\circ$  по часовой стрелке для обратной последовательности. Часть *A* представляет элементарную комплексную схему для обрыва фазы *a*. Часть *B* дает участки схем прямой и обратной последовательности между трансформатором и местом к. з. также для

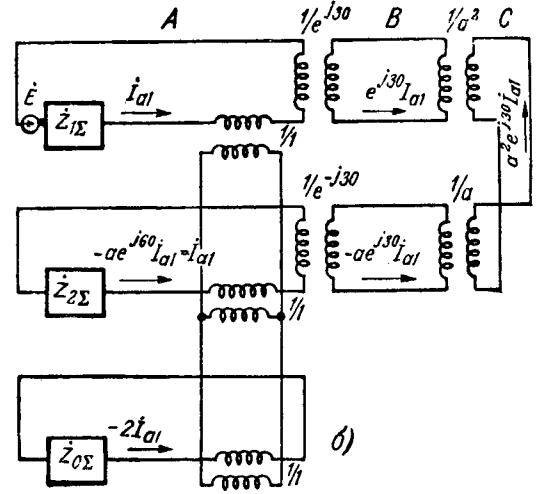
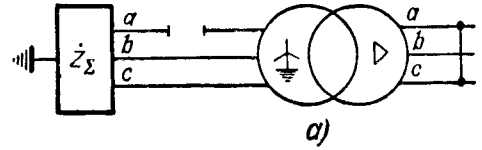


Рис. 3. Обрыв фазы *a* на стороне звезды трансформатора, замыкание между собой фаз *a* и *c* на стороне треугольника.

фазы *a*. Часть *C* является комплексной схемой двухполюсного к. з. для случая, когда к. з. происходит между фазами *a* и *c*, а схема составляется для фазы *a*. За неизвестный ток примем ток прямой последовательности в фазе *a* линии. Токи во всех ветвях легко выражаются через один неизвестный ток. Уравнения Кирхгофа имеют вид.

$$\left. \begin{aligned} (\dot{E} - i_{a1} \dot{Z}_{1\Sigma} - 2i_{a1} \dot{Z}_{0\Sigma}) e^{j30} a^2 &= \\ = (-i_{a1} \dot{Z}_{2\Sigma} - 2i_{a1} \dot{Z}_{0\Sigma}) e^{-j30} a; \\ \dot{E} - i_{a1} \dot{Z}_{1\Sigma} - 2i_{a1} \dot{Z}_{0\Sigma} &= i_{a1} \dot{Z}_{2\Sigma} + 2i_{a1} \dot{Z}_{0\Sigma} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь левая часть — напряжение прямой последовательности на связывающей части *C*, правая часть — то же обратной последовательности. Решая уравнение относительно тока  $i_{a1}$  будем иметь:

$$i_{a1} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_{1\Sigma} + \dot{Z}_{2\Sigma} + 4\dot{Z}_{0\Sigma}}. \quad (8)$$

Зная  $i_{a1}$ , легко получить все остальные токи и напряжения.

Три неравные сопротивления включены в звезду с нулевым проводом. Комплексная схема может быть составлена или путем разложения несимметричного сопротивления на симметричные составляющие, причем схемы разных последовательностей связываются между собой сопротивлениями взаимной индукции, имеющими конечную величину (рис. 4б), или же путем разбивки трехфазного несимметричного сопротивления на три однофазных, для каждого

из которых и составляется своя элементарная комплексная схема. Конечно, в обоих случаях вся остальная сеть предполагается симметричной и может быть выражена через свои, в общем случае неравные, сопротивления прямой  $\dot{Z}_{1\Sigma}$ , обратной  $\dot{Z}_{2\Sigma}$  и нулевой  $\dot{Z}_{0\Sigma}$  последовательности.

Задачу можно еще несколько упростить, если рассматривать трехфазное сопротивление как сумму нескольких последовательно включенных сопротивлений: первое — трехфазное симметричное  $\dot{Z}_c$ , второе — включенное в фазу  $a$  ( $\dot{Z}_a - \dot{Z}_c$ ) и третье — включенное в фазу  $b$  ( $\dot{Z}_b - \dot{Z}_c$ ) (рис. 4, в).

Первое сопротивление, являющееся симметричным трехфазным, войдет в схему каждой последовательности полной своей величиной; для однофазных же сопротивлений строятся элементарные комплексные схемы. Достаточно принять три независимых тока  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$ ,  $I_{a0}$ ; токи в остальных ветвях легко выражаются через них. Для определения токов необходимо составить три уравнения.

Проверкой можно убедиться, что полученная система уравнений аналогична уравнениям, получаемым при разложении трехфазного несимметричного сопротивления на системы симметричных составляющих.

С увеличением числа мест несимметрии решения комплексных схем, естественно, делаются более громоздкими, но почти все встречающиеся в практике случаи приводят к совместному решению не более трех уравнений с тремя неизвестными. Изложенный путь решения является более простым и наглядным, чем ряд применяемых других приемов и, в частности, использование компандных тензоров [Л. 5].

Большинство комплексных схем, даже таких, в которых участвуют поворачивающие трансформаторы, могут быть решены на моделях постоянного тока. Однако, этот вопрос выходит за рамки настоящей статьи и может явиться темой самостоятельной работы.

Автором получен от С. А. Ульянова ряд ценных указаний, использованных в настоящей работе.

**Примерный расчет.** Рассмотрим двухстороннее отключение одной фазы линии при коротком замыкании отключающейся фазы на землю. На отпайке от линии включен трансформатор с заземленной нейтралью (рис. 5, а).

Настоящий случай можно рассматривать как два обрыва на одной фазе в разных точках и однофазное к. з. на землю. Для одного обрыва и короткого замыкания применяем схемы первого вида, для другого обрыва — второго вида.

Численные значения параметров исходной схемы в относительных единицах:

$$\dot{E}_M = j2; \dot{E}_N = j1; \dot{Z}_{M1} = j2; Z_{N1} = j1; Z_{M2} = Z_{N2} = j1; \\ \dot{Z}_{M0} = \dot{Z}_{N0} = j1; X_T = 0,4.$$

Линии входят соответствующими величинами в сопротивления частей систем.

Схема замещения представлена на рис. 5, б. Произвольно намечаем три тока. Токи во всех остальных ветвях легко выражаются через три принятых.

Составляем три уравнения. Первое уравнение получаем, приравнявая разность напряжений на трансфор-

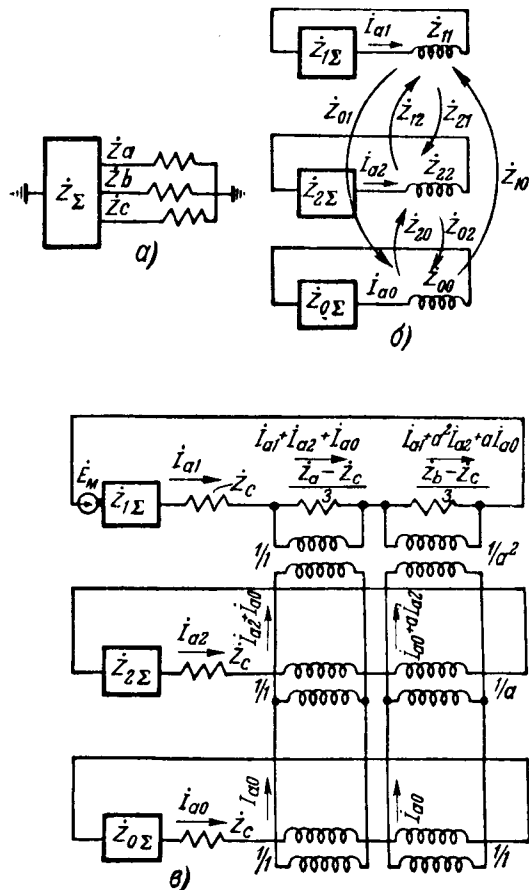


Рис. 4. Три неравных сопротивления, включенные в звезду с нулевым проводом.

а — исходная схема; б — общий способ разложения; в — раздельное разложение сопротивлений на симметричные составляющие.

маторе 5—6, разности напряжений на трансформаторе 22—23, т. е.  $\dot{U}_{5-6} = \dot{U}_{22-23}$ .

Второе уравнение вытекает из равенства  $\dot{U}_{13-14} = \dot{U}_{22-23}$ .

Третье уравнение — из равенства  $\dot{U}_{8-4} + \dot{U}_{16-12} + \dot{U}_{25-19} = 0$ .

Соответствующие разности напряжений получим, исходя по контурам:

- 1)  $U_{5-6} = 5, 3, 19, 21, 26, 17, 18, 2, 1, 8, 7, 6;$
- 2)  $U_{22-23} = 22, 21, 26, 24, 23;$
- 3)  $\dot{U}_{13-14} = 13, 11, 19, 21, 26, 17, 18, 10, 9, 15, 14;$
- 4)  $\dot{U}_{8-4} = 8, 1, 2, 18, 17, 26, 21, 19, 3, 4;$
- 5)  $\dot{U}_{16-12} = 16, 9, 10, 18, 17, 26, 21, 19, 11, 12;$
- 6)  $\dot{U}_{25-19} = 25, 23, 21, 19.$

$$3 \dot{I}_{ka1} \cdot jX_T + (\dot{I}_{Ma1} + \dot{I}_{Ma2}) \dot{Z}_{M0} + \dot{I}_{Ma1} \dot{Z}_{M1} - \dot{E}_M + \dot{E}_N - \\ - (\dot{I}_{ka1} - \dot{I}_{Ma1}) \dot{Z}_{N1} = 3 \dot{I}_{ka1} jX_T - \\ - (\dot{I}_{Ma1} + \dot{I}_{Ma2} - 2 \dot{I}_{ka1}) \dot{Z}_{N0}; \\ 3 \dot{I}_{ka1} \cdot jX_T + (\dot{I}_{Ma1} + \dot{I}_{Ma2}) \dot{Z}_{M0} + \dot{I}_{Ma2} \dot{Z}_{M2} - \\ - (\dot{I}_{ka1} - \dot{I}_{Ma2}) \cdot \dot{Z}_{N2} = 3 \dot{I}_{ka1} \cdot jX_T - \\ - (\dot{I}_{Ma1} + \dot{I}_{Ma2} - 2 \dot{I}_{ka1}) \dot{Z}_{N0};$$

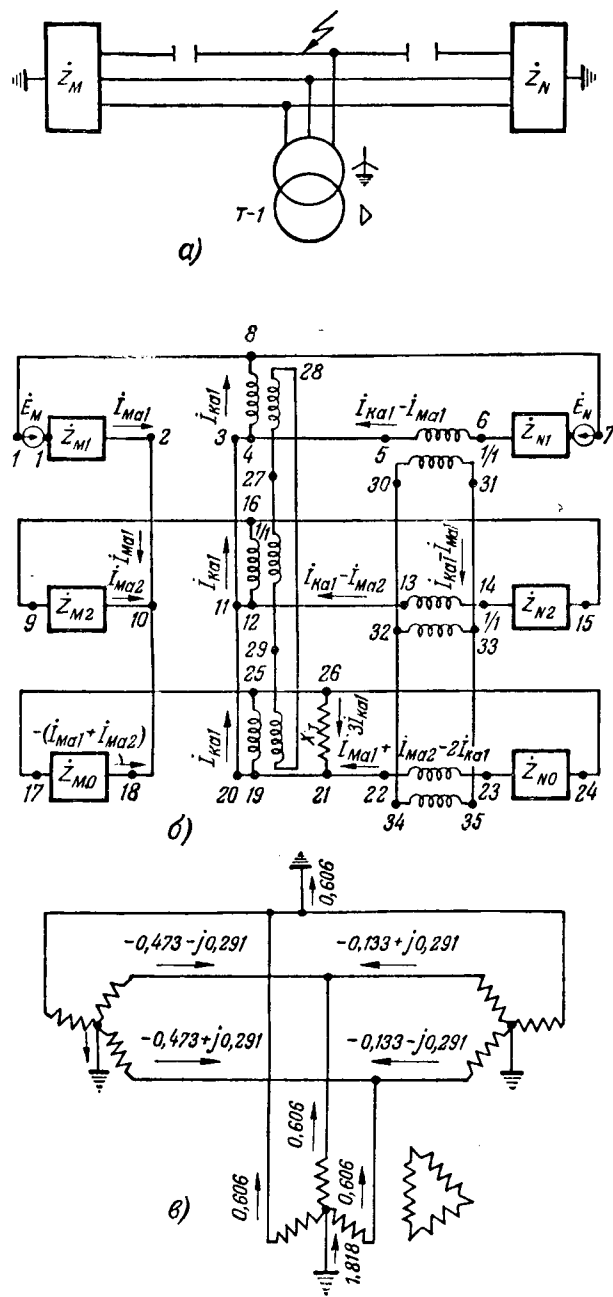


Рис. 5. Однофазное к. з. на землю на отключенном с двух сторон проводе трехфазной линии при трансформаторе, включенном к отпайке.

а — исходная схема; б — комплексная схема; в — токораспределение в трехфазной схеме.

$$[\dot{E}_M - \dot{I}_{Ma1} \cdot \dot{Z}_{M1} - (\dot{I}_{Ma1} + \dot{I}_{Ma2}) \dot{Z}_{M0} - 3 \dot{I}_{ka1} j X_T] + \\ + [-\dot{I}_{Ma2} \cdot \dot{Z}_{M2} - (\dot{I}_{Ma1} + \dot{I}_{Ma2}) \dot{Z}_{M0} - 3 \dot{I}_{ka1} j X_T] - \\ - 3 \dot{I}_{ka1} j X_T = 0.$$

Упрощая, будем иметь:

$$\dot{E}_M - \dot{E}_N - \dot{I}_{Ma1} (\dot{Z}_{M1} + \dot{Z}_{N1} + \dot{Z}_{M0} + \dot{Z}_{N0}) - \\ - \dot{I}_{Ma2} (\dot{Z}_{M0} + \dot{Z}_{N0}) + \dot{I}_{ka1} (2 \dot{Z}_{N0} + \dot{Z}_{N1}) = 0; \\ - \dot{I}_{Ma1} (\dot{Z}_{M0} + \dot{Z}_{N0}) - \dot{I}_{Ma2} (\dot{Z}_{M2} + \dot{Z}_{N2} + \dot{Z}_{M0} + \dot{Z}_{N0}) + \\ + \dot{I}_{ka1} (2 \dot{Z}_{N0} + \dot{Z}_{N2}) = 0; \\ \dot{E}_M - \dot{I}_{Ma1} (\dot{Z}_{M1} + 2 \dot{Z}_{M0}) - \dot{I}_{Ma2} (\dot{Z}_{M2} + 2 \dot{Z}_{M0}) - \\ - \dot{I}_{ka1} \cdot 9 \cdot j X_T = 0.$$

Подставляем численные значения:

$$5 \dot{I}_{Ma1} + 2 \dot{I}_{Ma2} - 3 \dot{I}_{ka1} = 1; \\ 2 \dot{I}_{Ma1} + 4 \dot{I}_{Ma2} - 3 \dot{I}_{ka1} = 0; \\ 4 \dot{I}_{Ma1} + 3 \dot{I}_{Ma2} + 3,6 \dot{I}_{ka1} = 2.$$

Решая уравнения, будем иметь:

$$\dot{I}_{Ma1} = 0,326; \dot{I}_{Ma2} = -0,011; \dot{I}_{ka1} = 0,202.$$

Полный ток к. з.  $\dot{I}_{ka} = 3 \dot{I}_{ka1} = 0,606$ .

Ток через нейтраль трансформатора T-1:  $\dot{I}_3 = 3 \cdot 3 \dot{I}_{ka1} = +j1,818$ .

Ток фазы b от системы Z<sub>M</sub>:

$$\dot{I}_{Mb} = 0,326 \cdot a^2 - 0,011 \cdot a - 0,315 = -0,473 - j0,291.$$

Ток фазы C от системы Z<sub>M</sub>:

$$\dot{I}_{Mc} = 0,326 \cdot a - 0,011 \cdot a^2 - 0,315 = -0,473 + j0,291.$$

Ток фазы b от системы Z<sub>N</sub>:

$$\dot{I}_{Nb} = -0,124 \cdot a^2 + 0,224 \cdot a - 0,089 = -0,133 + j0,291.$$

Ток фазы C от системы Z<sub>N</sub>:

$$\dot{I}_{Nc} = -0,133 - j0,291.$$

#### Литература

1. Н. Н. Щедрин. Токи короткого замыкания высоковольтных систем. 1935.
2. С. А. Ульянов. Короткие замыкания в электрических системах. Госэнергоиздат, 1949.
3. О. М. Богатырев и А. Б. Чернин. Метод расчета токов короткого замыкания при одновременном обрыве проводов. Электрические станции, № 2, 1941.
4. Н. Ф. Марголин. Токи в земле. Госэнергоиздат, 1947.
5. G. Kron. Tensor Analysis of Networks. 1939.
6. Н. Н. Щедрин. К теории сложных несимметричных режимов электрических систем. Электричество, № 5, 1946.
7. Б. И. Розенберг. Анализ явлений при работе линий электропередач с отключенной фазой. Материалы по ОАПВ. Госэнергоиздат, 1946.

# К методу расчета сложных несимметричных режимов

Кандидат техн. наук Г. Т. АДОНЦ

Энергетический институт им. Есманя Академии наук Азербайджанской ССР

При расчетах токов и напряжений сложных несимметричных нарушений нормального режима в качестве особенной и расчетной выбирается фаза А в одной из точек нарушений. Особенная фаза во второй, третьей точках нарушения учитывается или при помощи матриц фазных преобразований [Л. 1], или выбором граничных условий несимметрии, соответствующих режиму нарушения симметрии в отдельных фазах А; С; В трехфазной системы [Л. 3,4]. Ниже даны основные положения нового метода расчета токов и напряжений при несимметричных нарушениях режима электрической системы в двух, трех и т. д. точках системы.

Для учета особенной фазы в точках несимметрии вводим в показатель оператора  $a^i$  ( $i=0; 1; 2$ ) особый коэффициент  $a_n$  ( $n=1; 2; 3$ ; — индекс точек несимметрии). Взамен оператора  $a^i$ , используемого в методе симметричных составляющих [Л. 3], вводим в расчет новый оператор  $a^{ia_n}$ .

Оператор  $a^{ia_n}$  допускает следующие действия:

$$a^{ia_n} a^{ia_n} = a^{2ia_n}; \quad a^{2ia_n} a^{ia_n} = a^{3ia_n} = 1;$$

$a^{2ia_n} a^{2ia_n} = a^{4ia_n}$  и т. д. В отличие от основного соотношения  $1 + a + a^2 = 0$ , действительного для оператора  $a^i$ , для  $a^{ia_n}$  имеем  $1 + a^{a_n} + a^{2a_n} = (3; 0; 0)$ , соответственно для  $a_n = 0; 1; 2$ .

При расчетах одинарных несимметричных нарушений, возникающих только в одной точке системы, нет необходимости в пользовании оператором  $a^{ia_n}$ ; достаточно пользоваться  $a^i$ .

Взамен граничных условий несимметрии, записываемых для каждой отдельной фазы А; С; В трехфазной системы, вводим в расчет следующую обобщенную систему

Предлагается метод расчета сложной несимметрии, позволяющий учитывать особенную фазу в точках нарушения режима при помощи нового оператора  $a^{ia_n}$ . Оператор  $a^{ia_n}$ , в отличие от известного оператора  $a^i$ , устанавливает связь не только между симметричными составляющими ( $i=0; 1; 2$ ) тока и напряжения данной фазы, но и между особенными фазами ( $\alpha=0; 1; 2$ ) в точках нарушения симметрии ( $n=1; 2; 3 \dots$ ). Даны в наиболее общем виде расчетные выражения токов и напряжений двойной несимметрии (разрыв фазы и одновременные замыкания, заземления фаз) для одной схемы системы с трехсторонним питанием. Решения для схем с двухсторонним и односторонним питанием, а также для отдельных особых фаз представлены как частные случаи.

граничных условий:

$$\sum_{i=0}^2 i_i^x a^{ia_n} = 0; \quad (1)$$

$$\dot{U}_0^x = \dot{U}_1^x a^{a_n} = \dot{U}_2^x a^{2a_n}; \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^2 i_i^x a^{ia_n} = \frac{1}{Z_x^x} 3 \dot{U}_i^x a^{ia_n}; \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^2 \dot{U}_i^x a^{ia_n} = 0; \quad (4)$$

$$i_0^x = i_1^x a^{a_n} = i_2^x a^{2a_n}; \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^2 \dot{U}_i^x a^{ia_n} = \frac{1}{3} Z_x^x \sum_{i=0}^2 i_i^x a^{ia_n}. \quad (6)$$

где —  $a_n$  индекс особенной фазы ( $a_n=0; 1; 2$ );  
 $n$  — число точек несимметрии ( $n=1; 2; 3 \dots$ ).

Условные обозначения даны в приложении 1.

Различные виды несимметрии будем представлять определенным сочетанием граничных условий (1)-(6).

Наложение различных граничных условий вида (1)-(6) для  $n=2; 3$  на систему расчетных уравнений, записываемых согласно схеме замещения, приводит к таким конечным формулам, в которых фигурируют операторы  $a^{a_n}; a^{2a_n}$ . Условия несимметрии для  $n=1$ , как правило, учитываются в схеме замещения, принимая  $a^{a_1}=0$ .

Учет особенной фазы в точках нарушения симметрии производится в конечных формулах по следующему правилу: если особенная фаза в  $n$ -ой точке несимметрии совпадает с расчетной фазой, то коэффициенту  $a_n$  придаем значение 0; если особенная фаза опережает расчетную, то  $a_n=1$ ; если отстает от нее, то  $a_n=2$ . Обозначая особенную фазу для  $n=1$  через А, для  $n=2; 3 \dots$  будем иметь следующие значения  $a_n=0; 1; 2$ , соответственно для фаз А; С; В.

Характер несимметрии	Граничные условия
Разрыв одной фазы в ветви $X \cdot \alpha_n$ — индекс фазы с разрывом	(1); (2)
В одну фазу ветви $X$ включено полное сопротивление $z_\alpha^x$	(2); (3)*
Металлическое заземление одной фазы, $\alpha_n$ — индекс заземленной фазы	(4); (5)
Заземление фазы через полное сопротивление $z_\alpha^x$ в точке $n$	(5); (6)**
Разрыв двух фаз. $\alpha_n$ — индекс здоровой фазы	(4); (5)
Заземление двух фаз в точке $n \cdot \alpha_n$ — индекс здоровой фазы	(1); (2)
Замыкание двух фаз в точке $n \cdot x$ — индекс ветви, $\alpha_n$ — индекс здоровой фазы	(1); (2) ( $i=1;2$ ) $I_0^x=0$
Заземление трех фаз в точке $n$	(4) ( $\alpha_n=0; 1;2$ )
Замыкание трех фаз в точке $n$	(4) ( $\alpha_n=0; 1;2$ ) ( $i=1;2$ ) $I_0^x=0$

\* При  $z_\alpha^x = \infty$  условие (3) обращается в (1).

\*\* При  $z_\alpha^x = 0$  условие (6) обращается в (4).

Теперь легко установить значение оператора  $a^{i\alpha_n}$ . Если с помощью оператора  $a^i$  в методе симметричных составляющих устанавливается связь между симметричными составляющими тока, напряжения данной фазы, то с помощью  $a^{i\alpha_n}$  мы устанавливаем связь не только между симметричными составляющими (индекс  $i$ ), но также и между особными фазами (индекс  $\alpha$ ) в различных точках (индекс  $n$ ) несимметричного нарушения режима электрической системы.

Использование оператора  $a^{i\alpha_n}$  позволяет два самостоятельных, отдельных варианта расчета двойной несимметрии ( $n=2$ ) или шесть вариантов расчета тройной несимметрии ( $n=3$ ) заменить одним обобщенным вариантом, не требующим каких-либо дополнительных аналитических выкладок.

Придавая в конечных расчетных формулах  $a_n$  значения 0; 1; 2, получим семейство расчетных выражений, позволяющих определить токи и напряжения несимметрии при всевозможных сочетаниях особых фаз в точках нарушения симметрии.

Ниже даны расчетные выражения токов и напряжений при двойной несимметрии (одновременный разрыв фазы и различные виды замыканий в разных точках линии электропередачи) для системы с трехсторонним питанием (с учетом и без учета нагрузочных сопротивлений).

**Расчетные выражения для схемы с трехсторонним питанием (с учетом нагрузочных сопротивлений).** На рис. 1, а дана скелетная схема системы с тремя генераторными станциями с указанием места разрыва фазы (точка  $x$ ) и различных видов замыканий (точка  $u$ ). Схема замещения (рис. 1, б) составлена согласно (1); (2), где принято  $a_y=0$ . Для второй ( $x$ ) точки несимметрии  $\alpha_x=0; 1; 2$ .

Это означает, что, принимая фазу с разрывом в точке  $u$  в качестве расчетной ( $\alpha_y=0$ ), будем рассматривать в качестве особой фазы в точке  $x$  любую из трех фаз: А; С; В.

Пользуясь системой исходных расчетных уравнений (приложение 2), получаем следующие выражения токов  $I_i^x$ ;  $I$ :

$$I_0^x = -\dot{U}_0^x h_0 + \dot{U}_2^x h_1 - I n_4; \quad (7)$$

$$I_1^x = \dot{E}_{(2)} - \dot{U}_1^x h_3 + I n_5; \quad (8)$$

$$I_2^x = \dot{U}_0^x h_1 - \dot{U}_2^x h_2 - I n_6; \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{C_3} (\dot{E}_{(12)} + \dot{U}_0^x n_4 - \dot{U}_1^x n_3 + \dot{U}_2^x n_6). \quad (10)$$

Вспомогательные расчетные коэффициенты  $c_y, n_y, h_y$  вычисляются согласно выражений табл. 1. В приложении 2 даны выражения для определения токов  $I_i^n$  в различных ветвях схемы замещения, а также выражения приведенных полных сопротивлений схем обратной и нулевой последовательностей.

Расчетные выражения для определения напряжений трех последовательностей  $U_i^x$  при различных видах заземлений и замыканий фаз в точке  $x$  и при одновременном разрыве фазы А в точке  $u$  даны в табл. 2. Они получены как результат совместного решения различных уравнений системы (1)-(10).

Зная  $U_i^x$  для различных видов несимметрии в точке  $x$ , пользуясь формулой (10), определяем ток  $I$  прямой последовательности в ветви с раз-

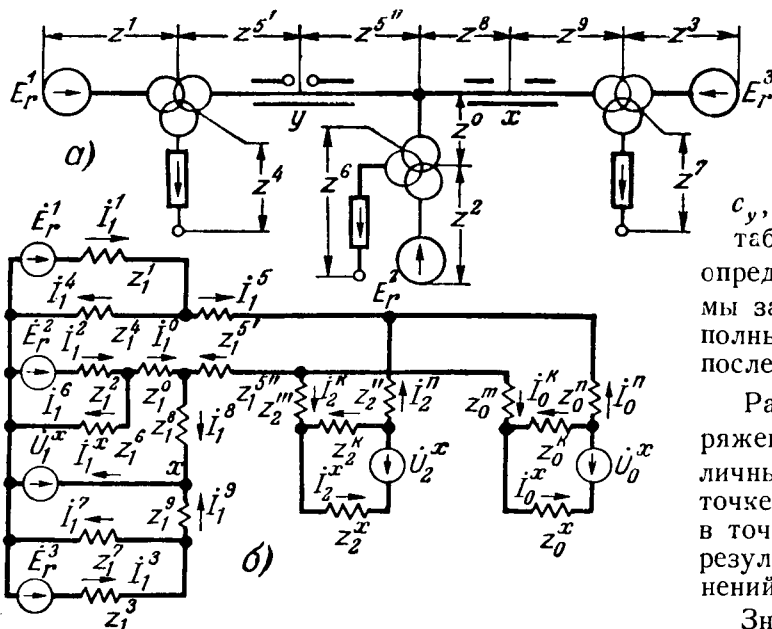


Рис. 1.

а — скелетная схема системы; б — схема замещения системы при несимметрии, составленная по месту разрыва фазы.

Таблица 1

Вспомогательные расчетные коэффициенты ( $i=2;0$ )

$n_i = \frac{z_i^{\kappa}}{z_i^{\kappa x}}$	$c_i = z_i^{mn} + n_i z_i^x$	$h_i = \frac{n_i n_i}{c_{02}} + \frac{1}{z_i^{\kappa x}}$	$n_3 = h_6 \left( z_1^{02} + \frac{z_1^0 z_1^2}{z_1^6} \right)$
$n_4 = \frac{n_0 c_2}{c_{02}}$	$n_5 = h_6 \left( z_1^2 + \frac{z_1^0 z_1^{26}}{z_1^6} \right)$	$n_6 = \frac{n_2 c_0}{c_{02}}$	$n_7 = n_4 + n_5 a^\alpha$
$n_8 = n_6 a^{2\alpha} - n_4$	$n_9 = n_5 a^\alpha - n_6 a^{2\alpha} - n_4$	$c_3 = \frac{c_0 c_2}{c_{02}} + \frac{z_1^1 z_1^4}{z_1^{14}} + n_5 z_1^8 + z_1^5$	$h_1 = \frac{n_0 n_2}{c_2}$
$h_3 = h_6 \frac{z_1^{26}}{z_1^6} + h_7 \frac{z_1^{37}}{z_1^7}$	$h_4^\pm = -h_0 \pm h_1 a^{2\alpha}$	$h_5^\pm = h_1 \pm h_2 a^{2\alpha}$	$h_6 = \frac{z_1^6}{z_1^2 z_1^6 + z_1^{08} z_1^{26}}$
$h_7 = \frac{z_1^7}{z_1^3 z_1^7 + z_1^9 z_1^{37}}$	$\dot{E}_{12} = \dot{E}_2 \frac{z_1^4}{z_1^{14}} - \dot{E}_2^2 h_6 z_1^8$	$\dot{E}_{23} = \dot{E}_2^2 h_6 + \dot{E}_2^3 h_7$	

Таблица 2

Расчетные выражения  $\dot{U}_i^x$  при разрыве фазы А в точке у и одновременных различных повреждениях в точке х (схема 1)

Повреждения в точке х	Решаются совместно	$\dot{U}_0^x = \frac{M_0^x}{D}$	$\dot{U}_1^x = \frac{M_1^x}{D}$
Заземление одной фазы ( $\alpha$ — индекс заземленной фазы)	(4); (5); (7) — (10)	$M_0^x = -n_8 [\dot{E}_{12} (h_1 a^\alpha - h_3) + \dot{E}_{23} (n_3 + n_6 a^{2\alpha})] - h_5^\pm a^\alpha (\dot{E}_{12} n_7 + \dot{E}_{23} c_3 a^\alpha)$	$M_1^x = n_8 [\dot{E}_{12} (h_1 a^\alpha + h_0) + \dot{E}_{23} a^\alpha (n_6 a^\alpha - n_4)] + (h_5^\pm a^\alpha - h_4^-) (\dot{E}_{12} n_7 + \dot{E}_{23} c_3 a^\alpha)$
Заземление двух фаз ( $\alpha$ — индекс здоровой фазы)	(1); (2); (7) — (10)	$M_0^x = \dot{E}_{12} n_9 + \dot{E}_{23} c_3 a^\alpha$	$\dot{U}_1^x = \dot{U}_0^x a^{2\alpha}$
Замыкание двух фаз ( $\alpha$ — индекс здоровой фазы)	(1); (2) ( $i=1,2$ ); (7) — (10); $i_0^x = 0$	$M_0^x = \dot{E}_{12} [h_1 (n_5 a^{2\alpha} - n_6) - h_{23} n_4] + \dot{E}_{23} [h_1 c_3 a^{2\alpha} + n_4 (n_3 - n_6 a^{2\alpha})]$	$M_1^x = \dot{E}_{12} D_2 a^\alpha + \dot{E}_{23} D_1$
Заземление трех фаз	(4); (10) ( $\alpha=0; 1; 2$ )	0	0
Замыкание трех фаз	(4); (7—10) ( $\alpha=0; 1; 2$ ); ( $i=1,2$ ); $i_0^x = 0$	$M_0^x = -\dot{E}_{12} n_4$	0

Повреждения в точке х	$\dot{U}_2^x = \frac{M_2^x}{D}$	где D
Заземление одной фазы ( $\alpha$ — индекс заземленной фазы)	$M_2^x = \dot{E}_{23} D_1 a^\alpha - \dot{E}_{12} D_3$	$D = D_1 (h_1 a^\alpha - h_3) + D_2 h_5^\pm a^\alpha + D_3 (n_3 a^{2\alpha} + n_6 a^\alpha),$ где $D_1 = c_3 h_4^- + n_8 (n_3 a^{2\alpha} + n_4)$ ; $D_2 = c_3 h_{03} + n_7 (n_3 a^{2\alpha} + n_4)$ ; $D_3 = n_8 h_{03} - n_7 h_4^-$
Заземление двух фаз ( $\alpha$ — индекс здоровой фазы)	$\dot{U}_2^x = \dot{U}_0^x a^\alpha$	$D = n_9 (n_3 a^{2\alpha} - n_4 - n_6 a^\alpha) - c_3 (-h_3 + h_4^+ + h_5^- a^\alpha)$
Замыкание двух фаз ( $\alpha$ — индекс здоровой фазы)	$\dot{U}_2^x = \dot{U}_1^x a^{2\alpha}$	$D = D_1 h_{23} + D_2 (n_3 a^\alpha - n_6) + D_3 h_1$ , где $D_1 = -h_0 c_3 - n_4 n_4$ ; $D_2 = h_0 (n_6 - n_5 a^{2\alpha}) - h_1 n_4$ $D_3 = c_3 h_1 + n_4 (n_5 a^{2\alpha} - n_6)$
Заземление трех фаз	0	—
Замыкание трех фаз	0	$D = h_0 c_3 + n_4 n_4$



рывом фазы  $i - i_1^5$ . Далее определяем  $I_i^x$  согласно (7)-(9) и все остальные токи  $I_i^n$  согласно формул, приведенных в приложении 2.

**Расчетные выражения для схемы с трехсторонним питанием** (без учета нагрузок). Выражения табл. 2 могут быть использованы в качестве формул и для схемы без нагрузочных сопротивлений 4; 6; 7, т. е. для схемы, в которой эти ветви отсутствуют (по одному, по два или вместе).

С этой целью предварительно определим но-

схем с двухсторонним и односторонним питанием. Ограничимся следующим примером.

Примем  $z_i^n = \infty$  ( $n = 2; 4; 6; 7$ ) и, кроме того,  $z_2^n = z_1^n$  (равенство полных сопротивлений обратной и прямой последовательностей).

Получим схему системы с двумя генераторными станциями 1 и 3. Обозначим:  $z_i^{158} = z_i^1$ ;  $z_i^{39} = z_i^3$ . Вспомогательные коэффициенты табл. 1 и приведенные полные сопротивления получают следующие выражения:

$$Z_i^{mn} = Z_i^1; Z_i^k = Z_i^3;$$

$$Z_i^x = h_6 = 0;$$

$$n_i = 1; \quad c_i = Z_i^1$$

$$h_i = \frac{1}{Z_{01}^1} + \frac{1}{Z_i^3} \quad (i = 0; 1)$$

$n_3 = n_5 = 1; \quad n_4 = h_1 Z_1^1$	$n_6 = h_1 z_0^1$	$n_7 = n_4 + a^x$	$n_8 = n_6 a^{2x} - n_1$
$n_9 = a^x - n_6 a^{2x} - n_4$	$c_8 = h_1 z_{001}^1 z_1^1$	$h_1 = \frac{1}{z_{01}^1}$	$h_3 = h_7 = \frac{1}{z_1^3}$
$h_4^{\pm} = -h_0 \pm h_1 a^{2x}$	$h_5^{\pm} = h_1 \pm h_2 a^{2x}$	$\dot{E}_{(12)} = \dot{E}_1^1$	$\dot{E}_{(23)} = \dot{E}_1^3 h_7$

вые выражения для ряда вспомогательных коэффициентов табл. 1 и приведенных полных сопротивлений схем обратной и нулевой последовательностей (приложение 2) путем наложения на них дополнительных условий вида  $z_i^n = \infty$  ( $n = 4; 6; 7; i = 1; 2; 0$ ). Результаты приведены в табл. 3.

Остальные коэффициенты табл. 1 вычисляются с учетом данных табл. 3 в зависимости от того, какая из нагрузочных ветвей (или их комбинация) 4; 6; 7 исходной схемы 1 исключается путем наложения условий  $z_i^n = \infty$ .

**Расчетные выражения для схем с двухсторонним и односторонним питанием** (с учетом и без учета нагрузочных сопротивлений). Путем предварительного наложения на схему 1, коэффициенты табл. 1, приведенные полные сопротивления обратной, нулевой последовательности (приложение 2) и далее, на расчетные выражения табл. 2, различных дополнительных условий вида  $E_2^x = 0$  ( $n = 1; 2; 3$ );  $z_i^n = 0$ ;  $z_i^n = \infty$  ( $n = 1-6$ ) можно получить ряд частных решений для

Приведенные в табл. 2 расчетные выражения напряжения несимметрии  $U_i^x$  для рассматриваемой схемы с двухсторонним питанием даны в табл. 4.

Вычислив по формулам из табл. 4 значения  $U_i^x$  для различных видов несимметрии, определяем  $I = I_1^1$  по формуле (10а).

$$I = \frac{z_{01}^1}{z_1^1 z_{001}^1} (\dot{E}_2^1 + \dot{U}_0^x \frac{z_1^1}{z_{01}^1} - \dot{U}_1^x + \dot{U}_2^x \frac{z_0^1}{z_{01}^1}). \quad (10a)$$

Токи заземления и замыкания  $I_i^x$  определяются следующими выражениями:

$$I_0^x = -\dot{U}_0^x \left( \frac{1}{z_{01}^1} + \frac{1}{z_0^3} \right) + \dot{U}_2^x \frac{1}{z_{01}^1} - I \frac{z_1^1}{z_{01}^1}; \quad (7a)$$

$$I_1^x = \dot{E}_2^3 \frac{1}{z_1^3} - \dot{U}_1^x \frac{1}{z_1^3} + I; \quad (8a)$$

$$I_2^x = \dot{U}_0^x \frac{1}{z_{01}^1} - \dot{U}_2^x \left( \frac{1}{z_{01}^1} + \frac{1}{z_1^3} \right) - I \frac{z_0^1}{z_{01}^1}. \quad (9a)$$

Таблица 3

	Приведенные полные сопротивления ( $i = 2; 0$ )	Вспомогательные коэффициенты
$z_i^4 = \infty$	$z_i^m = z_i^{15}$	$C_3 = \frac{C_0 C_2}{C_{02}} + n_5 z_1^8 + z_1^{15}; \quad \dot{E}_{12} = \dot{E}_2^1 - \dot{E}_2^2 h_6 z_1^8$
$z_i^6 = \infty$	$z_i^6 = z_i^{02}$	$n_3 = n_5 = h_6 z_1^{02}; \quad h_3 = h_6 + h_7 \frac{z_1^{37}}{z_1^7}; \quad h_6 = \frac{1}{z_{028}^1}$
$z_i^7 = \infty$	$z_i^c = z_i^{39}$	$h_3 = h_6 \frac{z_1^{26}}{z_1^6} + h_7; \quad h_7 = \frac{1}{z_{39}^1}$
$z_i^4 = z_i^6 =$	$z_i^{mn} = z_i^{15} + \frac{z_i^{02} z_i^8}{z_{02389}^1}$	$n_3 = n_5 = h_6 z_1^{02}; \quad h_3 = h_6; \quad h_6 = \frac{1}{z_{028}^1}; \quad h_7 = \frac{1}{z_{39}^1}$
$= z_i^7 = \infty$	$z_i^k = \frac{z_i^{02} z_i^{39}}{z_{02389}^1} \quad z_i^x = \frac{z_i^8 z_i^{39}}{z_{02389}^1}$	$C_3 = \frac{C_0 C_2}{C_{02}} + n_5 z_1^8 + z_1^{15}; \quad \dot{E}_{(12)} = \dot{E}_2^1 - \dot{E}_2^2 h_6 z_1^8$

Расчетные выражения  $\dot{U}_i^x$  при разрыве фазы А в точке у и одновременных различных повреждениях в точке х (для схемы с двухсторонним питанием)

Таблица 4

Повреждения в точке х	Решаются совместно	$\dot{U}_0^x = \frac{M_0^x}{D}$	$\dot{U}_1^x = \frac{M_1^x}{D}$
Заземление одной фазы ( $\alpha$ — индекс заземленной фазы)	(4); (5); (7) — (10)	$M_0^x = -\dot{E}_r^1 \left[ z_0^1 (a^\alpha - a^{2\alpha}) + z_1^1 (2 + a^\alpha) + z_1^3 \sum_{i=0}^2 a^{i\alpha} \right] - \dot{E}_r^3 \left[ z_{01}^1 (a^\alpha + a^{2\alpha}) + \frac{z_{001}^1 z_1^1}{z_1^3} a^\alpha - z_1^1 \right]$	$M_1^x = z_1^3 \dot{E}_r^1 \left[ \frac{a^\alpha}{z_0^3} (z_{01}^1 + z_0^1 a^\alpha) + \frac{1}{z_1^3} (z_{01}^1 a^\alpha + z_1^1) + 2 \sum_{i=0}^2 a^{i\alpha} \right] + z_1^1 \dot{E}_r^3 \left[ z_{001}^1 a^\alpha \left( \frac{1}{z_0^3} + \frac{1}{z_1^3} \right) + \frac{z_0^1}{z_1^1} \left( 1 + \frac{z_0^1}{z_1^1} a^\alpha \right) + 2 a^\alpha + \sum_{i=0}^2 a^{i\alpha} \right]$
Заземление двух фаз ( $\alpha$ — индекс здоровой фазы)	(1); (2); (7) — (10)	$M_0^x = a^\alpha \left\{ \dot{E}_r^1 \left[ \frac{z_0^1}{z_1^1} (1 - a^\alpha) + 1 - a^{2\alpha} \right] + \dot{E}_r^3 \frac{z_{001}^1}{z_1^3} \right\}$	$\dot{U}_1^x = \dot{U}_0^x a^{2\alpha}$
Замыкание двух фаз ( $\alpha$ — индекс здоровой фазы)	(1); (2); ( $i=1; 2$ ); (7) — (10) $i_0^x = 0$	$M_0^x = \dot{E}_r^1 \frac{z_0^3}{z_1^1} \left( a^{2\alpha} - 1 - 2 \frac{z_1^1}{z_1^3} \right) + \dot{E}_r^3 \frac{z_0^3}{z_1^3} (1 + a^{2\alpha})$	$M_1^x = \dot{E}_r^1 \left( 1 + \frac{z_0^{13}}{z_1^1} - \frac{z_0^{13}}{z_1^1} a^\alpha \right) + \dot{E}_r^3 \frac{z_1^1 + 2 z_0^{13}}{z_1^3}$
Заземление трех фаз	(4); (10) ( $\alpha=0; 1; 2$ )	0	0
Замыкание трех фаз	(4); (7—10) ( $\alpha=0; 1; 2$ ) ( $i=1,2$ ) $i_0^x=0$	$M_0^x = -\dot{E}_r^1 z_0^3$	0

Продолжение

Повреждения в точке х	Решаются совместно	$\dot{U}_2^x = \frac{M_2^x}{D}$	D
Заземление одной фазы ( $\alpha$ — индекс заземленной фазы)	(4); (5); (7) — (10)	$M_2^x = \dot{E}_r^1 \left[ z_1^1 - z_0^1 a^{2\alpha} - z_1^3 \left( \frac{z_0^1}{z_0^3} a^{2\alpha} + \frac{z_{01}^1}{z_0^3} a^\alpha + \sum_{i=0}^2 a^{i\alpha} \right) \right] + \dot{E}_r^3 \left[ z_0^1 a^{2\alpha} - z_1^1 (2 + 2 a^\alpha + \frac{z_{001}^1}{z_0^1} a^\alpha) \right]$	$D = z_1^1 \left[ z_{001}^1 \left( \frac{1}{z_1^3} + \frac{2}{z_0^3} \right) + 3 + 2 \sum_{i=0}^2 a^{i\alpha} \right] + z_1^3 \left[ 3 \sum_{i=0}^2 a^{i\alpha} + z_{001}^1 \left( \frac{1}{z_1^3} + \frac{1}{z_0^3} \right) + \frac{1}{z_0^3} (z_0^1 a^\alpha + z_0^1 a^{2\alpha} + z_1^1) \right]$
Заземление двух фаз ( $\alpha$ — индекс здоровой фазы)	(1); (2); (7) — (10)	$\dot{U}_2^x = \dot{U}_0^x a^\alpha$	$D = z_{001}^1 \left( \frac{1}{z_0^3} + \frac{2}{z_1^3} \right) + \left( 2 + \frac{z_0^1}{z_1^1} \right) (2 - a^\alpha - a^{2\alpha})$
Замыкание двух фаз ( $\alpha$ — индекс здоровой фазы)	(1); (2); ( $i=1; 2$ ); (7) — (10) $i_0^x = 0$	$\dot{U}_2^x = \dot{U}_1^x a^{2\alpha}$	$D = \frac{1}{z_1^3} (2 z_1^1 + 4 z_0^{13}) + 2 + 2 \frac{z_0^{13}}{z_1^1} - \frac{z_0^{13}}{z_1^1} (a^\alpha + a^{2\alpha})$
Заземление трех фаз	(4); (10) ( $\alpha=0; 1; 2$ )	0	—
Замыкание трех фаз	(4); (7—10) ( $\alpha=0; 1; 2$ ) ( $i=1,2$ ) $i_0^x=0$	0	$D = z_1^1 + 2 z_0^{13}$

Рассматривая выражения табл. 4, как типовые формулы, можно получить три различных решения для случаев  $\alpha=0; 1; 2$ , соответствующих режиму, когда фазой, нарушающей симметрию в точке  $x$ , служит  $A; C; B$ . В частности, при  $\dot{E}_r^1 = \dot{E}_r^3$  и условии  $\alpha=0$  (для случая заземления одной фазы) и  $\alpha=1; 2$  (для случая заземления и замыкания двух фаз) данные табл. 4 совпадают с соответствующими выражениями для случаев коротких замыканий с одновременным обрывом одной фазы на линии с двухсторонним питанием [Л. 2, табл. 1].

Налагая на формулы табл. 4 условие  $\dot{E}_r^1=0$  или  $\dot{E}_r^3=0$ , можно получить соответствующие решения для схемы с односторонним питанием. Рассмотренный пример может служить хорошей иллюстрацией общности и преимуществ предлагаемого метода расчета, базирующегося на новом операторе  $a^{i\alpha_n}$ .

**Выводы.** Применение в расчетах сложных несимметричных режимов электрических систем нового оператора  $a^{i\alpha_n}$ , где  $\alpha_n$  — индекс фазы, нарушающей симметрию в  $n$ -ой точке системы, взамен применяемого в существующих методах расчета оператора  $a^i$  позволяет значительно сократить объем подобных расчетов. Например, два или шесть самостоятельных вариантов расчета при несимметрии в двух или трех точках системы можно заменить одним обобщенным вариантом расчета.

Приведенные в табл. 2, в уравнениях (7)–(10) и в приложении 2 выражения токов и напряжений трех последовательностей могут быть использованы для расчетов двойной несимметрии в системе с трехсторонним питанием (с учетом и без учета нагрузочных сопротивлений). Из этих же выражений могут быть получены частные решения для ряда схем с двухсторонним и односторонним питанием.

#### Приложение 1. Условные обозначения, принятые в статье.

$a$  — оператор поворота вектора на  $120^\circ$ .

$\alpha_n$  — индекс особенной фазы, соответственно для фаз

$A; C; B \quad \alpha_n=0; 1; 2$ .

$i$  — индекс нулевой, прямой, обратной последовательности токов, напряжений, полных сопротивлений ( $i=0; 1; 2$ ).

$\dot{I}=I_1^5$  — ток прямой последовательности в ветви с разрывом фазы.

$\dot{I}_i^y; \dot{U}_i^y; z_i^y$  — ток, напряжение, полное сопротивление  $i$ -той последовательности (индекс внизу) в ветви  $y$  (индекс сверху);

$v=1; 2; 3; k; m$  и т. д. (согласно схеме 1).

$\dot{E}_r^y$  — э. д. с. генератора ( $y$  — индекс ветви).

$z_i^k; z_i^{mn}; z_i^x$  — эквивалентные полные сопротивления схем 2; 0 последовательностей.

$Z_i^{mnk}$  — сумма полных сопротивлений  $i$ -той последовательности ветвей  $m; n; k$ .

$z_{ii}^k$  — сумма полных сопротивлений  $i$  и  $i_1$  — последовательностей ветви  $k$ .

$z_{ii}^{mnk} = z_i^m + z_i^n + z_i^k + z_{i_1}^{mnk}$  — сумма полных сопротивлений.

$n_{y^i} \cdot c_{y^i} \cdot h_{y^i}$  — вспомогательные коэффициенты, соответственно: безразмерные, с размерностью (ом), с размерностью (1/ом);

$y$  — порядковый номер.

$n_{yx}; c_{yx}$  — сумма коэффициентов с индексами  $x$  и  $y$ .

Например,  $c_{02} = c_0 + c_2$ .

$U_i^y = I_i^y z_i^y$  — падение напряжения в ветви  $y$  схемы  $i$ -той последовательности.

#### Приложение 2. Система исходных расчетных уравнений

(по схеме замещения 1 б):

$$\left. \begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1^5 = \dot{I}_1^1 - \dot{I}_1^4 = \dot{I}_1^8 - \dot{I}_1^0 = \dot{I}_1^8 + \dot{I}_1^6 - \dot{I}_1^2; \\ \dot{I}_1^9 &= \dot{I}_1^x - \dot{I}_1^8 = \dot{I}_1^3 - \dot{I}_1^7; \\ \dot{I}_2^9 &= -\dot{I}_1^0 - \dot{I} = \dot{I}_2^x - \dot{I}_2^k = \dot{I}_0^k - \dot{I}_0^x - \dot{I}; \end{aligned} \right\} \quad (A)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_r^1 &= \dot{U}_1^1 + \dot{U}_1^4; \dot{E}_r^2 = \dot{U}_2^1 + \dot{U}_2^6; \dot{E}_r^3 = \dot{U}_3^1 + \dot{U}_3^7; \\ \dot{E}_1^x &= \dot{U}_1^7 - \dot{U}_1^9 = \dot{U}_1^6 - \dot{U}_1^8 - \dot{U}_1^0; \dot{E}_i^x = -\dot{U}_i^x - \dot{U}_i^k (i=2; 0); \\ \dot{I}_2^n z_2^{mn} &= \dot{U}_2^n - \dot{U}_0^n + \dot{I}_0^n z_0^{mn}; \end{aligned} \right\} \quad (B)$$

$$\dot{E}_r^1 - \dot{E}_r^2 = \dot{U}_1^1 - \dot{U}_2^1 + \dot{U}_5^1 - \dot{U}_1^0 + \dot{U}_2^k - \dot{I}_2^n z_2^{mn}; \quad (C)$$

Выражения для определения токов в ветвях схемы 1б [для  $\dot{I}_i^x$  — см. (7)–(9)];

$$\dot{I}_1^1 = \frac{1}{z_1^{14}} (\dot{E}_r^1 + \dot{I} z_1^4);$$

$$\dot{I}_1^2 = \frac{1}{z_1^2} (\dot{E}_r^2 - \dot{U}_1^x + \dot{I} z_1^0 - \dot{I}_1^8 z_1^{08});$$

$$\dot{I}_1^3 = \left( \dot{E}_r^3 - \frac{z_1^{79}}{z_1^7} - \dot{U}_1^x \right) h_6;$$

$$\dot{I}_1^8 = \left( \dot{E}_r^2 - \dot{U}_1^x \frac{z_1^{26}}{z_1^6} \right) h_7 + \dot{I} n_5;$$

$$\dot{I}_2^n = -\dot{I} - \dot{I}_0^n \frac{1}{n_0} - \dot{U}_0^n \frac{1}{z_0^k}.$$

Остальные токи вычисляются согласно (A).

Выражения приведенных полных сопротивлений схем (2;0) последовательностей:

$$z_i^m = z_i^5 + \frac{z_i^1 z_i^4}{z_1^{14}}; z_i^k = \frac{z_i^6 z_i^c}{z_1^{6c8}}; z_i^n = z_i^5 + \frac{z_i^8 z_i^8}{z_1^{8c8}};$$

$$z_i^x = \frac{z_i^c z_i^8}{z_1^{8c8}}, \text{ где } z_i^9 = z_i^0 + \frac{z_i^2 z_i^6}{z_1^{26}}; z_i^c = z_i^9 + \frac{z_i^3 z_i^7}{z_1^{37}} (i=2; 0),$$

#### Литература

1. Н. Н. Щедрин. К теории сложных несимметричных режимов электрических систем. Электричество, № 6, 1946.

2. А. Б. Чернин. Расчет токов и напряжений для целей анализа релейной защиты при коротких замыканиях с одновременным обрывом фазы. Электричество, № 6, 1948.

3. К. Ф. Вагнер и Р. Д. Эванс. Метод симметричных составляющих. ОНТИ, 1936.

4. О. М. Богатырев и А. Б. Чернин. Метод расчета токов короткого замыкания при одновременном обрыве провода. Электрические станции, № 2, 1941.

5. Г. Т. Адонц. Метод и примеры расчета сложных несимметричных режимов электрических систем. Энергетический институт АН Азерб. ССР, 1948.

[5. 1. 1949]

# Нерезонансные электрические цепи с переменным и нелинейным параметрами

Доктор техн. наук, проф. Я. З. ЦЫПКИН

Институт автоматики и телемеханики АН СССР

В одной из работ автора [Л. 1] были рассмотрены линейные нерезонансные цепи с переменным параметром. Настоящая статья посвящена нерезонансным цепям с переменным параметром,

в которых один из параметров является нелинейным (например, индуктивность со сталью, емкость с диэлектриком), постоянная которого зависит от напряжения или тока, и т. д.

К такого рода цепям относятся реальные микрофонные цепи, цепи различных датчиков и т. д. при учете нелинейности отдельных их элементов. Подобные цепи представляют значительный теоретический и практический интерес.

Являясь непосредственным обобщением теории линейных нерезонансных цепей с переменным параметром, излагаемая ниже теория подобных нелинейных цепей позволяет учесть нелинейность параметров их, на основании результатов, полученных для соответствующих линейных цепей. Это оказалось возможным благодаря выбору эмпирической кривой, аппроксимирующей характеристику нелинейного параметра в виде логарифмической кривой [Л. 2]. Логарифмическая кривая довольно точно охватывает существенные черты характеристики нелинейного параметра и, в отличие от других видов эмпирических кривых, позволяет в явном виде аналитически до конца решить поставленную задачу. Ее недостаток, ограничивающий область ее применения, — отсутствие центральной симметрии — здесь не имеет значения, так как рассматриваемые величины ( $i, q$ ), как это видно из схем цепей, не меняют знака.

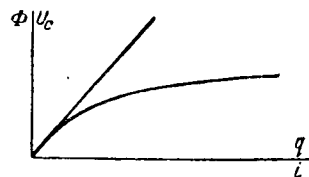
Схемы цепей, рассматриваемых в настоящей работе, изображены в таблице, в которой приведены дифференциальные их, уравнения законы изменения переменного параметра, уравнения характеристики нелинейного параметра и основные принятые обозначения.

В цепи I переменный и нелинейный параметры разделены. В цепях II и III они совмещены.

Рассматриваются цепи, состоящие из последовательно соединенных: сопротивления и нелинейных индуктивности или емкости. Один из этих параметров изменяется с течением времени по гармоническому закону. Дается теория этих цепей, частными случаями которой являются результаты, полученные автором ранее для линейных нерезонансных цепей с переменным параметром и простейших нелинейных цепей.

Как видно из таблицы, предполагается, что активное сопротивление в цепях является линейным параметром<sup>1</sup>.

Характеристика нелинейных параметров, уравнения которой приведены в таблице, графически изображена на рисунке. Величина  $\alpha$  характеризует степень „насыщения“ нелинейных параметров. Чем меньше  $\alpha$ , тем ближе характеристика к линейной<sup>2</sup>, совпадая с последней при  $\alpha = 0$ . Величины  $L_0, L(t)$  и  $C(t)$  определяют тангенс угла наклона касательной в начальной точке характеристики. Для цепей II и III вследствие совмещения переменного и нелинейного параметра наклон касательной в начальной точке является функцией времени.



Обозначая  $\omega t = x$  и принимая во внимание обозначения, приведенные в таблице, уравнения цепей I, II и III легко привести к одному уравнению вида

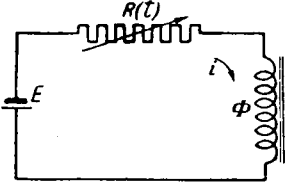
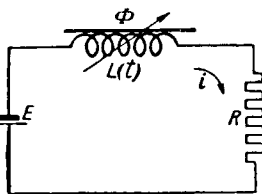
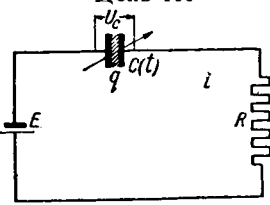
$$\frac{dv}{dx} + \frac{a}{\alpha} (1 + \lambda \sin x) (e^{av} - 1) = A, \quad (1)$$

где  $A = \frac{E}{\omega}$  для цепей I и II и  $A = \frac{E}{\omega R} = \frac{I_0}{\omega}$  для цепи III.

Уравнение (1) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка с периодическим коэффициентом.

<sup>1</sup> От этого ограничения нетрудно освободиться. Однако, ввиду небольшого практического интереса мы на этом не будем останавливаться здесь.

<sup>2</sup> См. [Л. 2].

Тип цепи	Схема цепи	Уравнение цепи	Характеристики переменного и нелинейного элементов	$\lambda$	$a = \frac{1}{\omega \tau}$	$V$
I	<p>Цепь I</p> 	$\frac{d\Phi}{dt} + R(t)i = E$	$R_0 + R_1 \sin \omega t$ $i = \frac{1}{aL} (e^{a\Phi} - 1)$	$\frac{R_1}{R_0}$	$\frac{R_0}{\omega L}$	$\Phi$
II	<p>Цепь II</p> 	$\frac{d\Phi}{dt} + R(t)i = E$	$\frac{1}{L(t)} = \frac{1}{L_0} + \frac{1}{L_1} \sin \omega t$ $i = \frac{1}{aL(t)} (e^{a\Phi} - 1)$	$\frac{L_0}{L_1}$	$\frac{R}{\omega L_0}$	$\Phi$
III	<p>Цепь III</p> 	$R \frac{dq}{dt} + U_c = E$	$\frac{1}{C(t)} = \frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_1} \sin \omega t$ $U_c = \frac{1}{C\alpha(t)} (e^{a q} - 1)$	$\frac{C_0}{C_1}$	$\frac{1}{\omega C_0 R}$	$q$

$i$  — ток в цепи;  $\Phi$  — поток в индуктивности;  $q$  — заряд на емкости;  $U_c$  — напряжение на емкости.

Для решения этого уравнения произведем замену переменных. Положим

$$z = 1 - e^{-aV}, \quad (2)$$

тогда уравнение (1) после элементарных преобразований сможет быть записано в виде

$$\frac{dz}{dx} + (1 + B + \lambda \sin x)z = aB, \quad (3)$$

где  $B = aLI_0$  для цепи I,

$B = aL_0I_0$  для цепи II,

$B = aCE$  для цепи III

и представляет собой коэффициент, учитывающий нелинейные свойства цепей ( $\alpha$ ).

Наконец, полагая<sup>3</sup>

$$\bar{y} = \frac{1+B}{B} z = \frac{z}{z_0} \quad (4)$$

и обозначая

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{1+B} \text{ и } \bar{a} = a(1+B), \quad (5)$$

окончательно запишем уравнение (3) в виде:

$$\frac{d\bar{y}}{dx} + \bar{a}(1 + \bar{\lambda} \sin x)\bar{y} = \bar{a}. \quad (6)$$

Уравнение (6) по внешнему виду совпадает с уравнением линейных нерезонансных цепей с переменным параметром [Л. 1] и отличается от последнего только смыслом обозначений. Поэтому мы можем воспользоваться точным решением уравнения, которое было получено и подробно

исследовано в предыдущей работе [Л. 1]. Запишем его в следующей форме:

$$\bar{y} = \bar{y}_1(x) + \bar{y}_2(x)e^{-\bar{a}x}, \quad (7)$$

где периодическая функция

$$\begin{aligned} \bar{y}_1(x) &= \bar{Y}_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (\bar{A}_k \cos kx + \bar{B}_k \sin kx) = \\ &= \bar{Y}_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{M}_k \cos(kx - \bar{\psi}_k) \end{aligned} \quad (8)$$

соответствует установившемуся процессу, а

$$\bar{y}_2(x) = - \left[ \bar{Y}_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{A}_k \right] e^{-\bar{a}\lambda(1 - \cos x)} \quad (9)$$

соответствует переходному процессу. Черточки над  $\bar{Y}_0, \bar{A}_k, \bar{B}_k, \bar{M}_k, \bar{\psi}_k$  указывают, что эти величины являются функциями  $\bar{a}$  и  $\bar{\lambda}$ , т. е. в конечном итоге зависят от нелинейности, характеризуемой величиной  $B$ . Все эти величины (а значит и  $\bar{y}$ ) могут быть определены по соответствующим формулам или графикам, которые были получены в работе [Л. 1], полагая в них вместо  $a$  и  $\lambda$  соответственно  $\bar{a}$  и  $\bar{\lambda}$ , согласно формуле (5).

Для определения токов в цепях I и II и напряжения на емкости в цепи III воспользуемся уравнением характеристики нелинейного параметра (таблица) и соотношениями (2) и (4).

<sup>3</sup> Заметим, что  $z_0 = B/(1+B)$  соответствует значению  $V$  при  $i = I_0$  для цепей I, II и  $U_c = E$  для цепи III.

После преобразований и введения принятых обозначений, получаем:

$$\frac{i}{I_0} = \frac{\bar{y}}{1 + B(1 - \bar{y})} \quad (10)$$

для цепи I,

$$\frac{i}{I_0} = \frac{\bar{y}}{1 + B(1 - \bar{y})} (1 + \lambda \sin x) \quad (11)$$

для цепи II и

$$\frac{U_c}{E} = \frac{\bar{y}}{1 + B(1 - \bar{y})} (1 + \lambda \sin x) \quad (12)$$

для цепи III, где  $\bar{y}$  определяется формулой (7).

Нетрудно показать, что при  $\lambda < 1$ ,  $y < \frac{1+B}{B}$

и эти выражения дают конечное значение токов и соответственно напряжения в рассматриваемых цепях.

Формулы (10) — (12) определяют устанавливающийся процесс в рассматриваемых цепях. С течением времени переходный процесс, определяемый формулой (9), исчезнет и в цепи будет наблюдаться установившийся периодический процесс. Аналогично тому, как это было сделано в работе [Л. 1], можно найти приближенно длительность переходного процесса из условия

$$ax = 2,3.$$

Воспользовавшись формулой (5), получаем:

$$ax_0 = \frac{2,3}{1+B}$$

и так как  $a = \frac{1}{\omega\tau}$ ,  $x = \omega t$ , то окончательно<sup>4</sup>

$$t_0 = \frac{2,3}{1+B} \tau. \quad (13)$$

Отсюда следует, что в нелинейных цепях длительность переходного процесса уменьшается с ростом  $B$ , т. е. чем больше нелинейность, тем быстрее устанавливается процесс.

При  $t > t_0$  или  $x > x_0$  величины стационарных токов и напряжения будут определяться формулами (10) — (12), в которых  $y$  заменено на  $y_1(x)$ . Из формул (10) — (12) при  $\bar{y} = y_1(x)$  следует, что цепи II и III при прочих равных условиях более насыщены гармониками, чем цепь I. Полученные формулы, таким образом, полностью решают поставленную задачу и позволяют определить все интересные характеристики рассматриваемых цепей.

<sup>4</sup> Заметим, что  $\tau$  является постоянной времени эквивалентных линейных цепей [Л. 2].

Рассмотрим далее частные случаи полученных результатов. Предположим, что  $B=0$ . Это соответствует случаю линейных нерезонансных цепей с переменным параметром. Тогда  $\bar{a}=a$ ,  $\bar{\lambda}=\lambda$  и из (10) — (12) получаем:

$$\frac{i}{I_0} = y = y_1(x) + y_2(x)e^{-ax}$$

для цепи I,

$$\frac{i}{I_0} = y(1 + \lambda \sin x) \quad \text{или} \quad \frac{\Phi}{\Phi_0} = y,$$

где  $\Phi = L(t)i$ ,  $\Phi_0 = L_0 I_0$  для цепи II и

$$\frac{U_c}{E} = y(1 + \lambda \sin x) \quad \text{или} \quad \frac{q}{q_0} = y,$$

где  $q = U_c C(t)$ ,  $q_0 = EC_0$  для цепи III.

Эти результаты совпадают с результатами, полученными ранее [Л. 1].

Положим теперь, что  $\bar{\lambda}=0$ . Это соответствует простейшим нелинейным цепям. Тогда  $\bar{\lambda}=0$ , а значит  $\lambda_0 = 1 \bar{A}_k = \bar{B}_k = 0$  ( $k=1,2,\dots$ ) [Л. 1]. Следовательно,

$$\bar{y} = 1 - e^{-\frac{1+B}{\tau} t} = 1 - e^{-\frac{1+B}{\tau} t}.$$

Подставляя это значение  $\bar{y}$  в формулы (10) — (12) при  $\lambda=0$  получаем:

$$\frac{i}{I_0} = \frac{1 - e^{-\frac{1+B}{\tau} t}}{1 + Be^{-\frac{1+B}{\tau} t}}$$

для цепей I и II, так как при  $\lambda=0$  эти цепи тождественны друг другу, и

$$\frac{U_c}{E} = \frac{1 - e^{-\frac{1+B}{\tau} t}}{1 + Be^{-\frac{1+B}{\tau} t}}$$

для цепи III.

Эти результаты совпадают с результатом, полученным в прежней работе [Л. 2].

Таким образом, приведенные в настоящей работе формулы дают возможность рассчитать процессы, протекающие в нерезонансных цепях с переменными и нелинейными параметрами, на основании уже ранее полученных формул и графиков для подобных линейных цепей.

#### Литература

1. Я. З. Цыпкин. Нерезонансные электрические цепи с переменным параметром. Электричество, № 8, стр. 61, 1946.
2. Я. З. Цыпкин. О цепях, содержащих катушку с железом. Электричество, № 10, стр. 26, 1944.

[20. 5. 1948]



# Высшие гармоники в электрической цепи, содержащей индуктивность с железом и емкость

Кандидат техн. наук С. П. ПИВОВАРОВ

Научно-исследовательский институт МПС

Исследованию электрических цепей, содержащих индуктивность с железом посвящено большое количество работ, но насколько известно автору ни в одной из них не разбирается аналитически вопрос о высших гармониках. Индуктивность в виде дросселя или трансформатора в настоящее время широко применяется в электромагнитных стабилизаторах напряжения, преобразователях частоты, измерительной технике, автоматике и т. п.

В настоящей статье анализируется одна из наиболее элементарных схем, состоящая из последовательно включенных в сеть переменного тока дросселя с железом и емкости. Более сложные цепи с трансформатором иногда могут быть сведены к этому случаю.

Пренебрегая потерями в магнитопроводе дросселя и активным сопротивлением для указанной цепи можем написать следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{1}{C} \int i dt + WS \cdot 10^{-8} \frac{dB}{dt} = U_m \cos \omega t, \quad (1)$$

где  $C$  — емкость;

$W$  — число витков,  $S$  — сечение магнитной цепи дросселя;

$i, B$  — мгновенные значения тока и индукции;

$U_m$  — амплитуда напряжения сети.

Считая далее, что в дросселе между током и индукцией существует зависимость

$$i = aB + dB^2, \quad (2)$$

где  $a, d$  и  $\alpha$  — постоянные, причем  $\alpha$  — число нечетное и величина его обычно не превышает 9.

Подставив (2) в (1), можно написать следующее нелинейное дифференциальное уравнение.

$$A_1 \frac{d^2 B}{dt^2} + A_4 B + A_5 B^2 = U_m \sin \omega t, \quad (3)$$

где  $A_1 = -\frac{WS \cdot 10^{-8}}{\omega}$ ;  $A_4 = -\frac{a}{C\omega}$ ;  $A_5 = \frac{d}{C\omega}$ .

Для решения уравнения (3) используется метод академика Галеркина, нашедший многочис-

Рассматривается электрическая цепь, содержащая индуктивность с железом и емкость, при включении в сеть переменного тока. Аналитически показывается, что в такой цепи кроме третьей имеется также вторая гармоника.

ленные применения при решении ряда задач теории упругости и теории колебаний.

Будем искать приближенное решение дифференциального уравнения в виде суммы двух гармонических колебаний

$$B = B_{m_1} \sin \omega t + B_{m_n} \sin n \omega t. \quad (4)$$

Постоянные  $B_{m_1}$  и  $B_{m_n}$  выражения (4) должны быть выбраны так, чтобы интеграл

$$\int_0^\omega \left[ A_1 \frac{d^2 B}{dt^2} + A_4 B + A_5 B^2 - U_m \sin \omega t \right] \delta B \cdot dt,$$

где

$$\delta B = \delta B_{m_1} \sin \omega t + \delta B_{m_n} \sin n \omega t,$$

обращался в нуль при произвольной вариации  $\delta B$ . Это условие приводит к системе двух уравнений:

$$\int_0^{2\pi} \left[ A_1 \frac{d^2 B}{dt^2} + A_4 B + A_5 B^2 - U_m \sin \omega t \right] \sin \omega t \cdot dt = 0, \quad (5)$$

$$\int_0^{2\pi} \left[ A_1 \frac{d^2 B}{dt^2} + A_4 B + A_5 B^2 - U_m \sin \omega t \right] \sin n \omega t \cdot dt = 0. \quad (6)$$

После подстановки выражения (4) в уравнения (5) и (6) и интегрирования их приходим к следующим алгебраическим уравнениям: для  $n = 2$ :

$$U_m = [A_4 - A_1 \omega^2] B_{m_1} + A_5 B_{m_1}^2 p_1; \quad (7)$$

$$B_{m_1}^{2-1} = -\frac{A_4 - 4A_1 \omega^2}{A_5} \cdot \frac{\beta}{2}; \quad (8)$$

$$\beta = \frac{B_{m_2}}{B_{m_1}}; \quad (9)$$

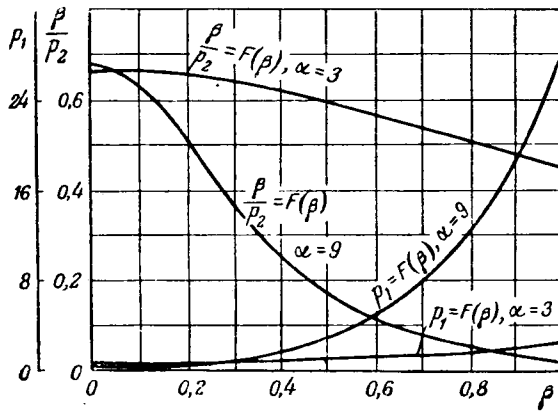


Рис. 1.

для  $n = 3$ :

$$U_m = [A_4 - A_1 \omega^2] B_{m1} + A_5 B_{m1}^{\alpha} p_3; \quad (10)$$

$$B_{m1}^{\alpha-1} = - \frac{A_4 - 9A_1 \omega^2}{A_5} \cdot \frac{\gamma}{p_4}; \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{B_{m3}}{B_{m1}}, \quad (12)$$

где  $p_1$ — $p_4$ —коэффициенты, полученные в результате интегрирования выражений (5) и (6).

На рис. 1—2 приведены кривые коэффициентов  $p_1$ — $p_4$  для разных значений  $\beta$  и  $\gamma$ .

Для решения этих уравнений задаемся значениями  $\beta$  и  $\gamma$ . Находим коэффициенты  $p_1$ — $p_4$ , определяем из уравнения (8), (11)  $B_{m1}$  и затем вычисляем из уравнений (7), (10) подведенное напряжение.

Исследуем теперь выражения (7), (8).

Подставив в уравнение (7)  $B_{m1}$  из (8), получим

$$U_m = [A_4 - A_1 \omega^2 + (4A_1 \omega^2 - A_4) \frac{p_1}{p_2}] B_{m1}. \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что каждому значению  $B_{m1}$  для данного значения  $\beta$  будет соответствовать одно значение  $U_m$ , т. е. эти решения представляют одну двойную кривую, так как при данных  $B_{m1}$  и  $U_m$ ,  $B_{m2}$  может иметь два значения, отличающиеся знаками.

Из кривых  $B_{m1} = F(U_m)$  и  $B_{m2} = f(U_m)$  (рис. 3), вычисленных по формулам (7)—(9), видно, что вторая гармоника, появляющаяся при определенном напряжении при изменении его меняет свою величину и, кроме того, в точке  $M$  фазу. Это явление может быть названо резонансом второй гармоники.

Вторая гармоника индукции может появиться, как видно из уравнения (8), только при условии  $\frac{A_4 - 4A_1 \omega^2}{A_5} < 0$ , т. е. в цепи, не имеющей емкости, вторая гармоника возникнуть не может.

Перейдем теперь к анализу уравнений (10)—(12). Выражение  $\frac{A_4 - 9A_1 \omega^2}{A_5}$ , входящее в уравнение (11), может быть положительным и отри-

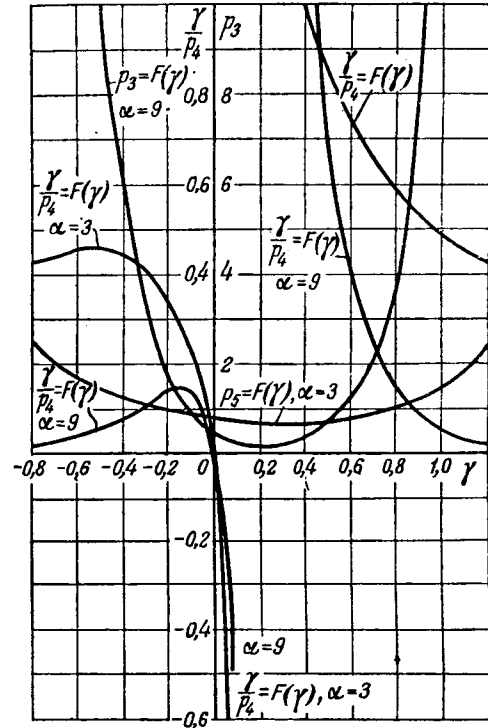


Рис. 2.

цательным. При  $\frac{A_4 - 9A_1 \omega^2}{A_5} > 0$  коэффициент  $\frac{\gamma}{p_4}$

должен быть отрицательным, что может быть только при положительном  $\gamma$ . Кроме того, при некотором  $\gamma$  отношение  $\frac{\gamma}{p_4}$  обращается в бесконеч-

ность (для  $\alpha = 9$ ,  $\frac{\gamma}{p_4} = -\infty$  при  $\gamma \cong 0,2$ ).

Следовательно, для этого условия кривая индукции имеет уплощенный вид (заостренная форма напряжения) и отношение третьей гармоники к первой не может превосходить некоторой величины, определяемой коэффициентом  $\alpha$ , т. е. формой кривой намагничивания, насыщенного дросселя. Для  $\frac{A_4 - 9A_1 \omega^2}{A_5} < 0$  коэффициент

$\frac{\gamma}{p_4}$  должен быть положительным, что возможно при  $\gamma > 0$  и  $\gamma < 0$ . В области положительных значений  $\gamma$  коэффициент  $\frac{\gamma}{p_4}$  изменяется от  $\infty$  до 0, а

при отрицательных  $\gamma$  кривая  $\frac{\gamma}{p_4} = F(\gamma)$  (рис. 2)

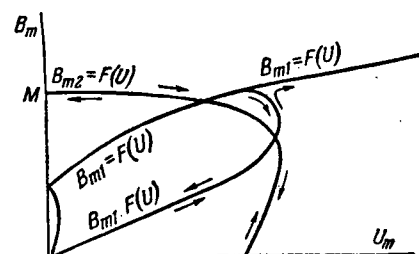


Рис. 3.



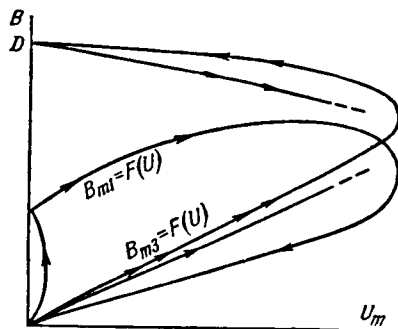


Рис. 4.

начинается с 0, затем при некотором  $\gamma$  достигает положительного максимума и, наконец, при  $\gamma = \infty$  приходит опять в нуль. Процесс может начаться только с отрицательных значений  $\gamma$  и кривая индукции будет иметь заостренную форму, так как значению  $\frac{\gamma}{p_4} = \infty$  соответствует бес-

конечно большое напряжение сети, а  $\frac{\gamma}{p_4} = 0$  снижает напряжение сети до нуля. С увеличением  $\gamma$  рост третьей гармоники происходит до определенной величины, а затем изменяется и ее фаза, так как  $\gamma$  должна либо перейти через нуль, что невозможно, или изменить знак.

Это явление может быть названо *резонансом третьей гармоники*. Кривые индукции при

изменении напряжения сети показаны на рис. 4. Изменение фазы третьей гармоники происходит в точке D. Существование обнаруженной анализом второй гармоники может быть объяснено кратко так: при работе схемы на начальном линейном участке ток невелик и напряжение сети уравнивается в основном обратной э. д. с. дросселя. За коленом кривая намагничивания характеризуется значительными ампервитками и переход от первого участка ко второму эквивалентен приключению емкости к некоторому напряжению, а при обратном ходе, наоборот, отключению. Очевидно, что переход от одного состояния к другому сопровождается появлением тока переходного режима, который создает заряд на емкости. Величина этого заряда определяется параметрами схемы и временем прохождения колена намагничивания. Если параметры схемы и максимальные значения индукции таковы, что заряд, созданный переходящим током в течение половины периода исчезает, то кривые напряжения и тока будут симметричными, если же заряд за половину периода не исчезает, то кривые будут несимметричными и появятся четные гармоники. При задержке заряда на конденсаторе не только в течение второй половины периода, но и в течение нескольких периодов, как показывает опыт, возможно появление субгармоники.

[17 11. 1948].



### КОНФЕРЕНЦИЯ ЧИТАТЕЛЕЙ ЖУРНАЛА „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

*В Свердловске в сентябре 1949 г. состоится однодневная конференция читателей журнала „Электричество“ для выявления и обсуждения запросов читателей к журналу.*

*Редакция журнала и Правление ВНИТОЭ приглашают свердловских и всех уральских читателей журнала „Электричество“ принять активное участие в работе конференции, о дне и месте открытия которой будет помещена информация в местной прессе.*

## Перекрытие анодных токов

**Кандидат техн. наук А. Ф. ГИКИС**

*Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта*

### Основные соотношения.

Ток выпрямителя, прежде чем перейти с одного анода на другой, благодаря индуктивности питающей сети, некоторое время течет по обоим анодам. Угол, соответствующий доле периода, когда наблюдается это явление, называется углом перекрытия  $\gamma$ . Схема заме-

щения трехфазного выпрямителя с одновременно работающими анодами  $b$  и  $c$  (рис. 1) по сути представляет собою схему короткого замыкания фаз  $b$  и  $c$  с одновременным присоединением общей точки к нейтрали через сопротивление нагрузки  $Z_n$ . Угол перекрытия зависит от величины токов, которые имеют место при этом несимметричном режиме. Дэлленбах и Герекке, а за ними и другие исследователи, определяли токи при перекрытии, т. е. токи несимметрично загруженной многофазной системы, по формулам, примененным лишь для систем, симметрично нагруженных. Допущение это может повести к большим неточностям и неправильным выводам в случае мощных выпрямителей.

Физически это допущение приводит к тому, что не учитываются специфические поля, появляющиеся при несимметричном режиме. Обычно также не принималась в расчет утечка через сопротивление нагрузки на нейтраль. При малых  $Z_n$ , особенно при аварийных режимах, это обстоятельство может стать источником больших ошибок. Между тем, вполне естественным в данном случае было бы применение метода симметричных составляющих, практически единственного метода, используемого теперь при исследовании несимметричных режимов многофазных систем.

Рассмотрим перекрытие анодных токов двух фаз  $m$ -фазного выпрямителя в общем случае. Расчетная схема при  $m = 3$  дана на рис. 1. Обозначим отдельные фазы рассматриваемой  $m$ -фазной системы индексами  $a, b, \dots, q, q+1, \dots, m$ . В общем случае при разложении несим-

Точность определения угла перекрытия зависит, главным образом, от того, насколько правильно подсчитан ток двухполюсного короткого замыкания, протекающий в цепи, образованной двумя одновременно работающими анодами. Этот ток несимметричного режима во всех исследованиях определялся по формуле, применимой лишь для симметрично нагруженной системы. При значительных мощностях выпрямителей такое допущение может повести к большим неточностям. Рассматривается возможность определения тока коммутации при помощи метода симметричных составляющих, что позволит получить более точные результаты и даст лучшее представление о физической стороне процесса.

метричных токов и напряжений такой системы придется иметь дело с  $m$ -симметричными системами токов и напряжений. Введем для симметричных составляющих индексы 1, 2, ...,  $k$  ...,  $m$ . Влияние дуги учитывать не будем.

Исходными данными для подсчета токов явля-

ются очевидные соотношения:

$$\dot{U}_g = \dot{U}_{g+1} = \dot{I}_d Z_n, \quad (1)$$

$$i_a = i_b = \dots = i_m = 0, \quad (2)$$

кроме  $i_q$  и  $i_{q+1}$  — токов, протекающих по одновременно горящим анодам,

$$i_a + i_{a+1} = i_d, \quad (3)$$

$I_d$  — ток в нагрузочном сопротивлении  $Z_n$ .

Несимметричную систему токов можно разложить на симметричные составляющие:

$$\left. \begin{aligned} i_{a1} &= \frac{1}{m} [a^{q-1} i_q + a^q i_{q+1}], \\ . &. \\ . &. \\ i_{ak} &= \frac{1}{m} [a^{k(q+1)} i_q + a^{kq} i_{q+1}], \\ . &. \\ . &. \\ i_{am} &= \frac{1}{m} [i_q + i_{q+1}], \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

здесь  $a = \varepsilon^{j \frac{2\pi}{m}}$ .

Применяя закон Кирхгофа отдельно для то-

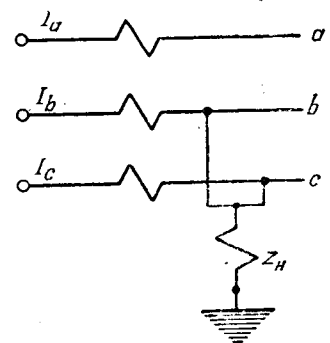


Рис. 1. Схема замещения цепи с трехфазным выпрямителем при перекрытии фаз  $b$  и  $c$ .

ка каждой последовательности фазы  $q$  и учитывая (1), (2), (3), можно получить необходимые выражения для токов при одновременном горении фаз  $q$  и  $q+1$ :

ности питающей сети с учетом трансформаторов выпрямителя.

Переходная составляющая коммутационного тока определится из начальных условий. Мгно-

$$i_q = \frac{m \dot{E}_a \left[ a^{1-q} \sum_{k=1}^m Z_k - a^{k-q} \sum_{k=1}^m a^k Z_k + a^{-q} m(a-1) Z_H \right]}{\left( \sum_{k=1}^m Z_k \right)^2 - m Z_H \left[ \sum_{k=1}^m Z_k (a^k + a^{-k} - 2) \right] - \sum_{k=1}^m a^{-k} Z_k \sum_{k=1}^m a^k Z_k}, \quad (5)$$

$$i_{q+1} = \frac{-m \dot{E}_a \left[ m Z_H (a^{1-q} - a^{-q}) + \sum_{k=1}^m Z_k (a^{1-k-q} - a^{-q}) \right]}{\left( \sum_{k=1}^m Z_k \right)^2 - m Z_H \left[ \sum_{k=1}^m Z_k (a^k + a^{-k} - 2) \right] - \sum_{k=1}^m a^{-k} Z_k \sum_{k=1}^m a^k Z_k}. \quad (6)$$

$$i_d = \frac{a^{-q} m \dot{E}_a \sum_{k=1}^m Z_k (a - a^k - a^{1-k} + 1)}{\left( \sum_{k=1}^m Z_k \right)^2 - m Z_H \left[ \sum_{k=1}^m Z_k (a^k + a^{-k} - 2) \right] - \sum_{k=1}^m a^{-k} Z_k \sum_{k=1}^m a^k Z_k}. \quad (7)$$

Наконец, ток, замыкающийся по фазам  $q$  и  $q+1$ , который можно назвать коммутационным током:

венное значение полного коммутационного тока с учетом переходной составляющей будет:

$$i = i_q - i_{q+1}, \quad (8) \quad i = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \psi) + \sqrt{2} I_2 e^{-\frac{t}{T}} \sin \psi. \quad (14)$$

$$i = \frac{a^{-q} \dot{E}_a \left[ m Z_H (a-1) 2 + \sum_{k=1}^m Z_k (a - a^k + a^{1-k} - 1) \right]}{\left( \sum_{k=1}^m Z_k \right)^2 - m Z_H \left[ \sum_{k=1}^m Z_k (a^k + a^{-k} - 2) \right] - \sum_{k=1}^m a^{-k} Z_k \sum_{k=1}^m a^k Z_k}. \quad (9)$$

Токи трехфазного выпрямителя получаются заменой  $m$  на 3. В соответствии с рис. 1 получим:

$$i_b = \frac{\dot{E}_a [(a^2 - 1) Z_2 + (a^3 - a) (Z_0 + 3 Z_H)]}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2) (Z_0 + 3 Z_H)}, \quad (10)$$

$$i_c = \frac{\dot{E}_a [(a - 1) Z_2 + (a - a^2) (Z_0 + 3 Z_H)]}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2) (Z_0 + 3 Z_H)}, \quad (11)$$

$$i_d = \frac{-3 \dot{E}_a Z_2}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2) (Z_0 + 3 Z_H)}, \quad (12)$$

$$i = \frac{\dot{E}_{bc} [Z_2 + 2 (Z_0 + 3 Z_H)]}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2) (Z_0 + 3 Z_H)}. \quad (13)$$

Значения  $I$  и  $\psi$  определяются из (13). Примем [Л. 7], что перекрытие начинается в момент, когда  $\dot{E}_b = \dot{E}_c$ , т. е. когда  $\dot{E}_{bc} = 0$ , и заканчивается как только мгновенное значение  $I_d$  становится равным обратной величине  $I$ :

$$i = -i_d.$$

Направим  $\dot{E}_{bc}$  по оси действительных количеств. Будем вести начало отсчета с момента, когда  $\dot{E}_{bc} = 0$ . Тогда началу перекрытия будет соответствовать  $\omega t = 0$  и концу  $\omega t = \gamma$ . Согласно (12),

$$i_d = \frac{-j \sqrt{3} \dot{E}_{bc} Z_2}{Z_1 Z_2 + (Z_1 + Z_2) (Z_0 + 3 Z_H)}. \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет определить

$$I_d \text{ и } \psi_d = \psi + \frac{\pi}{2}.$$

Здесь  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_0$  — соответственно, сопротивления прямой, обратной и нулевой последователь-

$$i_d = \sqrt{2} I_d \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} - \psi_d \right); \quad (16)$$

(14) и (16) дают возможность определить  $\gamma$ :

$$I [\sin(\gamma - \psi) + \varepsilon^{-\frac{t}{T}} \sin \psi] = I_d \sin \left( \frac{\pi}{2} + \psi_d - \gamma \right). \quad (17)$$

Из (17) можно найти величину угла перекрытия  $\gamma$  для любого вида нагрузки. В практически встречающихся случаях представляется возможным ввести допущения, упрощающие выражение для  $\gamma$ . Так, почти всегда можно принять  $\psi = \frac{\pi}{2}$  и  $\varepsilon^{-\frac{t}{T}} = 1$ .

Если при этом считать, что на стороне выпрямленного тока отсутствует индуктивность  $Z_n = R_n$ ,

то (17) даст  $\cos \gamma = \frac{1}{1 + \frac{I_d}{I}}$ . В другом пре-

дельном случае, когда индуктивность в цепи выпрямленного тока весьма велика ( $Z_n \approx \infty$ ), выпрямленный ток не будет пульсировать:  $I_d = I_{cp} = \text{const}$ . В этом случае

$$\cos \gamma = 1 - \frac{I_{cp}}{I}.$$

**Схемы замещения цепей с выпрямителями.** Сопротивления различных последовательностей, входящие в выведенные выше формулы, определяются из обычных схем замещения. Некоторые особенности представляют лишь схемы замещения трансформаторов трехфазных [Л. 6] и шестифазных выпрямителей. В этих случаях приходится иметь дело с превращением шести симметричных компонент шестифазного тока на стороне выпрямителя в токи прямой, обратной и нулевой последовательностей питающей сети.

На рис. 2, а представлена схема потоков в стержне такого трансформатора. Токи первой последовательности вторичных обмоток трансформатора, расположенных на одном стержне, например  $I_{a1}$  и  $I_{d1}$ , создают потоки, совпадающие по фазе. В первичных обмотках благодаря этому будут наведены токи (векторная диаграмма, рис. 2), из рассмотрения векторной диаграммы которых (рис. 2, а) можно заключить, что токи первой последовательности вторичной шестифазной обмотки трансформатора превращаются в систему токов прямой последовательности на трехфазной стороне. Этим полностью определяется схема замещения для токов первой последовательности.

Аналогично токи пятой последовательности превращаются в токи обратной последовательности в первичной обмотке.

Схема потоков второй последовательности приведена на рис. 2, б. Потоки, создаваемые фазами а и d вторичной обмотки, уничтожают друг друга. Значит токи второй последовательности шестифазной обмотки в трехфазную обмотку

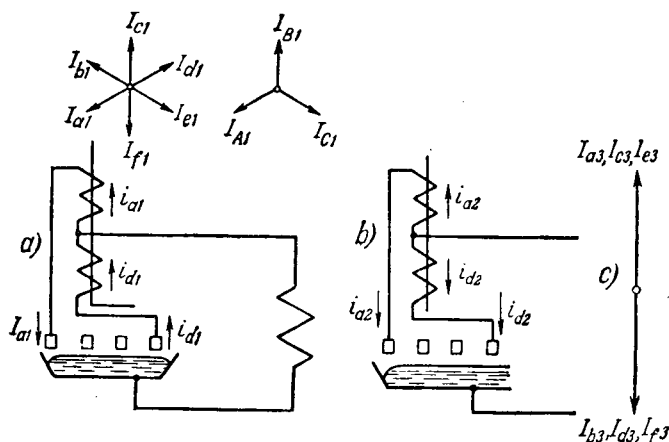


Рис. 2.

а — потоки токов первой последовательности в стержне трансформатора шестифазного выпрямителя; б — второй последовательности; в — векторы токов третьей последовательности шестифазного выпрямителя.

не передаются. Таким образом, в схему замещения токов второй последовательности войдет только сопротивление вторичной обмотки трансформатора. То же нужно сказать и о сопротивлении четвертой и шестой последовательности. Правда токи шестой последовательности будут проходить также по обмоткам уравнивательной катушки и по сопротивлению нагрузки. Это обстоятельство нужно учесть при определении сопротивления шестой последовательности.

Токи третьей последовательности ведут себя весьма своеобразно (рис. 2, в). Потоки токов третьей последовательности, созданные обмотками, расположенными на одном стержне, совпадают по фазе и наводят э. д. с. в первичной обмотке трансформатора. Легко видеть, что это э. д. с. нулевой последовательности, как совпадающие по фазе во всех трех обмотках. Они пульсируют с тройной частотой. В уравнивательной катушке токи третьей последовательности создадут потоки, совпадающие по фазе в каждой половине катушки. Учитывая большую реактивность катушки, а также утроенную частоту пульсаций потоков, можно токи третьей последовательности не принимать в расчет. Но нужно иметь в виду, что пульсация потоков третьей последовательности создает на зажимах уравнивательной катушки э. д. с. тройной частоты, которая уравнивает напряжения соседних анодов и позволяет им гореть одновременно.

**Экспериментальное исследование.** Определение угла перекрытия проводилось описанным в свое время стробоскопическим методом, который дает более высокую точность, чем осциллограф. Величина угла перекрытия зависит от коммутационного тока, и чтобы иметь возможность изменять этот ток, в питающую выпрямитель цепь были включены катушки переменной индуктивности. Во время опытов катушки включались либо в первичную, либо во вторичную цепь трансформатора. По местным условиям установку пришлось питать от сети, напряжение которой колебалось весьма заметно.

На рис. 3 представлен график для случая, когда катушки были выключены и угол перекрытия зависел только от величины тока нагрузки. Трансформатор был включен по схеме звезда—звезда. В пределах точности опыта кривые для соединения трансформатора треугольник—звезда повторяют график рис. 3.

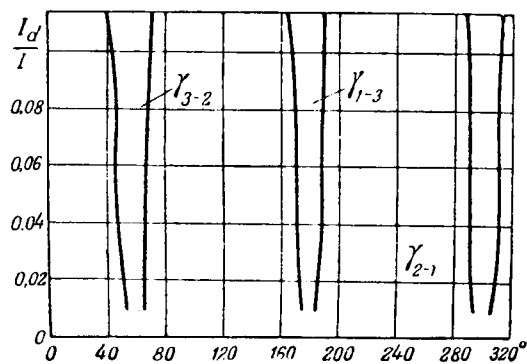


Рис. 3. Угол перекрытия при включении трансформатора по схеме звезда—звезда без добавочных сопротивлений.

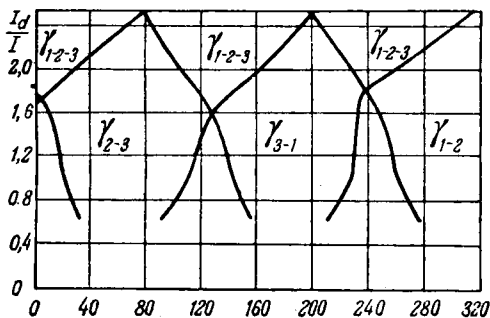


Рис. 4. Угол перекрытия при включении добавочных сопротивлений в первичную цепь трансформатора.

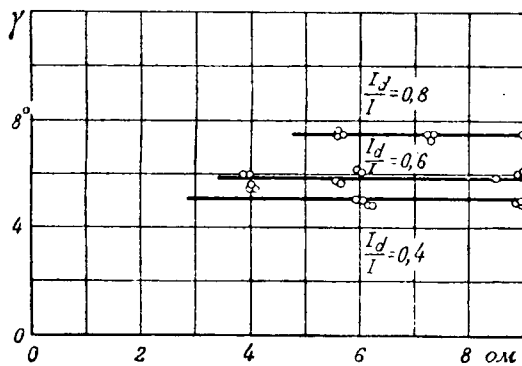


Рис. 5. Угол перекрытия в зависимости от добавочных сопротивлений.

На рис. 4 приведены результаты опытов, когда угол перекрытия изменялся за счет тока коммутации путем регулирования индуктивных катушек, включенных в цепь переменного тока. Катушки были включены в первичную цепь трансформатора. Практически же результаты были получены при включении сопротивлений во вторичную цепь трансформатора. Опыт показывает, что независимо от места включения добавочного реактивного сопротивления, начиная с определенного момента горят все три анода.

Был проведен ряд опытов, когда угол перекрытия менялся в зависимости от величины выпрямленного тока при включенных со стороны сети неизменных реактивных сопротивлениях. Эти сопротивления (приведенные значения) давали определенный угол перекрытия независимо от того, как они подключались по отношению к трансформатору.

На рис. 5 построены кривые наблюдаемых углов в зависимости от величины добавочных сопротивлений, ко-

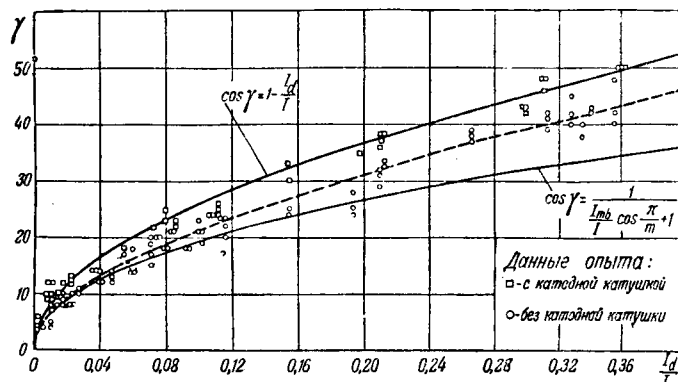


Рис. 6. Теоретические и экспериментальные кривые для угла перекрытия.

торые при опытах включались как во вторичную цепь трансформатора, так и в первичную. Опыт показал, что угол перекрытия не зависит от места включения реактивных сопротивлений по отношению к трансформатору.

На рис. 6 даны кривые угла перекрытия в зависимости от отношения рабочего тока к коммутационному, построенные по полученным выше формулам. Точки соответствуют опытным данным.

Изложенный метод увеличивает число расчетных схем замещения, но можно каждую схему — схему каждой последовательности, рассчитывать на одну фазу.

В каждой из таких схем приходится учитывать все элементы сети, по которым протекает ток данной последовательности, независимо от расположения данного элемента по отношению к трансформатору выпрямителя. Подобно тому, как при расчете токов несимметричных режимов в обычных трехфазных цепях тока, например, нулевой последовательности, протекают не во всех элементах цепи, в случае шестифазного выпрямителя токи второй, четвертой, шестой и, частично, третьей последовательности также не могут проникать далее вторичной обмотки трансформатора, так что в расчет приходится вводить только сопротивления вторичной обмотки соответствующих последовательностей. Поступать так приходится только потому, что в остальных частях схемы токов данной последовательности нет.

### Литература

1. М. П. Костенко, Л. Р. Нейман, Г. Н. Блазевич. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками. Изд. АН СССР, 1946.
2. К. А. Круг. Электромагнитные процессы в установках с управляемыми ртутными выпрямителями. ОНТИ, 1935.
3. А. Ф. Гикис. Перекрытие анодных токов в выпрямителе. Известия Новочеркасского Индустриального института (НИИ), т. 10, 1940.
4. А. Ф. Гикис. Метод симметричных составляющих в применении к многофазным выпрямителям. Известия НИИ, т. 10, 1940.
5. А. Ф. Гикис. Применение метода симметричных составляющих к теории трехфазного выпрямителя. Известия НИИ, т. 12, 1941.
6. А. Ф. Гикис. Метод симметричных составляющих и несимметричная нагрузка трансформаторов. Известия НИИ, т. 12, 1941.
7. Дэлленбах и Герекке. Соотношение между силами токов и напряжениями в мощных выпрямительных установках. Перевод под редакцией П. Л. Калантарова. Кубуч, 1929.
8. D. C. Prince und V. D. G. Quacksilberdampfgleichrichters. R. Oldenburg, 1931.
9. Marti and Winograd. Mercury Arc Power Rectifiers. Mc. Graw-Hill, 1930.
10. А. Глязер и К. Мюллер-Любек. Теория электронных и ионных преобразователей тока. Трансжелдориздат, 1938.

## Параметры емкостного делителя

**Кандидат техн. наук, доц. Е. В. КАЛИНИН**

*Уральский политехнический институт им. Кирова*

При исследовании нестационарных процессов катодным осциллографом часто применяют емкостный делитель. Если делитель приходится помещать на некотором расстоянии от осциллографа, волновые процессы в кабеле, соединяющем осциллограф с делителем, могут вызвать сильные искажения записи измеряемого явления, если не принять мер к компенсации искажений. Габор [Л. 1] и Барч [Л. 2] разработали частично компенсирующие эти искажения схемы (рис. 1),

Проанализированы существующие типы делителей. В результате теоретического и экспериментального исследования выяснено, что в реальных условиях параметру делителя можно сильно облегчить по сравнению с тем, что считалось необходимым до сих пор. Разработан метод расчета делителя с кабелем между осциллографом и делителем, позволяющий быстро оценить точность делителя при любой волне.

если параметры делителя выбрать такими, что начальное напряжение на выходе равно конечному, т. е.  $C_1 + C_2 = K + C_2$  ( $K$  — емкость кабеля), то при том же  $\gamma = K : (C_1 + C_2 + C_3) =$

$\approx 1/10$ , который был применен при получении кривой 2 (рис. 2), воспроизведение записи значительно улучшается и теперь изображается кривой 3, причем ошибка меньше 2%. Но и при „улучшенной“ схеме делителя  $\nu$ , в случае даже небольшой неточности выбора параметров делителя, как видно из кривой 4 (рис. 2), получается заметное искажение. Здесь  $\eta \approx 1/10$ ; но  $C_1 + C_3 \neq K + C_3$ , а  $C_3 = C_1 + C_2$ . При этом начальная ошибка равна 10%, и ход кривой значительно выше, чем для кривой 2, что можно скорее считать отрицательным явлением, так как в простой схеме б (кривая 2, рис. 2) уже после первого отражения кривая напряжения на осциллографе почти не отличается от измеряемой, что нельзя, сказать про схему в.

Таким образом, по Габору и Барчу получается, что для достижения хорошей точности записи нужно иметь делитель с большими концентрированными емкостями и сами параметры делителя выбрать точно. Барч указывает, что для улучшения точности делителя можно включать сопротивления последовательно с  $C_1$  и  $C_2$  (рис. 1,2). Комбинируя величины сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и

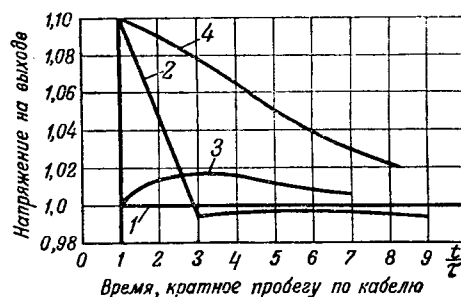


Рис. 2. Поведение при прямоугольной волне делителей по рис. 1.

1 — измераемая прямоугольная волна; 2 — запись при схеме б;  $\eta = K : (C_1 + C_2) = 1/10$ ; 3 — запись при схеме в;  $\eta = K : (C_1 + C_3 + C_2) = 1/10$ ;  $C_1 + C_2 = K + C_3$ ; 4 — запись при схеме в;  $\eta = 1/10$ ,  $C_1 + C_2 = C_3$ .

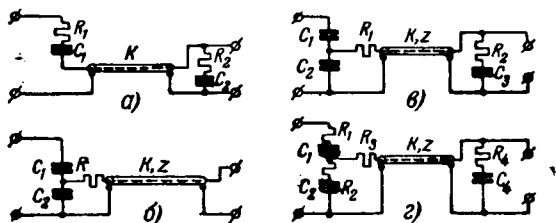


Рис. 1. Схема емкостных делителей с кабелем между осциллографом и делителем.

но выбор параметров схем ими рекомендован неправильно. При расчете эти авторы исходили только из анализа поведения схем при прямоугольной измеряемой волне, в то время как реальные волны имеют конечную крутизну, а на волнах конечной крутизны искажение уменьшается.

Результаты расчета Барча для некоторых частных случаев изображены на рис. 2. Кривая 1 показывает измеряемую прямоугольную волну, а кривая 2 — запись при схеме б (рис. 1) при отношении емкости кабеля к полной концентрированной емкости делителя  $\eta = K:(C_1 + C_2) = 1/10$ . Как видно, в начальный момент ошибка составляет 10%. Подобная же ошибка получается и в схеме а при  $\eta = 1/10$ . Для того, чтобы уменьшить ошибку измерения прямоугольной волны при простых схемах а и б нужно соответственно увеличить концентрированную емкость делителя или уменьшить емкость кабеля. Так как это по ряду причин не всегда возможно, Барч разработал „улучшенную“ схему с разделенной емкостью, показанную на схеме в. При этой схеме,

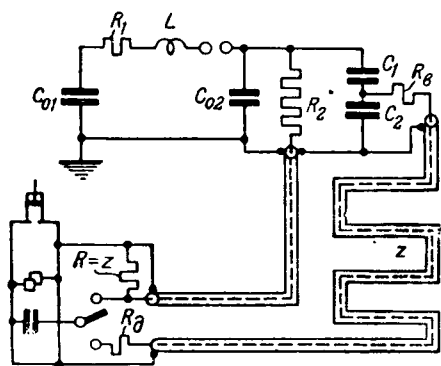


Рис. 3. Схема установки для экспериментального исследования делителя.

$R_3$ , можно, казалось бы, улучшать точность делителей. Но значение  $R_1$  приходится брать сравнительно большим, и поэтому его паразитная емкость на землю, не учитываемая Барчем, исказит запись. Поэтому мы в дальнейшем схеме  $z$  (рис. 1) рассматривать не будем.

Как указано, все свои рекомендации Барч давал, исходя из прямоугольной формы измеряемой волны. Учет последовательных отражений велся классическим операторным методом, причем даже при единичной волне при схеме  $b$  (рис. 1) для седьмого отражения необходимо было рассчитать около 700 слагаемых, каждое из которых содержало экспоненциальные сомножители. Естественно, что при подобном методе расчета трудно вести углубленный анализ схем.

Как показали исследования автора настоящей статьи, при измерении реальных волн конечной крутизны точность делителя сильно повышается и его параметры можно сильно облегчить по сравнению с тем, что указывает Барч.

Изучение делителей проиоводилось сначала экспериментально. Затем был разработан удоб-

ный расчетный метод, позволяющий быстро рассчитать напряжение на осциллографе при любой измеряемой волне.

**Экспериментальное исследование.** Экспериментально исследовалась схема делителя  $b$  (рис. 1). Так как первоначальной целью работы являлось определение параметров делителя для измерения восстанавливающихся напряжений, то форма волны исследуемого явления содержала колебания, наложенные на аperiodическую составляющую. Экспериментальная установка (рис. 3) состояла из импульсного генератора  $C_{01}$ , разряжающегося через демпфирующее сопротивление  $R_1$  и катушку  $L$  на емкость  $C_{02}$ , шунтированную активным сопротивлением  $R_2$ , служащим одновременно эталонным делителем. Исследуемый емкостный делитель  $C_1, C_2$  подсоединялся параллельно омическому. Длина кабеля емкостного делителя была равна  $l=50$  м. Параметры омического делителя были таковы, что его можно было, безусловно, считать эталонным.

При экспериментальном исследовании изучалось влияние формы волны, величины „волнового“ сопротивления  $R_0$ , включенного между делителем и кабелем, влияние демпфирующего сопротивления  $R_0$ , включенного перед пластинами катодного осциллографа, влияние параметров кабеля делителя. На рис. 4 показано влияние величины сопротивления  $R_0$  ( $R$  в схеме  $b$  рис. 1) при относительно крутой волне и емкости кабеля, во много раз превосходящей концентрированную емкость делителя. Осциллограмма  $a$  показывает измеряемое напряжение, воспроизведенное эталонным делителем. Из рассмотрения остальных кривых видно, что волна с фронтом 0,8 мксек, лишь немного превосходящим удвоенное время пробега по кабелю (0,6 мксек), регистрируется почти без искажения

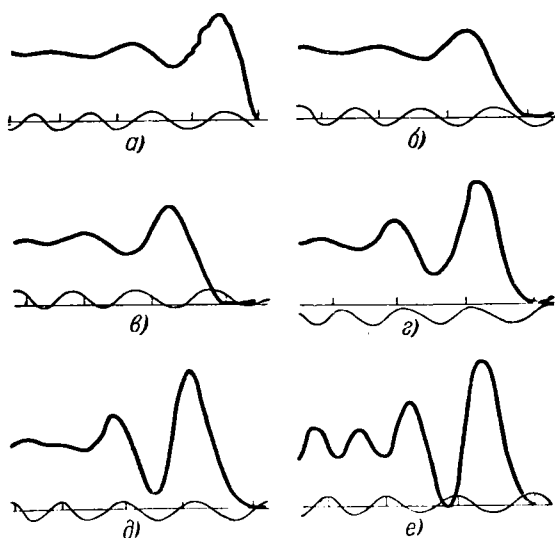


Рис. 4. Влияние величины  $R_0$  при крутой волне;  $C_1=200$  мккф;  $C_2=3000$  мккф. Кабель:  $l=50$  м;  $T=0,6$  мксек;  $K=14\,400$  мккф;  $z=75$  ом;  $R_0=4\,000$  ом.

$a$  — измеряемая волна, фронт 0,8 мксек;  $б$  —  $R_0=120$  ом;  $в$  —  $R_0=75$  ом;  $г$  —  $R_0=30$  ом;  $д$  —  $R_0=10$  ом;  $е$  —  $R_0=0$ .

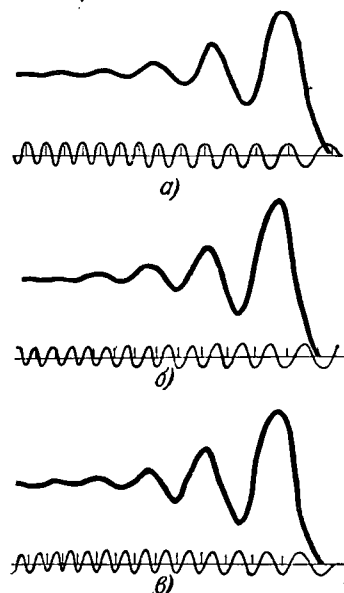


Рис. 5. Влияние величины  $R_0$  при волне средней крутизны;  $C_1=200$  мккф;  $C_2=3000$  мккф;  $K=14\,400$  мккф;  $R_0=4\,000$  ом.

$a$  — измеряемая волна, фронт 1,2 мксек;  $б$  —  $R_0=50$  ом;  $в$  —  $R_0=0$ .

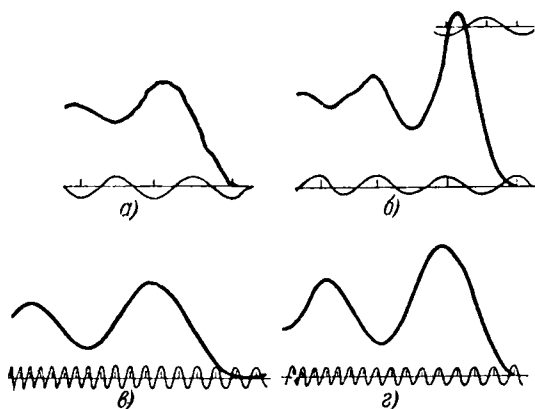


Рис. 6. Емкостный потенциометр при  $C_2=0$ ;  $C_1=200$  мкмкф;  $z$  кабеля—75 ом;  $K=14\,400$  мкмкф;  $R_d=4\,400$  ом.

$a$ —измеряемая крутая волна, фронт 0,8 мксек;  $b$ —запись ее емкостным делителем при  $R_d=0 \div 120$  ом;  $c$ —измеряемая пологая волна, фронт 5 мксек;  $d$ —запись ее емкостным делителем при  $R_d=0 \div 120$  ом.

упрощенной схемой делителя  $b$  (рис. 1) при  $R_d=75$  ом, равном волновому сопротивлению кабеля, хотя концентрированная емкость делителя 3200 мкмкф меньше емкости кабеля ( $K=14\,400$  мкмкф). Согласно расчетам Барча (при прямоугольной волне) ошибка была бы больше 300%. Эти результаты вызвали у нас в первый момент недоумение. Казалось невероятным, что такая относительно крутая волна хорошо воспроизводится. После расчета этого случая по указанному ниже методу оказалось, что опытные данные правильны. Когда  $R_d$  отличается от значения волнового сопротивления кабеля, появляются искажения. Увеличение  $R_d$  по сравнению с  $z$  кабеля сглаживает пики; при уменьшении  $R_d$  пики выявляются резче. При этих исследованиях последовательно с осциллографом на выходе кабеля было включено демпфирующее сопротивление  $R_d=4000$  ом. При отсутствии  $R_d$  были замечены дополнительные колебания, причину которых установить не удалось; возможно они были вызваны несовершенными контактами (кабель был составлен из отрезков).

При волне с фронтом в 1,2 мксек, всего в 2 раза превосходящим время пробега волны по кабелю (0,6 мксек), как видно из рис. 5, искажения почти незаметны даже при  $R_d=0$ . При еще более пологих волнах воспроизведение волны еще точнее и независимее от параметров делителя. При фронте в 5 мксек искажение незаметно, независимо от того, есть ли  $R_d$  и  $C_2$  или их нет.

Интересны результаты исследования делителя при  $C_2=0$ , показанные на рис. 6. Здесь не может быть компенсирующих искажение отражений от емкости  $C_2$ , и поэтому крутые пики передаются преувеличенными. Если, как это делается обычно, проградировать делитель на хвосте пологой волны и затем считать коэффициент деления постоянным, мы сделаем большую ошибку. Например, значения разрядных напряжений при коротких предразрядных време-

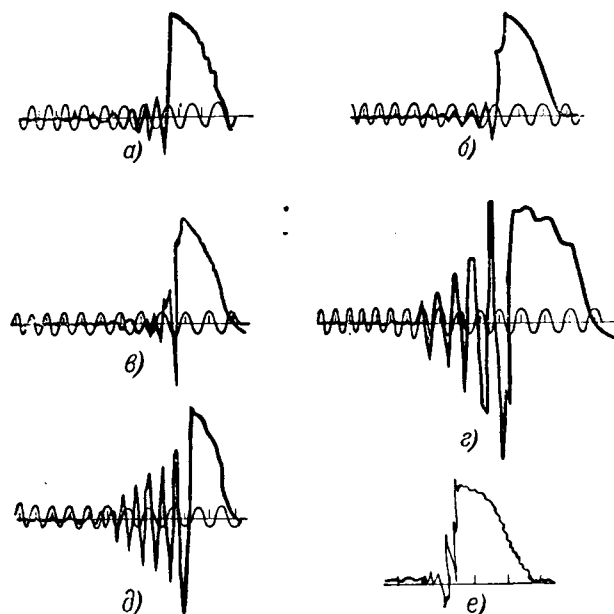


Рис. 7. Емкостный потенциометр при срезанной волне:  $C_1=210$  мкмкф;  $C_2=3\,000$  мкмкф;  $K=14\,400$  ом.

$a$ —измеряемая волна;  $b$ — $R_d=75$  ом;  $R_d=2\,000$  ом;  $b'$ — $R_d=75$  ом;  $R_d=0$ ;  $c$ — $R_d=0$ ,  $K_d=4\,000$  ом;  $d$ — $C_2=0$ ;  $R_d=75$  ом;  $R_d=4\,000$  ом;  $e$ —тот же делитель, но кабель воздушный;  $l=50$  м;  $K=1\,000$  мкмкф.

нах при съемках вольтсекундой характеристики окажутся преувеличенными. Пологие волны, как мы уже упоминали, и при  $C_2=0$  передаются правильно (осциллограммы  $c$  и  $e$ , рис. 6).

Весьма характерные результаты дали съемки срезанных волн, показанные на рис. 7. При  $R_d=0$  или  $C_2=0$  на записи заметны сильные паразитные колебания после среза волны. Таким образом, не следует отказываться от  $R_d$  и  $C_2$ , когда надо регистрировать крутые срезы или пики, даже если основная волна пологая. Таким образом, из наших исследований следует, что при волнах конечной крутизны ошибка значительно меньше, чем дается Барчем.

При нашей разработке емкостного делителя, которая производилась со специальной целью для конкретной лаборатории разрывной мощности, в нашем распоряжении имелась хорошая лабораторная установка (экспериментальная часть работы производилась на заводе „Электроаппарат“) и мы могли выбрать параметры емкостного делителя чисто экспериментальным путем. Иного пути и не было, так как существовавшие в то время методы расчета были трудоемки, а для любой формы волны и вовсе неприменимы.

В процессе исследования нами разработан графо-аналитический метод расчета делителя, позволяющий быстро производить расчет делителя при любой форме волны. При этом используется метод подкасательной [Л. 3] и метод „суммарной“ волны [Л. 4, 5].

**Метод расчета делителя с кабелем.** Сначала рассмотрим расчет более сложной схемы  $b$  (рис. 1). Пренебрежем реакцией делителя на сеть, т. е. будем считать сеть бесконечно мощной, так как емкость  $C_1$  делителя мала и поэтому влияние



волнового сопротивления сети мало. Тогда, при  $R_1 = R_2 = R_g$ , как нетрудно показать, при воздействии на делитель прямоугольной волны  $U$  в кабель войдет волна, определяемая выражением (1); влияние отражений пока не рассматриваем

$$u_k = \frac{z}{R_g + z} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot U e^{-\frac{t}{(R_g + z)(C_1 + C_2)}} = UK_1 e^{-at} = U \cdot A(t), \quad (1)$$

где

$$K_1 = \frac{z}{R_g + z} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}; a = \frac{1}{(R_g + z)(C_1 + C_2)}. \quad (2)$$

Применив к выражению (1) интеграл Дюамеля вида

$$u = \frac{d}{dt} \int_0^t u_\tau A(t - \tau) d\tau, \quad (3)$$

найдем входящую в кабель волну  $u_k$  при любой форме волны, воздействующей на делитель:

$$u_k = \frac{d}{dt} \int_0^t u_\tau K_1 e^{-a(t-\tau)} d\tau = K_1 u_t - a e^{-at} \int_0^t e^{a\tau} \cdot K_1 u_\tau d\tau. \quad (4)$$

показать, напряжение отраженной от осциллографа волны найдется из выражения

$$U_{kot} = a_1 e^{-a_1 t} \int_0^t e^{a_1 \tau} \cdot U_{kot} \cdot d\tau, \quad (5)$$

где

$$a_1 = \frac{1}{(R_g + z) C_2}. \quad (6)$$

Таким же образом, обозначив  $U_{pt}$  волну любой формы, набегающую на делитель, найдем волну, отраженную от делителя:

$$U'_{pt} = a e^{-at} \int_0^t e^{a\tau} \cdot U_{pt} \cdot d\tau. \quad (7)$$

Волны (5) и (7) легко строятся методом подкасательной, если известны воздействующие волны  $U_{kot}$  и  $U_{pt}$ .

Вспомнив, что при наших рассуждениях мы

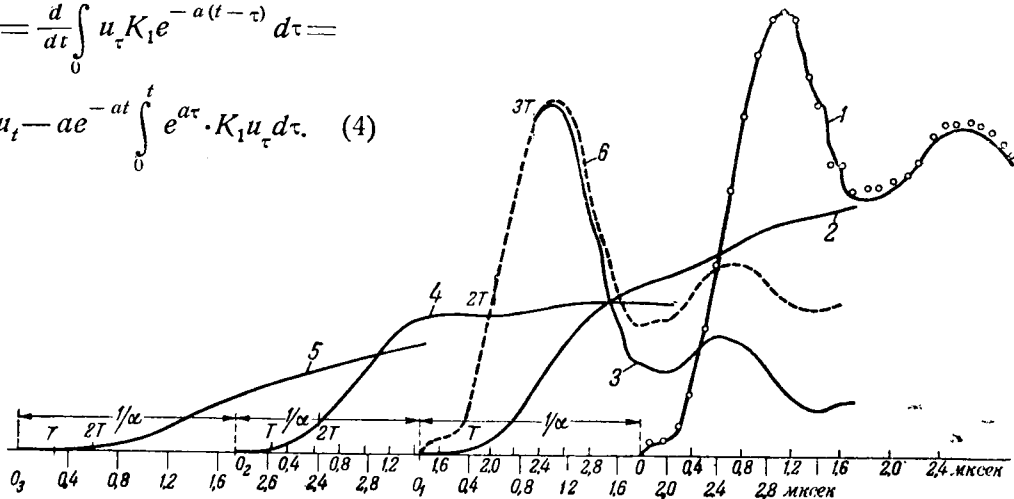


Рис. 8. Графический способ расчета делителя по рис. 1, в.

$$1 - \text{измеряемая волна } K_1 U_t; 2 - a e^{-at} \int_0^t K_1 U_\tau e^{a\tau} d\tau; 3 - u_k = K_1 U_\tau - a e^{-at} \int_0^t K_1 U_\tau e^{a\tau} d\tau; 4 - U_{pt} = U'_{kot} = a e^{-at} \int_0^t U_{kot} e^{a\tau} d\tau; 5 - U'_{pt} = a e^{-at} \int_0^t e^{a\tau} \cdot U_{pt} d\tau; 6 - U_{kot} = u_k + U'_{pt}(t-T)$$

Волну  $u_k$  легко построить графо-аналитически. Для этого нужно методом подкасательной графически [Л. 3] определить второй член уравнения и затем, также графически, вычесть его из члена  $K_1 u_t$  ( $u_t$  — измеряемая волна). Форма волны  $u_k$  искажена по сравнению с измеряемой волной  $K_1 u_t$  за счет влияния интегрального второго члена уравнения (4).

Прежде чем определить, как рассчитать напряжение на осциллографе с учетом отражений, найдем уравнения волн, отраженных от осциллографа и делителя при любой форме набегающей на них волны.

Обозначим  $U_{kot}$  волну любой формы набегающую по кабелю на осциллограф; как нетрудно

никаких ограничений к форме волн не предъявляли, перейдем к расчету напряжения на осциллографе с учетом отражений. Расчет проведем на примере расчета делителя по рис. 1, в со следующими параметрами:  $C_1 = 0,0002$  мкф;  $C_2 = 0,0054$  мкф;  $K = 0,01$  мкф;  $C_3 = 0,0046$  мкф;  $l = 50$  м;  $T = 0,3$  мксек.

Расчет ведется последовательными ступенями  $T$ , равными удвоенному пробегу волны по кабелю. Сначала находится методом подкасательной по уравнению (4) волна  $u_k$ , входящая в кабель, для всего времени воздействия измеряемой волны, т. е. в предположении, что кабель достаточно длинный. Это построение сделано на рис. 8. Для этого сначала строится  $K_1 U_t$ , а из

точки, сдвинутой на  $1/a$  относительно  $K_1 U_{pt}$ , строится  $ae^{-at} \int_0^t e^{a\tau} K_1 U_{pt} d\tau$ . Затем, при совмещении

нулей кривых 1 и 2, находится графически их разность, представляющая напряжение  $u_k$ . Если бы кабель был длиннее половины длины волны  $u_k$ , то  $u_k$  представляло напряжение волны, набегающей на осциллограф. Но вследствие последовательных отражений между осциллографом и делителем форма результирующей волны искажается, и приходится, как было сказано, вести расчет последовательными ступенями. К этому расчету мы и перейдем. На протяжении интервала  $O_1 - T$  (в данном случае 0,3 мксек) до прихода к осциллографу первой отраженной от делителя волны, на осциллограф воздействует только волна  $u_k$ , поэтому мы можем на этом протяжении рассчитать волну, отраженную от осциллографа  $U'_{kot}$ , что и сделано методом подкасательной на том же рис. 8. Для этого начало волны  $U'_{kot}$  сдвинуто на  $1/a$  относительно начала волны  $U_{kot}$ ; из этой точки  $O_2$  касательная скользит по кривой  $U_{kot}$  пока на протяжении 0,3 мксек ( $O_1 - T$ ). Найденная на протяжении  $O_2 - T$  волна  $U'_{kot}$  будет набегать на потенциометр, т. е.  $U'_{kot} = U_{pt}$ . Поэтому мы можем, условно положив  $t = 0$  в момент прихода волны к потенциометру, рассчитать на протяжении 0,3 мксек ( $O_3 - T$ ) волну  $U'_{pt}$ , отраженную от потенциометра. Это опять сделано графически на том же рисунке. Кривая  $U'_{pt}$  строится из точки  $O_3$ , отложенной на расстоянии  $1/a$  относительно  $O_2$  — начала кривой  $U_{pt}$ , причем касательная скользит по  $U_{pt}$  пока на протяжении  $O_2 - T$  (0,3 мксек). Найденное на интервале  $O_3 - T$  значение отраженной от делителя волны  $U'_{pt}$  сложится с волной  $u_k$

со сдвигом времени  $T$ ; поэтому прибавим на протяжении  $T - 2T$  к кривой  $u_k$  участок  $O_3 - T$  кривой  $U'_{pt}$ . Теперь мы можем методом подкасательной продолжить определение на протяжении  $T - 2T$  напряжения отраженной от осциллографа волны  $U'_{kot}$ ; для этого из точки  $T$  кривой  $U'_{kot}$  скользим по участку  $T - 2T$  кривой  $U_{kot}$ . Затем определяется на протяжении  $T - 2T$  отражение от делителя, складывается на  $2T - 3T$  с  $u_k$  и т. д. Ступенями длительностью  $T$  мы строим последовательно все необходимые для нас волны. Кривую напряжения на осциллографе получим, сложив при совмещении начала, кривые  $U_{kot}$  и  $U'_{kot}$ . На рис. 8 результат сложения нанесен кружочками около измеряемой кривой  $K_1 U_{pt}$ . Как видно, в данном случае искажения записи практически нет, хотя волна, входящая в кабель ( $u_k$ ), искажена.

Если делитель не имеет у осциллографа емкости  $C_3$ , расчет еще более упрощается, так как отпадает необходимость рассчитывать отраженную от осциллографа волну — волна отражается без искажения. Указанный способ расчета делителя настолько упрощает выбор параметров делителя, что может быть рекомендован во всех случаях практического выбора емкостного делителя.

#### Литература

1. Gabor. Успехи в деле осциллографирования блуждающих волн. Arch. f. El., т. 18, № 1, стр. 48-53, 1927.
2. Burgh. О делителях для катодных осциллографов. Phil. Mag., № 186, 1932.
3. М. В. Костенко. Метод подкасательной в применении к расчетам перенапряжений. Электричество, № 1, 1939.
4. Е. В. Калинин. Защитное действие разрядников с зависимым сопротивлением при близком прямом ударе молнии. Электричество, № 9, 1940.
5. М. В. Костенко. Вычисление перенапряжений в установках с многократными отражениями. Электричество, № 9, 1939.

[14. 1. 1949]



# Аналитический расчет характеристики асинхронного двигателя при динамическом торможении

Кандидат техн. наук В. К. МЕДУНОВ

Донецкий индустриальный институт им. Хрущева

Для приближенного расчета характеристики динамического торможения асинхронного двигателя обычно используется упрощенное уравнение следующего вида:

$$\frac{M_T}{M_{Tm}} = \frac{2}{\frac{s_{Tm}}{s} + \frac{s}{s_{Tm}}}, \quad (1)$$

где  $M_T$  и  $M_{Tm}$  — соответственно, текущее и опрокидывающее значения тормозных моментов, а  $s$  и  $s_{Tm}$  — относительные скорости вращения ротора:

$$s = \frac{n}{n_0}, \quad (2)$$

причем  $n_0$  — соответствует синхронной скорости вращения ротора.

Степень точности получаемых результатов расчета  $M_T$  по формуле (1) зависит от значений  $M_{Tm}$  и  $s_{Tm}$ , принятых в качестве исходных.

Пренебрегая увеличением тормозного момента за счет механических потерь и потерь в стали, опрокидывающий тормозной момент

$$M_{Tm} = \frac{0,975 \cdot 3}{n_0} \cdot \frac{E_f^2}{2 \cdot X} [\text{кгм}], \quad (3)$$

где  $E_f$  — э. д. с. ротора, индуцируемая полем статора;

$X$  — полное реактивное сопротивление цепи ротора, отнесенное к частоте 50 Гц.

Соответственно

$$s_{Tm} \approx \frac{r}{X}, \quad (4)$$

где  $r$  — активное сопротивление цепи ротора.

Для аналитических расчетов принимаем соединение обмотки ротора в звезду независимо от его фактического соединения. Поэтому в формулах (3) и (4)  $E_f$ ,  $X$ ,  $r$  приняты фазовые значения.

Известные методы расчета механических характеристик асинхронного двигателя при динамическом торможении являются весьма приближенными. Автор предлагает новые уравнения, пользуясь которыми возможно значительно снизить погрешности проектирования. Теоретические исследования иллюстрируются экспериментальными данными, полученными в лабораторных условиях.

Как известно, полное реактивное сопротивление  $X$  для естественной тормозной характеристики, отвечающей состоянию короткого замыкания синхронного генератора,

$$X = X_a + X_L, \quad (5)$$

где  $X_L$  и  $X_a$  — реактивные сопротивления, обусловленные рассеянием и реакцией якоря (от магнитного поля ротора).

Этому состоянию асинхронного двигателя отвечает прямая зависимость тока к. з. ротора от тока в обмотке возбуждения. Обозначив приведенный к обмотке ротора постоянный ток статора  $I_a$  через  $I_{a, np} = f(I_a)$ , получим  $E_f = X_a I_{a, np}$ .

Таким образом, уравнение (3) может быть преобразовано следующим образом:

$$M_{Tm} = \frac{0,975 \cdot 3}{n_0} \cdot \frac{I_{a, np}^2 X_a^2}{2X}. \quad (6)$$

Это уравнение показывает, что степень точности расчета величины опрокидывающего тормозного момента зависит только от величины принятых для расчета значений  $X$  и  $X_a$ . Аналогично и  $s_{Tm}$  также определяется этими реактивными сопротивлениями.

Значение насыщения для динамического торможения общеизвестно. Полное реактивное сопротивление  $X$  и его составляющие  $X_a$  и  $X_L$  в процессе торможения непрерывно изменяются и сохраняют постоянство только для ненасыщенных двигателей. Поэтому расчет опрокидывающего тормозного момента может быть основан на более или менее близких к следующим значениям  $X:X_0$  — ненасыщенный двигатель,  $X_c$  — насыщенный,  $X_m$  — истинное значение полного реактивного сопротивления при заданном токе возбуждения статора.

Значения реактивных сопротивлений  $X_0$  и  $X_c$  легко определить по данным характеристик

холостого хода и короткого замыкания при неподвижном роторе и возбуждения статора переменным током при  $f=50$  гц или вращающемся (со скоростью  $n=n_0$ ) при возбуждении статора постоянным током.

Из рассмотрения кривых рис. 1 очевидно, что определение  $X_0$  и  $X_c$  не представляет затруднений. Для определения  $X_m$  необходимо выполнить дополнительные, но весьма простые расчеты.

Как известно из теории динамического торможения<sup>1</sup>, насыщение двигателя зависит от результирующего намагничивающего тока, величина которого определяется уравнением

$$I_{рез} = I_{в.пр} + I_{рот} \quad (7)$$

Используя простые геометрические соотношения из подобия треугольников токов и напряжений, получим:

$$I_{рез\ m} = \frac{I_{в.пр}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \frac{X_{Lm}^2}{X_m^2}}, \quad (8)$$

где  $I_{рез\ m}$ ;  $X_{Lm}$  и  $X_m$  соответствуют  $M_{Tm}$ .

$\left[\frac{X_{Lm}}{X_m}\right]^2$  весьма мало (около 0,02) и приближенно

можно положить

$$I_{рез\ m} \approx \frac{I_{в.пр}}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

Пользуясь рис. 1 и формулой (9), легко установить величины всех упомянутых выше реактивных сопротивлений:  $X_m$ ,  $X_{ам}$  и  $X_{Lm}$ . Очевидно, что  $X_0 > X_m > X_c$ , причем  $X_c$  в 2—3 раза меньше, чем  $X_0$ .

На рис. 3 представлены известные [Л. 3] круговые диаграммы, соответствующие векторной диаграмме рис. 2 при переменной скорости вращения ротора. Цифрой 1 обозначено положение векторов для  $n \rightarrow n_0$ , а цифрой 2 для  $n \rightarrow 0$ .

Из рис. 3 очевидно, что расчет тормозной характеристики, основанной на постоянстве  $X_m$ , даст значительные погрешности. Причиной этого является следующее обстоятельство. При скорости вращения ротора, близкой к синхронной, магнитное поле ротора направлено под углом  $\alpha$ , близким к  $180^\circ$ , к магнитному полю статора (рис. 3), вследствие чего машина будет не насыщена и  $X = X_0$ . Соответственно при  $n \rightarrow 0$  угол  $\alpha$  приближается к  $90^\circ$ , ток ротора стремится к нулю и, следовательно, насыщение машины достигает своего максимума, т. е.  $X = X_c$ .

Для иллюстрации сделанного выше вывода на рис. 4 представлены характеристики, рассчитанные по уравнению (1), для  $X = X_0$  (кривая 4);  $X = X_c$  (кривая 1) и  $X = X_m$  (кривая 2). На том же рисунке представлена характеристика 3, отвечающая переменному значению  $X$ , обусловленному пределами: при  $n=0$ ,  $X = X_c$ ;  $n=n_0$ ,  $X = X_0$ ;  $n=n_m$ ,  $X = X_m$ . Кривая 3, как это будет

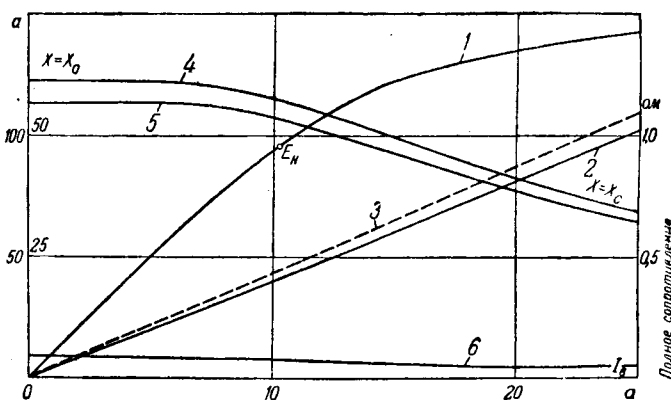


Рис. 1. Экспериментально определенные основные параметры ротора асинхронного двигателя при возбуждении статора постоянным током  $I_b$  и  $n=n_0$ .

1 — характеристика холостого хода  $E_f = f(I_b)$ ; 2 — характеристика короткого замыкания  $I_{рот} = f(I_b)$ ; 3 —  $I_{в.пр}$  — ток  $I_b$ , отнесенный к обмотке ротора при  $f=50$  гц; 4, 5, 6 — полные сопротивления ротора ( $X$ ,  $X_a$ ,  $X_L$ ), обусловленные переменным насыщением (асинхронный двигатель 11 квт, 720 об/мин, 380/220 в, 22/38 а с контактными кольцами).

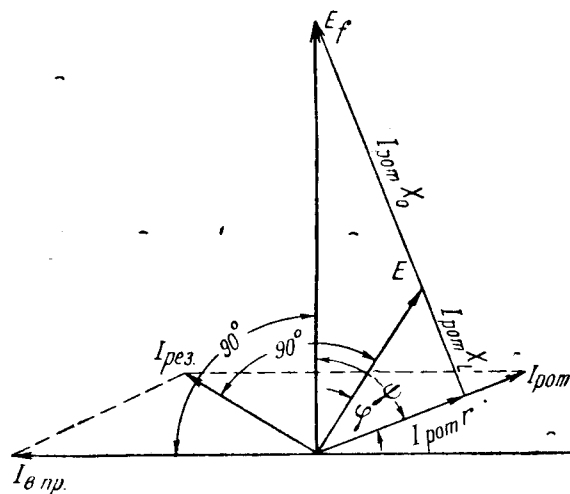


Рис. 2. Векторная диаграмма токов и напряжений асинхронного двигателя при динамическом торможении и к. з. роторе.

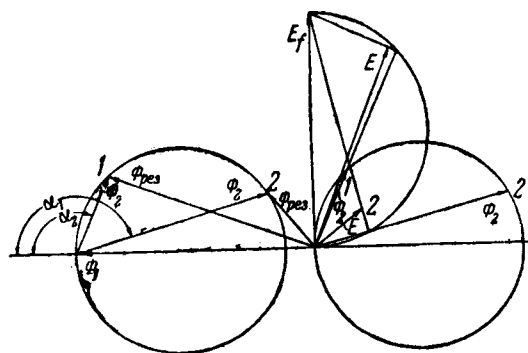


Рис. 3. Круговые диаграммы напряжений и магнитных потоков асинхронного двигателя при динамическом торможении.

<sup>1</sup> См. перечень литературы в конце статьи.

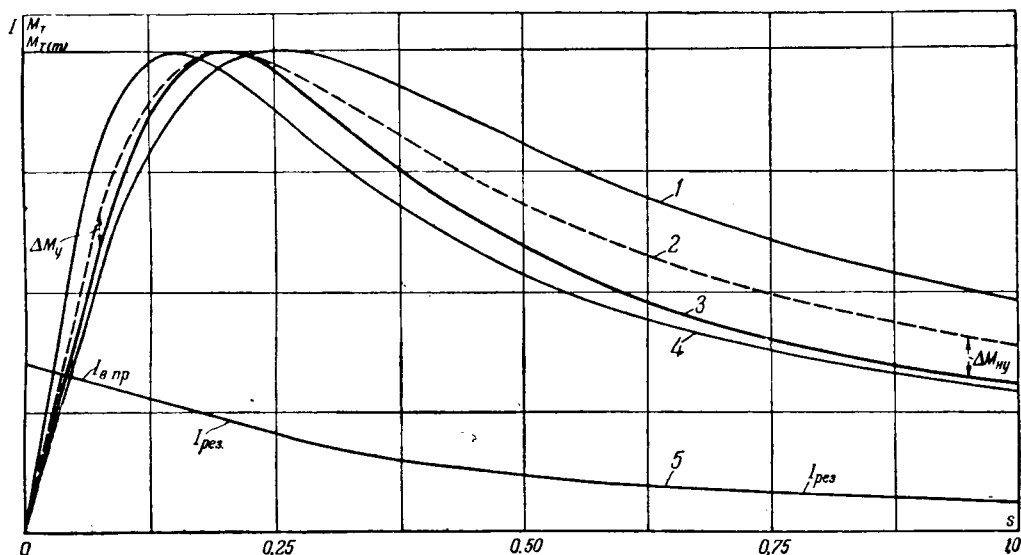


Рис. 4. Естественные тормозные характеристики асинхронного двигателя при различных методах учета насыщения.

показано ниже, является наиболее близкой к реальной тормозной естественной характеристике. Переходим к обоснованию уравнения, отвечающего кривой 3.

Исходным положением для преобразования формулы (1) являлось представление  $X$  в функции  $s$ . Для этой цели  $X$  выражался через коэффициент  $K = \frac{X}{X_m}$ .

На рис. 5 показана кривая изменения  $X$  в зависимости от тока в обмотке статора. Из изложенного выше следует, что устойчивой части тормозной характеристики будет соответствовать изменение  $I_{рез}$  в пределах от  $I_{в.пр}$  до  $I_{рез м}$ , причем  $I_{в.пр} > I_{рез м}$ .

Изменение  $X$  для устойчивой части дано в пределах от  $X_c$  до  $X_m$ , а для неустойчивой от  $X_m$  до  $X_0$  (рис. 5). Таким образом, для устойчивой части тормозной характеристики  $K < 1$  (наибольшее насыщение) а для неустойчивой

$K > 1$ . Выразить  $X$  точным уравнением не представляется возможным, поэтому было сделано следующее, на первый взгляд грубое допущение: принято, что  $X$  в пределах от  $X_0$  до  $X_m$  и от  $X_m$  до  $X_c$  изменяется по прямой линии (последнее на рис. 5 показано пунктирными линиями), т. е. соответствующие криволинейные отрезки заменены прямыми. Ошибка за счет кривизны при  $X < X_m$  будет значительно меньше (рис. 5), чем при  $X > X_m$ . Поскольку  $X \leq X_m$  отвечает устойчивой части тормозной характеристики, практически используемой для целей торможения, то увеличение погрешности для неустойчивой части теряет свое значение.

Вводя коэффициент  $K$  для учета изменения  $X$  и коэффициент  $\beta$  для учета снижения  $M_{Tm}$  при упрощении формулы (8), получим:

$$\frac{M_T}{M_{Tm}} = \frac{2K\beta}{\frac{s_{Tm}}{s} + \frac{s}{s_{Tm}} K^2}. \quad (10)$$

Это уравнение является точным для расчета тормозной характеристики.

Коэффициент  $K$ , на основании сделанных нами ранее допущений, может быть выражен следующими уравнениями: для устойчивой части  $M_T = f(s)$  —

$$K_y = \frac{X_c}{X_m} + \frac{s}{s_{Tm}} \left[ 1 - \frac{X_c}{X_m} \right]; \quad (11)$$

для неустойчивой —

$$K_{ny} = \frac{X_0}{X_m} + \frac{s_{Tm}}{s} \left[ 1 - \frac{X_0}{X_m} \right]. \quad (12)$$

Рис. 5. Зависимость полного реактивного сопротивления ротора от насыщения при нормальной характеристике холостого хода.

В таблице приводятся результаты расчета устойчивой части тормозной характеристики упомянутого выше двигателя по уравнениям

(10) и (11) и результаты экспериментального определения ( $M_{Tэ}$ ).

$\frac{s}{s_{Tm}}$	$M_{T(1)}$ уравнение (1)	$M_{T(10)}$ уравнение (10)	$\frac{M_{T(1)} - M_{T(10)}}{M_{T(10)}}$ в %	$M_{Tэ}$	$\frac{M_{T(10)} - M_{Tэ}}{M_{Tэ}}$ в %
0,16	2,80	2,50	12,0	2,47	0,12
0,31	5,10	4,72	8,0	4,60	2,61
0,38	5,95	5,63	5,7	5,53	1,81
0,56	7,78	7,54	3,2	7,32	3,01
0,67	8,43	8,24	2,3	7,98	3,26
0,76	8,80	8,66	1,6	8,62	4,63
1,03	9,10	9,10	0,0	9,09	0,1

Сравнение расчетных и экспериментальных значений показывает, что максимальное расхождение имеет место при  $\frac{s}{s_{Tm}} = 0,6$  и составляет 5,47%. Очевидно, что эта погрешность вполне допустима. Эксперименты с другими асинхронными двигателями дали аналогичные результаты.

На рис. 6 представлены основные параметры асинхронного двигателя в относительных единицах ( $I$  — характеристика холостого хода; 2 — короткого замыкания) при нормальной характеристике холостого хода. Все параметры и обозначения аналогичны рис. 1. Из рассмотрения его видно, что замена кривой  $X$  в пределах от  $I_{рез\ m}$  до  $I_{с. пр}$  прямой линией дает максимальную погрешность менее чем в 3%. Для неустойчивой части тормозной характеристики (рис. 6) максимальная погрешность составит 8%.

На основании изложенного следует, что относительные погрешности расчета устойчивой части характеристики по уравнениям (10), (11),

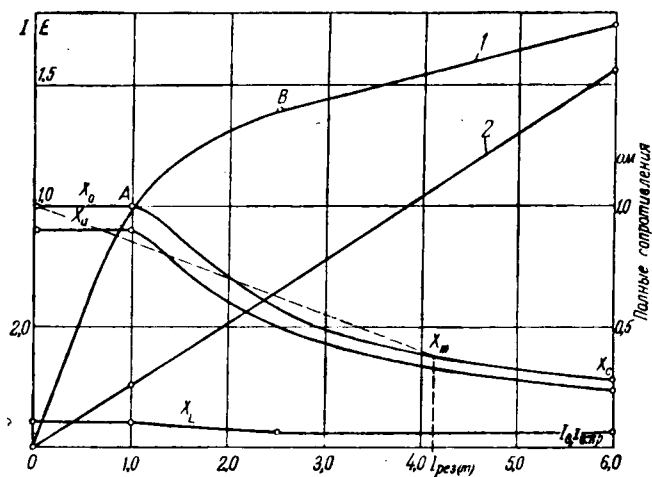


Рис. 6. Основные параметры ротора асинхронного двигателя в относительных единицах при возбуждении статора постоянным током и нормальной характеристике холостого хода

(12) незначительны и ими можно пренебречь во всех случаях рабочего проектирования асинхронного привода при использовании его для динамического торможения исполнительного механизма.

#### Литература

1. И. М. Садовский. Торможение асинхронных двигателей постоянным током. Электричество, № 19, 1934.
2. М. Р. Николайчук. Динамическое торможение асинхронных двигателей. Электричество, № 6, 1935.
3. В. Т. Касьянов. Динамическое торможение асинхронных двигателей. ВЭП, № 8 и 9, 1936.
4. С. А. Воробьев. Торможение индукционных двигателей постоянным током. Труды УИИ, вып. XVI, 1941.
5. В. К. Попов. Основы электропривода. Госэнергоиздат, 1945.

[28. 6. 1948]



# О расчете погрешностей электроизмерительных приборов

Доктор техн. наук, доц. В. О. АРУТЮНОВ

Ленинград

Вращающий момент, возникающий в измерительном механизме электроизмерительного прибора, нередко является функцией угла отклонения подвижной части. Сложность этой функции

и, часто, невозможность установить ее аналитическое выражение создает известные трудности при расчете погрешностей, особенно при проектировании нового прибора, когда желательно знать эти погрешности до экспериментального определения указанной функции на макете.

Ниже показан способ расчета большого числа погрешностей электроизмерительных приборов электромеханической группы<sup>1</sup>, не требующий знания этой функции.

В каждом электроизмерительном приборе электромеханической группы следует различать две основные части: измерительный механизм и измерительную схему.

Измерительная схема представляет собой совокупность сопротивлений, индуктивностей, емкостей и других элементов электрической цепи измерительного прибора и имеет своей основной задачей преобразовать измеряемую величину  $X$  в некоторую новую — промежуточную электрическую величину  $Y$ , непосредственно воздействующую на измерительный механизм.

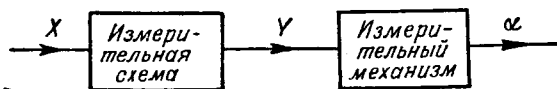


Рис. 1.

Измерительный механизм представляет собой совокупность деталей, служащих для преобразования промежуточной электрической величины

Разработан способ расчета погрешностей электроизмерительных приборов электромеханической группы, не требующий знания зависимости вращающего момента от угла отклонения подвижной части прибора. Показано применение этого способа к расчету условий температурной компенсации магнитоэлектрических вольтамперметров и температурной погрешности и компенсации электродинамических амперметров.

$Y$  в механическое перемещение подвижной части механизма, снабженной указателем для отсчетов показаний.

При таком рассмотрении действие любого электроизмерительного прибора

непосредственной оценки может быть представлено скелетной схемой, показанной на рис. 1. Здесь измеряемая величина  $X$  поступает в измерительную схему, где она преобразуется в промежуточную величину  $Y$ . Последняя создает в измерительном механизме перемещение  $\alpha$ , по которому и судят о числовом значении измеряемой величины.

В существующих электроизмерительных приборах электромеханической группы промежуточной величиной  $Y$  являются: ток, произведение двух токов или напряжение (последнее имеет место только в электростатических механизмах). При измерении какой-либо величины  $X$ , последняя должна быть, следовательно, преобразована в ток или напряжение. Ясно, что в тех случаях, когда измеряемой величиной является сама величина  $Y$  (например, ток в амперметрах без шунтов), такого преобразования не требуется, и измерительная схема вне измерительного механизма либо вовсе отсутствует, либо выполняет другие побочные функции (например, компенсация погрешности от различных факторов и т. п.).

Для указанных двух частей электроизмерительного прибора — измерительной схемы и измерительного механизма — можно написать следующие две зависимости:

$$Y = f_y(X) \quad (1)$$

и

$$\alpha = f_\alpha(Y). \quad (2)$$

Первая дает зависимость промежуточной величины  $Y$  от измеряемой  $X$  и обусловлена свойствами и параметрами измерительной схемы. Вторая относится к измерительному механизму и определяется только свойствами измерительного механизма.

<sup>1</sup> К электромеханической группе принадлежат электроизмерительные приборы непосредственной оценки магнитоэлектрической, электродинамической электромагнитной, индукционной и электростатической систем, и их разновидности — термоэлектрические, детекторные и ламповые приборы.

Каждому значению измеряемой величины  $X$  должно соответствовать одно и только одно определенное отклонение  $\alpha$ . Для этого необходимо:

- 1) чтобы обе функции были однозначны, и
- 2) чтобы: либо параметры схемы и измерительного механизма не изменялись при изменении внешних условий, например, температуры окружающей среды, частоты питающего схему тока и т. п., либо в измерительном механизме или измерительной схеме должны быть предусмотрены элементы, компенсирующие изменения параметров под влиянием внешних условий.

Отступления от указанных условий, являющиеся следствием несовершенности той и другой части электроизмерительного прибора, вызывают появление большей или меньшей погрешности в показаниях прибора. В частности, трение в опорах измерительного механизма является причиной многозначности функции  $\alpha = f_\alpha(Y)$ , благодаря которой подвижная часть прибора при одном и том же значении величины  $Y$  может занимать любое положение в пределах определенного угла  $\alpha$ , называемого часто *вариацией*. Точно также изменение сопротивлений схемы под действием температуры окружающей среды является одной из причин изменения функции  $Y = f_y(X)$ , что вызывает так называемую температурную погрешность.

В пяти системах измерительных механизмов приборов электромеханической группы для вращающего момента  $M$ , создаваемого промежуточной величиной  $Y$ , можно написать выражение:

$$M = Y^n f(\alpha),$$

причем показатель степени  $n$  равен двум или единице, в зависимости от системы измерительного механизма.

Чтобы каждому значению промежуточной величины соответствовало определенное отклонение, необходимо уравновесить вращающий момент моментом, ему противоположным и растущим по мере увеличения угла отклонения. Для него, следовательно, справедливо равенство:

$$M_\alpha = f_\alpha(\alpha).$$

Положение равновесия и, следовательно, установившееся отклонение<sup>1</sup> определяются равенством:  $M = M_\alpha$ , или:

$$Y^n f(\alpha) = f_\alpha(\alpha), \quad (3)$$

что дает возможность определить установившееся отклонение  $\alpha_c$  в функции от промежуточной величины  $Y$ :

$$\alpha_c = f_\alpha(Y).$$

Аналитическое решение уравнения (3) чаще всего невозможно вследствие невозможности получения развернутого математического выра-

жения для  $f(\alpha)$ . Поэтому решение этого уравнения обычно производится графически, путем построения точек пересечения кривых вращающего момента, снятых для различных значений  $Y$ , с заданной кривой противодействующего момента.

В большинстве электроизмерительных приборов противодействующий момент создается пружиной, подвесом или растяжкой, поэтому для этих приборов  $M_\alpha = W\alpha$  и уравнение (3) дает:

$$Y^n = \frac{W\alpha}{f(\alpha)}. \quad (4)$$

#### Погрешности измерительного механизма.

Каждому значению промежуточной величины  $Y$  должно соответствовать одно и только одно значение  $\alpha$ , в противном случае появляется большая или меньшая погрешность в показаниях. Последные обусловлены либо чисто механическими свойствами, не нашедшими отражения в уравнении (4) как, например, трением, опрокидыванием, неточностью нанесения отметок либо причинами, вызывающими изменение параметров, входящих в уравнение (4).

Погрешности, присущие измерительному механизму, обусловленные только его свойствами, целесообразно называть погрешностями измерительного механизма, в отличие от погрешностей измерительной схемы, являющихся следствием изменения функции  $Y = f_y(X)$ .

Почти для всех измерительных механизмов приборов электромеханической группы функцию  $f(\alpha)$  можно представить в виде произведения

$$f(\alpha) = f_\alpha(a, b, c \dots k, B, w, \mu, \epsilon) \cdot f_0(\alpha), \quad (5)$$

где  $a, b, c \dots k$  — размеры элементов измерительного механизма;

$B$  — индукция магнитного поля, создаваемого в измерительном механизме;

$w$  — числа витков его катушек;

$\mu, \epsilon$  — магнитная и диэлектрическая проницаемости среды.

Здесь  $f_0(\alpha)$  содержит в себе параметры, обуславливающие зависимость вращающего момента от угла отклонения. Поэтому (4) можно представить в виде:

$$Y^n = W \frac{\alpha}{f_\alpha \cdot f_0}. \quad (6)$$

Это выражение дает возможность вычислить погрешности измерительного механизма, а изложенный ниже способ позволяет произвести эти вычисления и без знания развернутого выражения для  $f_0(\alpha)$ .

Действительно, расчет погрешности, обусловленной изменением тех или иных параметров, входящих в уравнение (6), сводится к нахождению приращения  $\Delta\alpha$ , когда один или несколько аргументов получают приращения  $\Delta a, \Delta b, \Delta c$  и т. д., а промежуточная величина  $Y$  остается неизменной.

Экспериментальное определение погрешностей как раз и ведется так, что при неизменном значении  $Y$  изменяют условия работы механизма

<sup>1</sup> Это справедливо лишь в предположении, что отсутствуют всякие другие моменты, кроме  $M$  и  $M_\alpha$ , например, момент трения, момент от опрокидывания, от неполной уравновешенности и т. п.



(температура, внешнее поле и т. п.) и находят изменение показаний  $\Delta\alpha$ .

Однако, тот же эксперимент можно осуществить и иначе: можно искать такое изменение величины  $Y$ , какое требуется для получения одного и того же значения  $\alpha$  при различных внешних условиях. При этом, конечно, изменение  $\Delta Y$  берется со знаком, обратным изменению  $\Delta\alpha$ . Такой метод практически даже предпочтительнее, так как изменение  $\Delta Y$  определяется в этом случае по показаниям образцовых приборов и, следовательно, может быть измерено значительно точнее, нежели  $\Delta\alpha$ .

Этот метод можно использовать и при расчетах, если положить  $\alpha = \text{const}$  и рассчитывать  $\Delta Y$ . В таком случае, разлагая (6) в ряд, получим:

$$\Delta Y = \frac{dY}{1!} + \frac{d^2 Y}{2!} + \frac{d^3 Y}{3!} + \dots$$

В огромном большинстве случаев дифференциалами второго и выше порядков можно пренебречь и приближенно считать, что

$$\Delta Y \approx dY.$$

Для нашего случая после логарифмирования (6) получаем:

$$n \ln Y = \ln \frac{a}{f_0} + \ln W - \ln f_a.$$

Отсюда относительная погрешность измерительного механизма  $\gamma_Y$  получится равной:

$$\gamma_Y = -\frac{dY}{Y} = -\frac{1}{n} \left( \frac{dW}{W} - \frac{\partial f_a}{\partial a} \cdot \frac{da}{f_a} - \frac{\partial f_a}{\partial b} \cdot \frac{db}{f_a} - \dots \right).$$

Последнее выражение позволяет вычислить погрешности, обусловленные изменением внешних факторов, если известны относительные изменения параметров  $a, b, c$  и т. д. от этих внешних факторов. При этом ввиду постоянства  $a$  значение  $f_0(a)$  не обязательно, поскольку  $\gamma_Y$  от угла отклонения не зависит.

Пользуясь выражением (7), легко найти, например, погрешность, обусловленную изменением упругих свойств пружинки. В частности, погрешность от влияния внешней температуры на удельный противодействующий момент получится равной

$$\gamma_{tw} = -\frac{1}{n} \cdot \frac{dW}{W};$$

$\frac{dW}{W}$  есть не что иное как температурный коэффициент момента пружинки и равен  $-0,25 \div 0,3\%$  на каждые  $10^\circ \text{C}$  изменения температуры.

Обозначая этот коэффициент через  $\beta_w$ , найдем:

$$\gamma_{tw} = \frac{\beta_w}{n}. \quad (8)$$

Отсюда следует, что погрешность, обусловленная изменением упругих свойств пружинки, в  $n$  раз меньше, чем температурный коэффициент пружинки и, вопреки установившемуся мнению [см., напр. Л. 2, стр. 368, 436], не зависит от характеристики шкалы прибора.

**Погрешности измерительной схемы.** Как было указано выше, погрешности измерительной схемы обусловлены изменениями функции  $Y = f_y(X)$ .

Действительно, для измерительных схем справедливо выражение:

$$Y = f_y(X, r_1, r_2 \dots r_k, x_1, x_2 \dots x_k),$$

где  $r_i$  и  $x_i$  — активные и реактивные сопротивления, образующие измерительную схему;

$X$  — измеряемая величина.

Для большой группы измерительных приборов и в том числе для амперметров, вольтметров и ваттметров измеряемая величина может быть вынесена за знак функции  $f_y$ , и  $Y$  может быть представлено в виде:

$$Y = X^m \varphi(r_i, x_i). \quad (9)$$

Пользуясь тем же методом нахождения погрешностей, что и выше, будем искать такое изменение измеряемой величины  $X$ , какое необходимо, чтобы при изменении аргументов  $r_i$  и  $x_i$  сохранить  $Y$  на прежнем уровне.

Тогда, разлагая в ряд и пренебрегая дифференциалами второго и выше порядков, найдем:

$$\gamma_x = -\frac{dX}{X} = \frac{1}{m \varphi} \left( \sum_{i=1}^{i=k} \frac{\partial \varphi}{\partial r_i} dr_i + \sum_{i=1}^{i=k} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} dx_i \right). \quad (10)$$

При равномерной шкале измерительного механизма как такового, т. е. при равномерной шкале градуированной в единицах  $Y$ , относительное изменение величины  $Y$ , обусловленное изменением параметров измерительной схемы, будет равно относительному изменению отклонения  $\alpha$ . Это относительное изменение  $Y$  связано с погрешностью  $\gamma_x$  определенной зависимостью.

Действительно, дифференцируя (9), получим:

$$\gamma_y = \frac{dY}{Y} = \frac{1}{\varphi} \left( \sum_{i=1}^{i=k} \frac{\partial \varphi}{\partial r_i} dr_i + \sum_{i=1}^{i=k} \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} dx_i \right).$$

Отсюда следует:

$$\gamma_y = m \gamma_x. \quad (11)$$

Последнее указывает на то же важное обстоятельство, что при  $m > 1$  класс точности измерительного механизма должен быть в  $m$  раз выше, нежели класс точности прибора в целом. Это положение хорошо видно на примере термоэлектрического прибора, в котором промежуточной величиной  $Y$  служит термоток  $I_0$ , связанный с измеряемым током  $I$  зависимостью вида:

$$I_0 = kI^2,$$

причем зависимость угла отклонения  $\alpha$  от тока  $I_0$  линейна, поскольку измерителем в термоэлектрическом приборе служит нормальный магнито-

электрический измерительный механизм. Поэтому:

$$\alpha = cI^2,$$

где  $c$  — постоянная, зависящая от данных схемы прибора и его измерительного механизма.

Отсюда легко получаем

$$d\alpha = 2cI dI.$$

Относя изменение  $d\alpha$  к полному отклонению  $\alpha_n$ , равному  $cI_n^2$ , находим

$$\frac{d\alpha}{\alpha_n} = 2 \frac{I}{I_n} \cdot \frac{dI}{I_n}$$

или, так как  $\frac{d\alpha}{\alpha_n} = \gamma_{yn}$  и  $\frac{dI}{I_n} = \gamma_{In}$  — приведенные погрешности соответственно измерительного механизма и прибора в целом, то:

$$\gamma_{yn} = 2\gamma_{In} \cdot \frac{I}{I_n}.$$

Отсюда следует, что при заданной приведенной погрешности измерительного механизма, т. е. при заданном классе точности механизма, погрешность прибора в целом меньше в  $2 \frac{I}{I_n}$  раз.

При  $I = I_n$  (полное отклонение) она вдвое меньше погрешности измерительного механизма. Но они оказываются равными друг другу уже при  $I = \frac{1}{2} I_n$ , а при  $I = \frac{1}{4} I_n$  (начало рабочей части шкалы)  $\gamma_{In} = \frac{1}{2} \gamma_{yn}$ , т. е. при желании построить термоэлектрический прибор определенного класса точности, мы должны воспользоваться измерительным механизмом с вдвое меньшей основной погрешностью.

Из (10) следует, что относительная погрешность  $\frac{dX}{X} = -\gamma_t$  от изменения параметров измерительной схемы не зависит от измеряемой величины и, следовательно, остается неизменной вдоль шкалы прибора. Это подтверждает правильность нормирования погрешности от влияния внешних факторов отнесенной к данному показанию, а не к пределу измерения, как это и сделано в существующем ГОСТ 1845-42 на основании опытных данных относительно температурной погрешности. К сожалению, эта правильная мера не выдержана в указанном стандарте по отношению к влиянию колебаний частоты, которое нормировано в процентах от предела измерения.

**Температурная компенсация магнитоэлектрических вольтамперметров.** Рассмотренный способ расчета погрешностей дает возможность легко установить условия температурной компенсации в схемах многопредельных приборов постоянного тока.

Пользование обычным способом для расчета известной последовательно-параллельной схемы температурной компенсации (рис. 2), часто при-

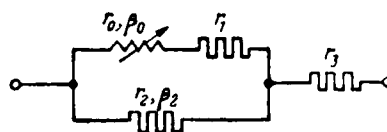


Рис. 2.

меняемой в этих приборах, обычно приводит к сложным выражениям.

Действительно, пользуясь обозначениями рис. 2, легко находим выражение для тока  $I_0$  в рамке прибора ( $I_0$  — промежуточная величина) в зависимости от измеряемой величины — напряжения  $U$  на зажимах прибора:

$$I_0 = \frac{U}{r_3 + (r_0 + r_1) \left(1 + \frac{r_3}{r_2}\right)},$$

здесь  $r_0$  — „медная часть“ сопротивления измерительного механизма;

$\beta_0, \beta_2$  — температурные коэффициенты сопротивления материалов, из которых изготовлены  $r_0$  и  $r_2$ .

Логарифмируя это выражение, находим:

$$\ln I_0 = \ln U - \ln \left[ r_3 + (r_0 + r_1) \left(1 + \frac{r_3}{r_2}\right) \right].$$

Отсюда, если изменение упругих свойств пружинки компенсируется изменением магнитных свойств постоянного магнита, температурная погрешность прибора получится равной

$$\gamma_t = -\frac{dI_0}{I_0} = \frac{r_{01} \left[ \beta_{01} \left(1 + \frac{r_3}{r_2}\right) - \frac{r_3}{r_2} \beta_2 \right]}{r_3 + (r_0 + r_1) \left(1 + \frac{r_3}{r_2}\right)},$$

где

$$\beta_{01} = \frac{dr_0}{r_0 + r_1} = \frac{dr_0}{r_{01}} \text{ и } \beta_2 = \frac{dr_2}{r_2}.$$

Поэтому условие температурной компенсации будет

$$\frac{r_3}{r_2} = \frac{\beta_{01}}{\beta_2 - \beta_{01}}. \quad (12)$$

Рассмотрим возможность температурной компенсации для схемы рис. 2, если она применяется с внутренним шунтом на несколько пределов измерения (рис. 3). Применяемый здесь ступенчатый шунт  $r$  обеспечивает неизменность температурной погрешности на всех пределах измерения, поэтому достаточно, если будет известно условие температурной компенсации на одном из пределов измерения, например,  $I_3$ .

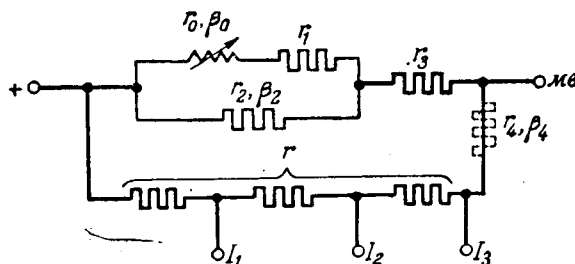


Рис. 3.

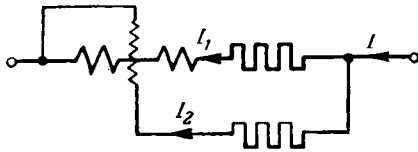


Рис. 4.

Для этого предела измерения имеем:

$$I_0 = I_3 \frac{r}{r + r_3 + r_{01} \left(1 + \frac{r + r_3}{r_2}\right)} = I_3 \frac{r}{A}.$$

или, логарифмируя:

$$\ln I_0 = \ln I_3 + \ln r - \ln A.$$

Дифференцируя последнее равенство, получим:

$$\gamma_I = -\frac{dI_0}{I_0} = \frac{dA}{A} = \frac{dr_{01} \left(1 + \frac{r + r_3}{r_2}\right) - r_{01} \frac{r + r_3}{r_2^2} dr_2}{A}.$$

Отсюда находим условие температурной компенсации в виде:

$$\frac{r + r_3}{r_2} = \frac{\beta_{01}}{\beta_2 - \beta_{01}}. \quad (13)$$

Из сравнения с (12) следует, что одновременное выполнение температурной компенсации для обеих схем невозможно. При малых  $r$  (большие пределы измерения) возможно уложить получающиеся температурные погрешности в некоторые заданные пределы. Это является причиной того, что в многопредельных приборах часто отсутствуют малые пределы измерения силы тока, а приборы снабжаются специальными наружными шунтами.

Автор предложил включать в схему сопротивление  $r_4$  (рис. 3), обладающее температурным коэффициентом  $\beta_4$ , такой величины, чтобы получить температурную компенсацию и при использовании прибора в качестве амперметра [Л. 3]. Для этого случая условие температурной компенсации при одновременном соблюдении (12) будет иметь вид:

$$\frac{\beta_2 - \beta_{01}}{\beta} = \frac{r_{01} + r_3}{r_{01}}, \quad (14)$$

где

$$\beta = \frac{\beta_4 r_4}{r + r_4}.$$

Так как  $\beta$  не зависит от предела измерения, то условие (14) температурной компенсации будет справедливо для всех пределов измерения.

**Температурная погрешность и компенсация электродинамических амперметров.** Вопрос о температурной погрешности электродинамических амперметров сводится к рассмотрению схемы параллельного соединения катушек прибора (рис. 4), как случая наиболее общего.

Пусть  $r_1, r_2$  — сопротивления соответственно цепей неподвижной и подвижной катушек, а  $\beta_1, \beta_2$  — их температурные коэффициенты.

Для этого случая (4) будет иметь вид:

$$I_1 I_2 = \frac{W \alpha}{f(x)}.$$

Но  $I_1$  и  $I_2$  связаны с измеряемым током  $I$  выражениями:

$$I_1 = I \frac{r_2}{r_1 + r_2}; \quad I_2 = I \frac{r_1}{r_1 + r_2}.$$

Поэтому

$$I_1 I_2 = I^2 \frac{r_1 r_2}{(r_1 + r_2)^2} = \frac{W \alpha}{f(x)}$$

или

$$I^2 = \frac{(r_1 + r_2)^2}{r_1 r_2} \cdot \frac{W \alpha}{f(x)}.$$

Пользуясь изложенным выше методом, находим:

$$\gamma_I = -\frac{dI}{I} = -\frac{1}{2} \left[ \frac{dW}{W} + \frac{(\beta_1 - \beta_2)(r_1 - r_2)}{r_1 + r_2} \right].$$

Здесь  $\frac{dW}{W} = -\beta_w$  — температурный коэффициент пружинок.

Окончательно

$$\gamma_I = \frac{\beta_w}{2} - \frac{(\beta_1 - \beta_2)(r_1 - r_2)}{2(r_1 + r_2)}. \quad (15)$$

Из последнего видно, что существуют два условия температурной компенсации. Действительно: при  $\beta_w = 0$  погрешность обращается в нуль в двух случаях: либо при  $\beta_1 = \beta_2$  и  $r_1 \neq r_2$ , либо при  $r_1 = r_2$  и  $\beta_1 \neq \beta_2$ .

Рассматривая эти условия в применении к конкретным, мы видим, что условие  $r_1 = r_2$  и  $\beta_1 \neq \beta_2$  выполняется в амперметрах на силу тока до  $0,5 \div 1$  а, в которых при параллельном соединении условие  $r_1 = r_2$  вообще является совершенно обязательным, в противном случае невозможно получение удвоенного предела измерения. Условие же  $r_1 \neq r_2$ ,  $\beta_1 = \beta_2$  хорошо выполняется в амперметрах на силу тока выше 1 а, где по условиям работы самой схемы  $r_1 \neq r_2$  и остается единственный способ компенсации путем уравнивания температурных коэффициентов обеих цепей. Нетрудно видеть, что вследствие наличия пружинок в цепи подвижной рамки такое уравнивание возможно путем добавления в цепь неподвижных катушек сопротивлений с нулевым или отрицательным коэффициентом.

При  $\beta_w \neq 0$  следует осуществлять компенсацию не до конца, а лишь в той мере, в какой это нужно для уравнивания величины  $\beta_w/2$ .

#### Литература

1. А. М. Дамский. Расчет и погрешности электродинамических приборов. Диссертация, 1946.
2. Теория, расчет и конструирование электроизмерительных приборов. Под редакцией Н. Н. Пономарева. 1943.
3. В. О. Арутюнов. Авторское свидетельство по заявке № 370416-III от 2 июня 1947.

[19. 3. 1949]



# Карбидные и ферросплавные электропечи как потребители сезонной гидроэнергии

Кандидат эконом. наук А. М. ОСЕПЯН

Водно-энергетический институт Академии наук Армянской ССР

Настоящая статья посвящена исследованию экономики специальных потребителей сезонной гидроэнергии. Вопросы сравнительной эффективности электроемких производств в системе других методов решения задачи использования сезонной гидроэнергии (регулирующие водохранилища, совместная работа различных типов станций в системе и т. д.) являются предметом специального рассмотрения.

Актуальность проблемы специальных потребителей сезонной гидроэнергии возрастает для районов с богатыми гидроэнергетическими ресурсами и с напряженным топливным балансом, в особенности на первых этапах освоения крупных гидроэнергетических ресурсов, до вступления в эксплуатацию развитых районных и межрайонных электросистем. К таким районам относятся: Таджикистан, Киргизия, Восточный Казахстан, Северный Кавказ, Закавказье, северо-западные районы РСФСР и др.

Между отдельными частями энергетического хозяйства, начиная от эксплуатации энергетических ресурсов до потребления включительно, существует сложная технико-экономическая взаимосвязь. Исследование этой взаимосвязи и установление комплексных энерго-экономических характеристик станция-потребитель по-новому решает задачи выбора мощности и основных параметров гидростанций.

Советской энерго-экономической литературе принадлежит приоритет в постановке и разработке проблемы специальных потребителей регуляторов, использующих сезонную гидроэнергию.

В работах Энергетического института Академии наук СССР и Московского энергетического института (1934—1935 гг.) дана научная постановка проблемы использования сезонной гидроэнергии и разработаны графоаналитические схемы исследования вопроса о предельном использовании электроемких производств как потребителей сезонной гидроэнергии [Л. 1—5]. Однако,

*В статье, на основе обобщения опыта советской промышленности, разработаны энергетические и экономические характеристики, определяющие условия эффективного использования электропечей как потребителей электроэнергии, вырабатываемой по сезонному графику. Выявлена роль электропечей в рациональном использовании водных энергетических ресурсов благодаря повышению коэффициента использования стока.*

все эти исследования в значительной степени дают лишь качественный анализ проблемы, основанный на чисто дедуктивном методе, без всякой споры в опытно-

эксплуатационном мате-

риале электроемких производств и гЭС, работающих по сезонному графику.

На основе изучения и обобщения длительного опыта эксплуатации карбидных и ферросплавных электропечей на сезонном энергетическом режиме нами разработаны энергетические и экономические характеристики, определяющие условия эффективного использования отдельных электроемких производств как потребителей электроэнергии с сезонным графиком гЭС [Л. 6—8].

Структура себестоимости карбида кальция и ферросилиция в условиях их производства на электроэнергию гЭС, работающих на незарегулированном водотоке, характеризуется на основе исследованных заводских материалов следующими данными:

1. Удельный вес материалов в себестоимости карбида кальция составляет  $25 \div 30\%$ , а ферросилиция  $30 \div 40\%$ . Удельный расход материалов практически не меняется при переходе на сезонный энергетический график.

2. Заработная плата производственным рабочим в себестоимости карбида кальция и ферросилиция составляет всего несколько процентов. Отсюда, даже существенные изменения в величине заработной платы производственным рабочим, в связи с переходом на сезонный режим, не могут оказать заметного влияния на экономику производства карбида кальция и ферросилиция как сезонных потребителей электроэнергии.

3. Решающее влияние в себестоимости продукции имеет слагающая электроэнергию.

При работе на электроэнергии от тепловых электростанций слагающая энергии в себестоимости продукции рассматриваемых производств составляет  $40 \div 45\%$ , при работе же на гидроэнергии — около  $20 \div 25\%$ . Очевидно, что это

обстоятельство благоприятно действует на экономику производства карбида кальция и ферросилиция как потребителей сезонной гидроэнергии.

4. Большое значение имеет группа накладных расходов, достигающая  $30 \div 40\%$ , что ограничивает экономику производства этих продуктов по сезонному энергетическому графику.

Обобщение длительного эксплуатационного опыта позволило установить новые энерго-экономические зависимости работы карбидных и ферросплавных печей на сезонном графике гЭС. Эти зависимости отличаются от принятых в литературе.

В настоящей статье приняты следующие условные обозначения:  $K$  — капитальные вложения по станции;  $K_n$  — удельные капиталовложения (на 1 т продукции);  $n$  — производительность труда рабочего;  $\mathcal{E}_y$  — удельные расходы электроэнергии (на 1 т продукции);  $d$  — себестоимость 1 т продукции;  $h$  — число часов использования энергетической мощности электропечей;  $t$  — срок компенсирования дополнительных капиталовложений.

Индекс  $o$  обозначает работу электропечи на нормальном графике, а индекс  $c$  — на сезонном графике.  $\frac{h_c}{h_0}$  — степень обеспечения карбидной и ферросплавной электропечи электроэнергией.

Поправочные коэффициенты для определения основных экономических показателей электропечей, работающих на сезонной гидроэнергии:  $\alpha$  — при определении удельных капиталовложений;  $\beta$  — при определении производительности труда;  $\gamma$  — при определении себестоимости продукции.

В энерго-экономической литературе принималось, что удельные капиталовложения на единицу продукции  $K_{n.c}$  находятся в прямой зависимости от фактора  $\frac{h_c}{h_0}$ , т. е.  $K_{n.c} = K_{n.o} \frac{h_0}{h_c}$ .

В действительности, как показывает обобщение эксплуатационного материала,  $K_{n.c} = \alpha \frac{h_0}{h_c} \cdot K_{n.o}$ ,

где  $\alpha$  определяется структурой производства и наличием в нем таких цехов, которые могут при правильной организации эксплуатации работать круглый год с равномерной нагрузкой, независимо от сезонного характера энергетического графика;  $\alpha < 1$ .

Одним из весьма существенных показателей экономичности производства на сезонном энергетическом режиме является производительность труда. В литературе принималось, что  $n_c = n_o \frac{h_c}{h_0}$ . Обобщение эксплуатационного материала показывает, что в действительности  $n_c = n_o \cdot \beta \cdot \frac{h_c}{h_0}$ , где  $\beta = f\left(\frac{h_c}{h_0}\right) > 1$ .

Что касается показателя удельного расхода электроэнергии, то при работе по сезонному графику (для заданного типа и параметров обо-

рудования) он изменялся в сравнительно небольших пределах 3—7% и лишь в отдельных случаях до 10%. Большую роль играет правильный выбор мощности агрегатов по заводу.

Установка мощных печей в условиях работы на сезонном энергетическом графике снижает коэффициент использования гЭС; установка печей малой мощности вызывает резкое повышение удельных норм расхода электроэнергии, что в свою очередь приводит к повышению удельных капиталовложений на 1 т продукции. Нахождение оптимальной мощности электропечей в производствах, работающих на сезонном графике — весьма актуальная задача, являющаяся предметом специального рассмотрения.

Обобщение эксплуатационного материала по производствам, использующим сезонную гидроэнергию, позволило установить характер изменения себестоимости продукции, в зависимости от фактора  $\frac{h_c}{h_0}$ . В частности установлено, что в расчетные формулы, определяющие зависимость себестоимости продукции от  $\frac{h_c}{h_0}$ , должен быть введен коэффициент  $\gamma$ :

$$d_c = d_o \gamma \frac{h_0}{h_c}.$$

Численные значения  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  в зависимости от  $\frac{h_c}{h_0}$  даются в таблице 1.

Таблица 1

$\frac{h_c}{h_0}$	Производство карбида кальция			Производство ферросилиция		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,90	0,99	0,04	0,93	0,97	1,08	0,95
0,80	0,98	1,10	0,85	0,93	1,17	0,88
0,70	0,97	1,16	0,78	0,89	1,29	0,81
0,60	0,96	1,21	0,70	0,84	1,46	0,74
0,50	0,95	1,35	0,62	0,77	1,69	0,67

Для анализа экономичности использования производств карбида кальция и ферросилиция, как потребителей сезонной гидроэнергии необходимы энерго-экономические характеристики комплекса электростанция—электропечь. В качестве иллюстрации приводим энерго-экономические характеристики, построенные по отчетным материалам изученных производств (рис. 1 — для производства карбида кальция и рис. 2 — для производства ферросилиция).

На каждом рисунке дается характеристика двух основных показателей — себестоимости и капиталовложений. График (см. табл. 2), разделен на три части. В I части даны зависимости себестоимости в процентах от степени использования энергии реки. Во II части даны зависимости капиталовложений от числа часов исполь-

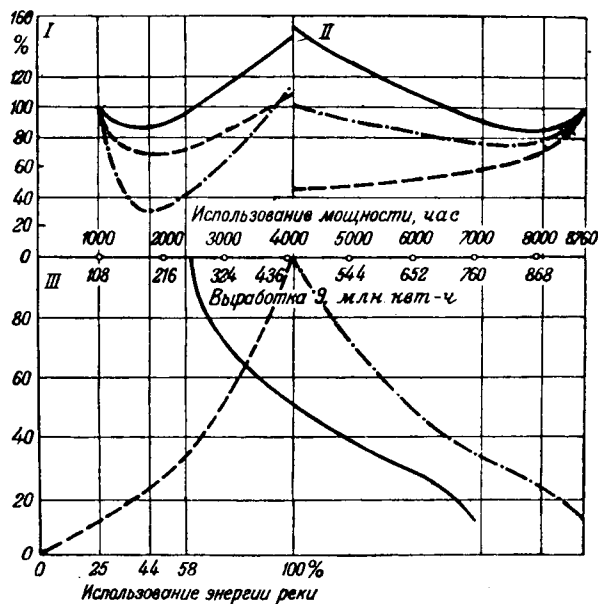


Рис. 1.

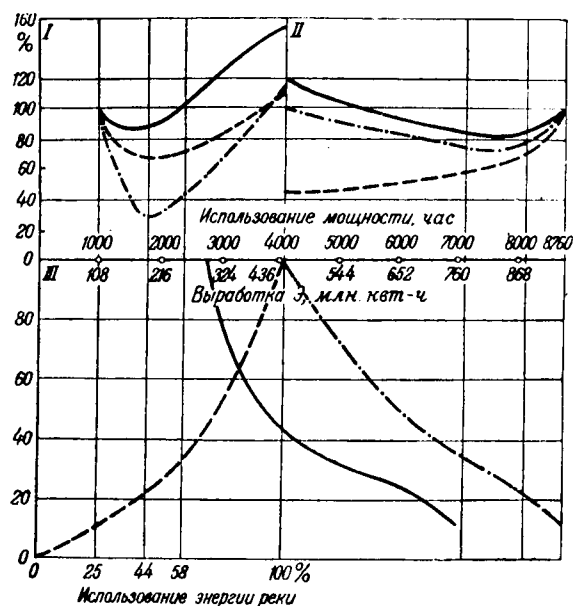


Рис. 2.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ (к рис. 1 и 2)

Для верхней части графика

I. Себестоимость:  
 ————— продукция,  
 - - - - - электроэнергия,  
 - . . . . - электроэнергия дополнительной.

II. Капиталовложения:  
 на 1 т продукции в комплексе завод-станция,  
 на 1 квт установленной мощности станции,  
 на 1 квтч электроэнергии.

Для нижней части графика (III)

- - - - - выработка электроэнергии по водотоку,  
 ————— число часов использования энергетической мощности потребителя-регулятора,  
 - . . . . - число часов использования мощности станции по водотоку.

Таблица 2

Величина  $t$  при стоимости тепловой энергии 5,6 и 8 коп/квтч и питании станцией производства карбида кальция\*

Сравнительные показатели гэс			Сравнительные показатели тепловых станций											
Коэффициент использования энергии реки	Обеспеченность мощности, %	Себестоимость 1 квтч/коп**	В и д ы   т о п л и в а											
			Донецкий и кузнецкий уголь			Подмосковный уголь			Челябинский уголь			Т о р ф		
			Себестоимость 1 квтч в копейках											
			5	6	8	5	6	8	5	6	8	5	6	8
В е л и ч и н а   t   в   г о д а х														
0,58	41%	$\frac{2,2}{1,29}$	16,2	11,4	7,2	13,5	9,5	6,0	13,5	9,6	6,1	12,3	8,7	
0,44	75%	$\frac{2,1}{0,92}$	8,7	6,8	4,8	7,0	5,5	3,8	7,1	5,6	3,9	6,2	4,9	
0,24	100%	$\frac{3,1}{—}$	26,8	17,3	10,1	23,4	15,0	8,8	23,4	15,2	8,9	21,6	14,0	

\* Для производства ферросплавов получаются близкие величины.

\*\* В числителе дана себестоимость энергии, а в знаменателе — дополнительной энергии. Величина  $t$  исчислена, исходя из себестоимости дополнительной гидроэнергии.

зования водотока, определяемой заданной мощностью станции, причем 25% использования энергии реки соответствует 8760 час. использования по водотоку, 44% — 8100 час. и 58% — 7100 час.

В III части графика дана гидроэнергетическая характеристика используемой реки, являющейся одним из крупных горных рек Советского Союза: интегральная кривая выработки электроэнергии  $\mathcal{E} = f(N)$  и число часов использования  $h = \varphi(N)$ , где  $N$  — мощность гЭС.

Анализ этих материалов показывает, что удельные капиталовложения на установленный киловатт снижаются с увеличением мощности электроустановки. С другой стороны, электроотдача на установленный киловатт для станций, работающих на незарегулированном водотоке, уменьшается с увеличением мощности, потому что, чем больше используемый расход, тем меньше его продолжительность.

Соответственно резко изменяются экономические показатели как гЭС, так и производства, при-

чем характер изменения технико-экономических показателей гэс в зависимости от степени использования водотока и показатели конечной продукции, выработанной по графику этого водотока, резко расходятся.

Все это подтверждает наш вывод о том, что правильное суждение об экономической характеристике водотоков как объектов гидроэнергетического использования, в связи с изменением продолжительности используемого расхода мы можем иметь только при разработке технико-экономических показателей, характеризующих данный водоток в комплексе гэс — электропечь. Анализ энерго-экономических показателей в рамках гэс—энергосистема неизбежно приводит к односторонним и неправильным выводам.

Для освещения вопросов об условиях, определяющих экономическую эффективность использования карбида кальция и ферросплава как потребителя сезонной гидроэнергии, необходимо также исследовать вопрос о заменяющей сезонную гидроэнергию энергетической базе.

Вопрос о заменяющей энергетической базе должен быть, естественно, в каждом конкретном случае изучен с точки зрения энергетического баланса районов размещения электроемкого потребителя.

В качестве заменяющей сезонную гидроэнергию в расчетах принята постоянная энергия различного типа гэс.

За критерий экономичности принято отношение разности в капитальных затратах по двум сравниваемым вариантам к разности годовых издержек производства по тем же вариантам. В основу сравнения принимается фактор, имеющий большое народнохозяйственное значение, — время  $t$ , выраженное в годах. Величина  $t$  дает срок компенсирования дополнительных капиталовложений по двум сравниваемым вариантам гэс и тепловой электростанции. Этот метод принят МЭС при проектировании гэс.

Для сопоставления основных экономических показателей гэс с тепловой электростанцией, последняя рассматривалась вместе с ее топливной базой.

Помещенные в табл. 2 результаты наших исследований выявили, что  $t$  невелико при сопоставлении с тепловыми станциями, работающими на низкосортном топливе.

Для полной характеристики электропечи как потребителя сезонной гидроэнергии необходимо проанализировать еще один важнейший показатель — производительность труда.

Для разрешения этого вопроса в условиях социалистической экономики производительность труда должна исчисляться не в рамках одной отрасли, т. е. электроемкой промышленности, а в комплексе завод — электростанция.

Для сравнительных характеристик в расчетах приняты различного типа тепловые станции.

Рассматривая вопрос производительности труда в электроемком производстве, организованном на сезонном энергетическом графике, мы учли

фактор изменения производительности труда в худшую сторону у потребителя электроэнергии и в лучшую — у производителя энергии.

Проведенные исследования показали, что условия равенства производительности труда в комплексе завод — гэс и завод — тепловая электростанция при работе заводов, в первом случае по сезонному, а во втором случае по нормальному графику соответствует  $\frac{h_c}{h_0} \geq 0,5$ .

Отсюда мы приходим к выводу, что экономия сезонной гидроэнергии, полученная в трудовых затратах при эксплуатации станции, перекрывает потери, полученные на электроемком заводе из-за работы последнего на сезонном энергетическом графике.

**Выводы.** Одним из эффективных методов решения проблемы сезонной гидроэнергии является размещение электроемкой промышленности — электропечей у источников гидроэнергии с переводом режима работы печей на сезонный график гэс.

Электропечи в роли потребителей-регуляторов в значительной доле дают возможность рациональнее использовать водные энергетические ресурсы, повышая коэффициент использования стока.

По энергетическим, технологическим и экономическим условиям электропечь допускает эксплуатацию на сезонном энергетическом графике.

Обобщения долголетнего опыта работы электропечей привели к выводу, что по основным показателям: производительности труда, себестоимости продукции и эффективному использованию капиталовложений, — работа электропечей по сезонному графику гэс (не ниже шестимесячной обеспеченности) рентабельнее по сравнению с условиями печей на тепловой электроэнергии по нормальному графику (при себестоимости гидроэнергии до 2,2 коп/квтч, а тепловой электроэнергии — 5 и выше коп/квтч).

#### Литература

1. С. А. Кукель-Краевский. Техничко-экономические основы планирования потребителей регуляторов нагрузки. Известия ЭНИН, т. 3, стр. 101, 1935.
2. Т. А. Золотарев. К экономическому расчету потребителей регуляторов сезонной гидроэнергии. Известия ЭНИН, т. 3, стр. 147, 1935.
3. М. Н. Фельдман. Исследование экономики потребления сезонной энергии. Известия ЭНИН, т. 3, стр. 119, 1935.
4. Б. И. Кикодзе. Проблема использования периодической энергии электрических станций. Тбилиси, 1933.
5. М. Л. Элькин. Потребители-регуляторы электрической нагрузки в энергосистеме. Москва, 1935.
6. А. М. Оселян. Использование сезонной гидроэнергии в производстве карбида кальция. Доклады Академии наук Армянской ССР, т. 2, № 2, 1945.
7. А. М. Оселян. Использование гидроэнергии в производстве ферросплавов при сезонных ограничениях режима электропотребления. Доклады Академии наук Армянской ССР, т. 9, № 2, стр. 1948.
8. А. М. Оселян. К вопросу о комплексных экономических характеристиках энергетического использования незарегулированных водотоков. Известия Академии наук Армянской ССР, т. 1, № 4, стр. 301, 1948.

[3. 5. 1949]

## Моделирование рельсовых сетей

Кандидат техн. наук В. С. КАЛЬМАН

Азербайджанский индустриальный институт им. Азизбекова

Анализ распределения потенциалов и токов в протяженных заземленных цепях приводит к интегро-дифференциальным уравнениям. Однако, в том случае, когда заземленной цепью является рельсовый путь, соотношение параметров цепи допускает введение некоторой постоянной—переходной проводимости,— позволяющей выразить, с достаточной для практики точностью, указанные соотношения при помощи дифференциальных уравнений [Л. 5].

Введение переходной проводимости дает также возможность моделирования рельсовой цепи при помощи довольно несложной схемы. Применяемая для исследования модель должна прежде всего удовлетворять требованиям подобия. Одним из условий совпадения закона распределения потенциалов и токов на модели и в исследуемой сети являются равенства  $g' = \frac{g}{c}$  и  $r' = rc$ . Критерием подобия для рассматриваемой системы будет инвариант  $rgl^2$ , где  $r$ —сопротивление единицы длины сети,  $g$ —переходная проводимость единицы сети,  $l$ —длина [Л. 1].

Модель рельсовой сети (авторское свидетельство № 56149) составляется из отдельных элементов по схеме рис. 1.

При исследовании рельсовой сети возникает необходимость подвести ток ко многим точкам модели в соответствии с нагрузкой вдоль сети. Для устранения трудностей, связанных с одновременным включением большого количества приборов, нагрузки прикладываются к соответствующим точкам модели последовательно. Затем, путем обхода всей сети и суммирования потенциалов получают благодаря суперпозиции потенциалы, соответствующие одновременному приложению всех нагрузок. Регулировка нагрузки производится реостатами. Подключение нагрузок и измерительных приборов осуществляется при помощи переключателей.

Сопоставление результатов, полученных на модели, с расчетными показали вполне достаточную ее точность [Л. 2]. Ниже приводятся результаты исследований рельсовой сети, осуществленные при помощи описанной модели, которые в силу сложности условий трудно разрешимы аналитическим путем.

**Смещение точки токораздела.** Отсутствие симметрии нагрузки двух смежных участков, питаемых от разных подстанций, приводит к смещению точки токораздела в рельсовой сети относительно токораздела питающей сети.

Смещение токораздела в замкнутых сетях, обусловленное металлической связью районов питания, было рассмотрено В. Е. Розенфельдом [Л. 4]. Это явление в разомкнутых линиях и влияние на него блуждающих токов [Л. 3] были исследованы на модели.

В одном случае асимметрия создавалась неодинаковой плотности нагрузок на двух смежных равных участках, в другом [рис. 2]—неравенством длины участков. Отрезок  $c$  дает смещение точки токораздела (максимум потенциала) на модели. Таким образом, модель дает возможность обнаружить явление смещения токораздела. Направление этого смещения совпадает с предсказываемым теорией (в сторону отсасывающего пункта, имеющего более низкий потенциал) и наблюдаемым в существующих сетях [Л. 3].

**Разрыв непрерывности рельсового пути.** Разрыв непрерывности рельсового пути (разрушение стыка) имеет практический интерес как явление весьма частое в рельсовых сетях.

Нами исследованы случаи разрыва в одной и двух (рис. 3) точках рельсовой сети при сосредоточенной и распределенной нагрузке. Анализ полученных кривых приводит к следующим заключениям: в достаточно длинной линии (эквивалентная длина на модели — 6 км) в землю отходят весьма значительные токи, вследствие чего на большом протяжении рельсы разгружаются от тока. Это объясняет слабое влияние увеличения сопротивления рельсового пути на величину общего падения напряжения. Дей-

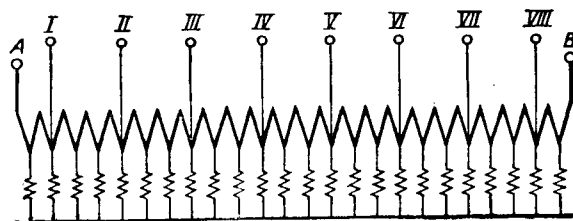


Рис. 1.



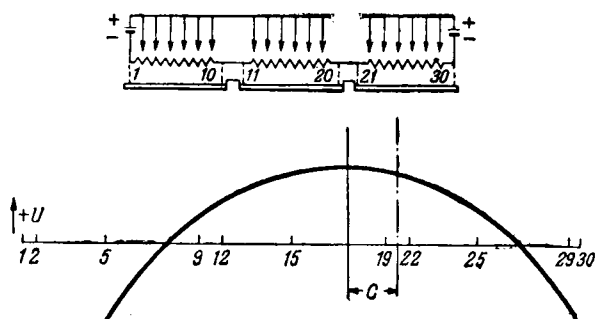


Рис. 2.

ствительно, максимальный отрицательный потенциал (в точке отсасывания) при нагрузке, приложенной в конце, характеризуется следующими цифрами:

цельная линия . . . . .	26,3
разрыв в одной точке . . . . .	27,1
разрыв в двух точках . . . . .	29,6

Как видно, увеличение максимального потенциала весьма незначительно.

Для равномерно распределенной нагрузки — случай более близкий к условиям трамвайной сети — увеличение потенциала отсасывающего пункта, вызываемое разрывом в двух точках, составляет всего 12%. При этом, увеличение блуждающего тока (подсчитанное по площади, ограниченной кривой потенциала) составляет 48%.

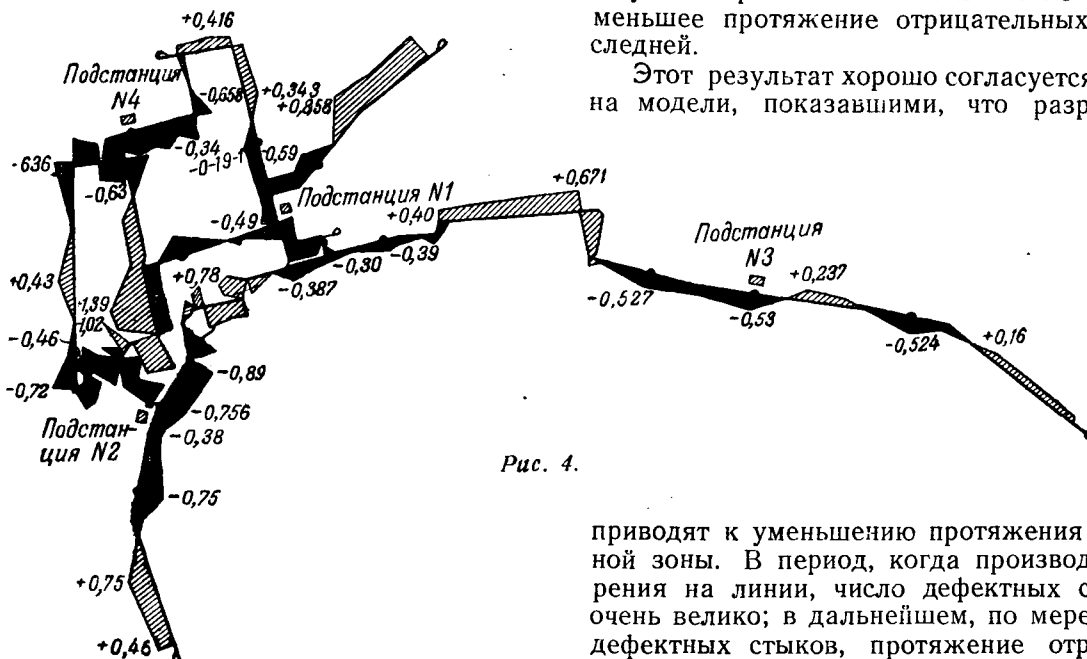


Рис. 4.

Таким образом, влияние разрывов на величину потенциала в 4 раза меньше влияния на величину блуждающих токов. Это указывает на недостаточность величины потенциала отсасывающего пункта как критерия благополучия сети в отношении блуждающих токов.

На основании опытов с моделью можно сделать еще одно важное заключение. На длинных

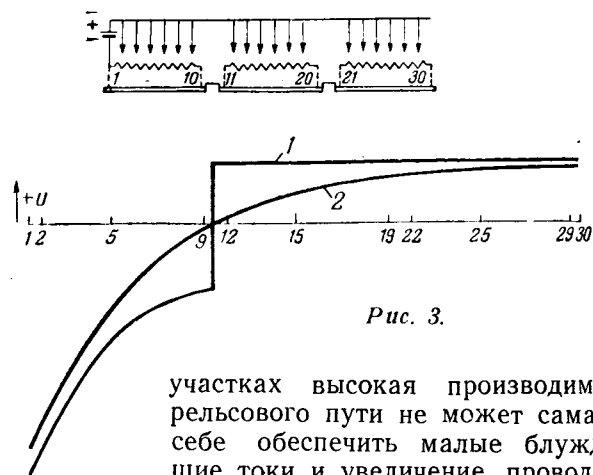


Рис. 3.

участках высокая производительность рельсового пути не может сама по себе обеспечить малые блуждающие токи и увеличение проводимости рельсового пути не дает должного эффекта до тех пор пока не будут укорочены участки отсасывания.

**Исследование сложной рельсовой сети.** При помощи модели была построена картограмма распределения потенциалов рельсовой сети одного из городских трамваев (рис. 4; штриховка — положительные потенциалы, заливка — отрицательные). Картограмма дает возможность установить границы опасных для подземных сооружений зон рельсового пути при исправном его состоянии (отсутствии разрушенных стыков).

Сопоставление картограммы с построенной по данным непосредственных измерений на существующей рельсовой сети показало значительно меньшее протяжение отрицательных зон в последней.

Этот результат хорошо согласуется с опытами на модели, показавшими, что разрывы линий

приводят к уменьшению протяжения отрицательной зоны. В период, когда производились измерения на линии, число дефектных стыков было очень велико; в дальнейшем, по мере устранения дефектных стыков, протяжение отрицательных, т. е. «опасных», зон начало возрастать. Явление, на первый взгляд — парадоксальное — улучшение проводимости рельсового пути, вызывает ухудшение условий для подземных сооружений. Однако, необходимо иметь в виду, что увеличение протяжения отрицательных зон сопровождается в данном случае уменьшением ответвляющихся в землю токов, т. е. уменьшением общего коррозионного их эффекта.

Помимо приведенных исследований, на модели были рассмотрены также тяговые линии с трехпроводной системой питания, смежные линии с противоположной полярностью контактного провода и другие специальные случаи работы рельсовой сети.

#### Литература

1. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование (электроинтегратор). Изд-во Академии наук СССР, 1943.

2. В. С. Кальман. Исследование заземленных сетей методом модели. Труды Азербайджанского индустриального института, № 1/20, 1940.

3. В. С. Кальман. Потенциалы и токи в рельсовых сетях электрических железных дорог. Известия Азербайджанского индустриального института, № 16, 1936.

4. В. Е. Розенфельд. О токораспределении в рельсовых сетях электрических железных дорог. Электричество, № 12, 1935.

5. R. Gibrat. Nouvelles études sur l'électrolyse des canalisations souterraines. Bull. SFE, т. 4, № 44, 1934.

[18. 9. 1947]



## Новый вид полного уравнения двойного моста и его применение

Кандидат техн. наук М. А. БЫКОВ

Московский государственный институт мер и измерительных приборов

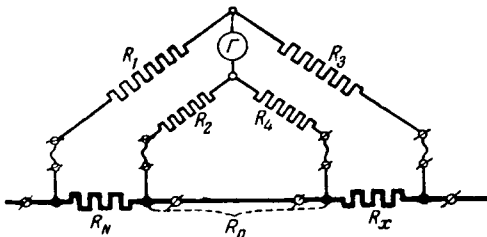
При выводе уравнения для условий равновесия двойного моста (рисунок) обычно задаются дополнительным условием:

$$R_1 = R_2 \text{ и } R_3 = R_4. \quad (1)$$

Тогда получается весьма простое уравнение, аналогичное случаю простого моста, а именно:

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_3}{R_1}. \quad (2)$$

В уравнении (2) совершенно не участвует сопротивление участка, обозначенного на рисунке через  $R_n$  — перемычки между сравниваемыми сопротивлениями  $R_N$  и  $R_x$ .



Понятно, что практически условие (1) является лишь чисто формальным, а уравнение (2) — приближенным.

В действительности весьма существенным является вопрос о том, в какой мере и при каких обстоятельствах те или иные фактические (и, вообще говоря, совершенно неизбежные) отступления от условия (1) нарушают правильность уравнения (2).

Уточненный вывод условий равновесия двойного моста Томсона [Л. 1] обычно сводят к уравнению:

$$R_x = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_N + d, \quad (3)$$

где

$$d = \frac{R_n}{R_1} \cdot \frac{R_3 R_2 - R_1 R_4}{R_2 + R_4 + R_n}. \quad (4)$$

При этом, как видно из выражения (4), в уравнении (3) уже участвуют значения  $R_n$  и сопротивления всех четырех плеч моста.

Однако, выражение (4) сложно и поэтому мало пригодно для быстрой оценки степени его влияния. Вследствие этого в практике измерений с помощью двойного моста уравнением (3) пользуются очень редко и еще реже получают из выражения (4) четкое и ясное представление о практически возможных погрешностях и о пределах применимости двойного моста, соответственно, требующейся степени точности проводимых измерений.

Если же несколько видоизменить обозначения, примененные на рисунке, приняв

$$R_2 = R_1 + \Delta R_1 \text{ и } R_4 = R_3 + \Delta R_3,$$

и подставить эти обозначения в (4) или провести при этих обозначениях весь вывод от начала, то после некоторых преобразований и пренебрежения некоторыми членами весьма малых порядков величины, можно прийти к иной форме полного уравнения двойного моста:

$$R_x = R_N \cdot \frac{R_3}{R_1} \left[ 1 + \frac{R_n}{R_N + R_x} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_1}{R_1} \right) \right]. \quad (5)$$

Во второй член в прямоугольной скобке можно подставлять номинальные, а не действительные значения сопротивлений  $R_N$ ,  $R_x$ ,  $R_1$  и  $R_3$ , так как здесь идет речь лишь о некоторой поправке к основному приближенному соотношению (2).

По выражению (5) легко проследить за основными свойствами двойного моста.

а) при  $\Delta R_1 = 0$  и  $\Delta R_3 = 0$  (т. е.  $R_1 = R_2$  и  $R_3 = R_4$ ) мы имеем идеальный случай, соответ-

ствующий условию (1) и уравнению (2); сопротивление перемычки  $R_n$  на результат уравнивания никакого влияния не имеет;

б) при  $\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3}$  мы приходим к тем же результатам, что и в случае а), но в отличие от случая а) это условие практически иногда получают—при проведении двойного уравнивания моста (обычного и при разомкнутой перемычке, т. е.  $R_n = \infty$ ); в случае мостов, конструктивно оформленных в виде законченных приборов, этот метод обычно не применим;

в) при  $\frac{\Delta R_1}{R_1} \neq \frac{\Delta R_3}{R_3}$  решающее значение приобретает отношение  $\frac{R_n}{R_N + R_x}$ : если  $\frac{R_n}{R_N + R_x} \ll 1$  (что обычно имеет место при сравнении относительно высоких сопротивлений, например, от 0,1 ом и выше), то влияние члена  $\left(\frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_1}{R_1}\right)$  на окончательный результат измерения весьма уменьшается и обычно не может существенно нарушить точность; если же  $\frac{R_n}{R_N + R_x} > 1$  (что может иметь место при сравнении малых сопротивлений, порядка 0,001 ом и ниже), то влияние члена  $\left(\frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_1}{R_1}\right)$  соответственно увеличивается и может оказаться определяющим в отношении погрешности окончательного результата.

Что касается сопротивления  $R_n$ , то его значение легко определить для уже собранной схемы моста, частично применив метод Матиссена: разомкнем, например, соединение одного из потенциальных зажимов сопротивления  $R_N$  с соответствующим плечом моста  $R_2$ ; тогда получим простой мост, четырьмя плечами которого будут  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_N + R_n$  и  $R_x$  (плечо  $R_4$  двойного моста теперь окажется в ветви гальванометра); если при каком-то значении  $R'_3$  мы получим для новой схемы равновесие, будет действительно соотношение:

$$\frac{R_N + R_n}{R_x} = \frac{R_1}{R'_3}. \quad (6)$$

В схеме же двойного моста мы имели:

$$\frac{R_N}{R_x} \approx \frac{R_1}{R'_3},$$

откуда:

$$R_n \approx R_N \left( \frac{R_3}{R'_3} - 1 \right). \quad (7)$$

На первый взгляд может даже показаться целесообразным довести метод Матиссена до конца: замкнуть соединение с  $R_4$ , разомкнуть соединение у  $R_x$  с  $R_4$  и тогда, получив новое равновесие при  $R'_3$ , мы имели бы:

$$\frac{R_N}{R_N + R_x} = \frac{R_1}{R'_3}, \quad (8)$$

а выражения (6) и (8) позволяют определить  $R_x$  уже без применения уравнений схемы двойного моста (5) или (2):

$$R_x = R_N \cdot \frac{R'_3}{R_1} \cdot \frac{R'_3 + R_1}{R'_3 + R_1}. \quad (9)$$

Однако, в тех случаях, когда в выражении (5) сопротивление  $R_n$  может оказать существенное влияние, пользование одним лишь методом Матиссена и соответственно уравнением (9) может привести к менее точным результатам, нежели при применении двойного моста и уравнения (5), с определением только  $R_n$  по методу Матиссена и уравнению (7). Причина заключается в том, что на условия равновесия (6) и (8) решающее влияние имеет значение  $R_n$ ; при выводе уравнения (9) оно принимается неизменным как в случае (6), так и в случае (8); в действительности же значение  $R_n$  может быть не стабильным, так как это сопротивление в основном состоит из сопротивлений медных проводников и переходных сопротивлений контактов; всякое же изменение значения  $R_n$  может существенно нарушить точность выражения (9). При применении же метода двойного моста и уравнения (5), значение  $R_n$  определяет только величину лишь сравнительно небольшой поправки, и если вспомогательное в данном случае выражение (7) дает для  $R_n$  значение, ошибочное даже на несколько процентов, то на окончательный результат измерения по выражению (5) это повлияет лишь в весьма малой мере.

#### Литература

1. Е. Г. Шрамков. Электрические и магнитные измерения. Изд. ОНТИ, стр. 277, 1937.

[27. 8. 1948]



# Применение матричного исчисления к активному линейному четырехполюснику

Инж. Л. Ф. КОТОВА

Московский энергетический институт им. Молотова

В теории пассивного линейного четырехполюсника обычно применяют матрицы для расчета параметров схемы, получаемой в результате соединения нескольких пассивных четырехполюсников [Л. 1, 2, 3]. Этот прием можно обобщить и распространить на активные линейные четырехполюсники, что показано ниже на примере трех основных типов соединения четырехполюсников: последовательного, параллельного и каскадного.

Уравнение активного четырехполюсника можно представить в виде

$$U_1 - U_{x1} = z_{11}I_1 + z_{12}I_2,$$

$$U_2 - U_{x2} = z_{21}I_1 + z_{22}I_2$$

или в матричной форме

$$\begin{Bmatrix} U_1 - U_{x1} \\ U_2 - U_{x2} \end{Bmatrix} = Z \cdot \begin{Bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где  $Z = \begin{Bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{Bmatrix}$  — матрица сопротивлений пассивного четырехполюсника, получаемого приравниванием нулю всех э. д. с. внутри активного четырехполюсника;

$U_{x1}$  и  $U_{x2}$  — напряжения, соответственно, на входе и выходе активного четырехполюсника при одновременном размыкании его с обеих сторон.

Тогда для четырехполюсника, образованного путем последовательного соединения двух активных четырехполюсников с матрицами сопротивлений  $Z'$  и  $Z''$  (рис. 1), можно получить сложением матриц:

$$\begin{Bmatrix} U_1 - U_{x1} \\ U_2 - U_{x2} \end{Bmatrix} = (Z' + Z'') \begin{Bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где

$$U_{x1} = U'_{x1} + U''_{x1}, \quad U_{x2} = U'_{x2} + U''_{x2}.$$

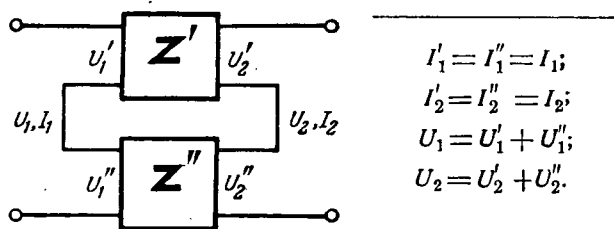


Рис. 1. Последовательное соединение двух четырехполюсников.

Если уравнения четырехполюсника представить в виде:

$$\begin{Bmatrix} I_1 - I_{\kappa 1} \\ I_2 - I_{\kappa 2} \end{Bmatrix} = Y \cdot \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где  $Y = \begin{Bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{Bmatrix}$  — матрица проводимостей пас-

сивного четырехполюсника, а  $I_{\kappa 1}$  и  $I_{\kappa 2}$  — токи, соответственно, на входе и выходе активного четырехполюсника при одновременном двустороннем коротком замыкании, то уравнения четырехполюсника, полученного в результате параллельного соединения двух активных четырехполюсников с матрицами проводимостей  $Y'$  и  $Y''$  (рис. 2), тоже получаются сложением матриц

$$\begin{Bmatrix} I_1 - I_{\kappa 1} \\ I_2 - I_{\kappa 2} \end{Bmatrix} = (Y' + Y'') \cdot \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

где

$$I_{\kappa 1} = I'_{\kappa 1} + I''_{\kappa 1}, \quad I_{\kappa 2} = I'_{\kappa 2} + I''_{\kappa 2}.$$

Полагая в (1)  $U_1$  и  $U_2$  равными нулю, можно получить простое соотношение между напряжениями холостого хода и токами короткого замыкания:

$$U_{x1} = -Z_{11}I_{\kappa 1} - Z_{12}I_{\kappa 2},$$

$$U_{x2} = -Z_{21}I_{\kappa 1} - Z_{22}I_{\kappa 2}.$$

Приведенные формулы для последовательного и параллельного соединений активных четырехполюсников справедливы при некоторых ограничениях, которые в равной мере имеют место в отношении формул для пассивного четырехполюсника. С точки зрения этих соединений четырехполюсники могут быть разбиты на три группы: 1) не имеющие непосредственной электрической связи между входными и выходными зажимами (трансформаторы) — к ним можно применять рассмотренные формулы без оговорок;

$$\begin{aligned} U'_1 &= U''_1 = U_1; \\ U'_2 &= U''_2 = U_2; \\ I_1 &= I'_1 + I''_1; \\ I_2 &= I'_2 + I''_2. \end{aligned}$$

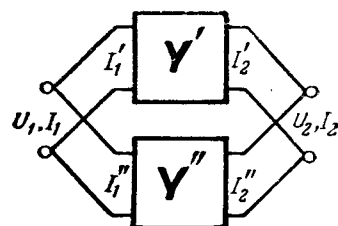


Рис. 2. Параллельное соединение двух четырехполюсников.

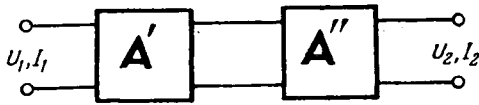


Рис. 3. Каскадное соединение двух четырехполюсников.

$$U'_2 = U''_1; I'_2 = I''_1; U'_1 = U_1; U''_2 = U_2; I'_1 = I_1; I''_2 = I_2.$$

2) имеющие короткое замыкание одного входного зажима с одним выходным (Т- и П-образные схемы) — короткозамкнутые зажимы всех входящих в соединение четырехполюсников должны соединяться вместе; 3) имеющие конечную проводимость между любыми двумя входным и выходным зажимами (мостовые схемы) — не могут быть соединяемы друг с другом или с четырехполюсником второй группы.

Для каскадного соединения удобно пользоваться уравнениями активного четырехполюсника в виде

$$\begin{vmatrix} U_1 \\ I_1 - I_{\kappa 1} \end{vmatrix} = A \cdot \begin{vmatrix} U_2 \\ I_2 - I_{\kappa 2} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где  $A = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix}$  — общая матрица пассивного четырехполюсника.

Уравнения эквивалентного четырехполюсника для каскадного соединения двух четырехполюсников с общими матрицами  $A'$  и  $A''$  (рис. 3) имеют вид:

$$\begin{vmatrix} U_1 \\ I_1 - I'_{\kappa 1} \end{vmatrix} = A' \cdot A'' \cdot \begin{vmatrix} U_2 \\ I_2 - I''_{\kappa 2} \end{vmatrix} + A' \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ I'_{\kappa 1} - I'_{\kappa 2} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

где  $I'_{\kappa 1}$  и  $I''_{\kappa 2}$  — токи на входе и выходе первого четырехполюсника при одновременном двустороннем коротком замыкании его;

$I'_{\kappa 1}$  и  $I''_{\kappa 2}$  — то же для второго четырехполюсника.

Последнее выражение отличается от (5) только подстановкой вместо токов на входе и выходе эквивалентного четырехполюсника при одновременном двустороннем коротком замыкании его их выражений:

$$\begin{aligned} I_{\kappa 1} &= I'_{\kappa 1} + \left( A'_{22} - A_{22} \frac{A'_{12}}{A_{12}} \right) (I''_{\kappa 1} - I'_{\kappa 2}), \\ I_{\kappa 2} &= I''_{\kappa 2} - \frac{A'_{12}}{A_{12}} (I'_{\kappa 1} - I'_{\kappa 2}), \end{aligned} \quad (7)$$

а вместо матрицы  $A$  эквивалентного четырехполюсника — равного ей произведению  $A' \cdot A''$ .

Вместо (6) можно написать также

$$\begin{vmatrix} U_1 - U'_{\kappa 1} \\ I_1 \end{vmatrix} = A' \cdot A'' \cdot \begin{vmatrix} U_2 - U''_{\kappa 2} \\ I_2 \end{vmatrix} + A' \cdot \begin{vmatrix} U''_{\kappa 1} - U'_{\kappa 2} \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (6a)$$

Приведенные выражения являются обобщением известных выражений для пассивных четырехполюсников. Последние выражения получаются из первых путем приравнивания нулю напряжений холостого хода или соответственно токов короткого замыкания. В обоих случаях применение матричного исчисления ограничивается схемами соединения четырехполюсников, при которых соблюдаются указанные в статье условия.

Приложение

#### Вывод выражения (6)

Для первого четырехполюсника

$$\begin{vmatrix} U'_1 \\ I'_1 - I'_{\kappa 1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ A'_{21} & A'_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U'_2 \\ I'_2 - I'_{\kappa 2} \end{vmatrix}. \quad (1a)$$

Для второго четырехполюсника

$$\begin{vmatrix} U''_1 \\ I''_1 - I''_{\kappa 1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A''_{11} & A''_{12} \\ A''_{21} & A''_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U''_2 \\ I''_2 - I''_{\kappa 2} \end{vmatrix}, \quad (2a)$$

Из (2a)

$$\begin{vmatrix} U''_1 \\ I''_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A''_{11} & A''_{12} \\ A''_{21} & A''_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U''_2 \\ I''_2 - I''_{\kappa 2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ I''_{\kappa 1} \end{vmatrix}, \quad (3a)$$

(1a) можно представить

$$\begin{vmatrix} U'_1 \\ I'_1 - I'_{\kappa 1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ A'_{21} & A'_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U'_2 \\ I'_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ A'_{21} & A'_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ -I'_{\kappa 2} \end{vmatrix}. \quad (4a)$$

Так как  $U'_2 = U''_1$  и  $I'_2 = I''_1$ , то можно подставить (3a)

в (4a) вместо  $\begin{vmatrix} U'_2 \\ I'_2 \end{vmatrix}$  и получить выражение

$$\begin{vmatrix} U'_1 \\ I'_1 - I'_{\kappa 1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ A'_{21} & A'_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A''_{11} & A''_{12} \\ A''_{21} & A''_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} U''_2 \\ I''_2 - I''_{\kappa 2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ A'_{21} & A'_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ I''_{\kappa 1} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ A'_{21} & A'_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ -I'_{\kappa 2} \end{vmatrix},$$

тождественность которого с (6) очевидна.

#### Литература

1. П. К. Акульшин, И. А. Кощеев и К. Е. Кульбацкий. Теория связи по проводам. Связьиздат. 1940.
2. Б. П. Асеев. Четырехполюсники. Связьиздат. 1944.
3. Б. П. Асеев. Основы радиотехники. Связьиздат. 1947.

[28. 7. 1348]

## Основные тенденции в развитии городских электрических сетей за рубежом

**Электроснабжение городов.** До недавнего времени городским электрическим сетям в капиталистических странах уделялось совершенно недостаточное внимание. В ряде городов, в частности в США, сохранились даже старые сети постоянного тока. Несовершенные схемы и оборудование не обеспечивали нужную пропускную способность и приводили к большим потерям энергии. В результате потребовалась весьма интенсивная разработка вопросов рационализации всего городского электротехнического хозяйства.

Сети трехфазного переменного тока вначале сооружались по системе двух ступеней напряжения: первичная сеть с напряжением 2,3 кВ или 1,1 кВ и вторичная — 400 В и ниже. Реконструкция сетей осуществлялась в дальнейшем по следующим основным направлениям: а) путем повышения напряжения первичной сети до 4, 6 или 10 кВ и б) путем добавления ступени более высокого напряжения—13, 22 или 33 кВ. Промежуточные ступени напряжения в ряде городов в дальнейшем были исключены, что привело принципиально к той же системе двух напряжений, но с более высоким первичным—до 33 кВ. Система с тремя ступенями получила применение в средних и крупных городах с неравномерной плотностью нагрузок. Для небольших городов и окраин большей частью ограничиваются двумя ступенями напряжения. Однако, в ряде случаев для электроснабжения центральных районов крупных городов (Берлин, Нью-Йорк) применяют также две ступени. В будущем электроснабжение крупных городов предусматривается по системе двух ступеней напряжения, но с независимым питанием потребителей большой мощности от первичной сети и применением замкнутой сети низкого напряжения [Л. 1].

При плотности нагрузок до 3 800 кВА/км<sup>2</sup> и применении воздушных линий капитальные затраты в системе двух ступеней напряжения (13,2 кВ и 240/120 В) меньше, чем в системе трех ступеней напряжения (13,2; 4,2 кВ и 240/120 В). При подземных кабельных сетях система трех ступеней напряжения оказывается более экономичной лишь для сравнительно небольшой плотности нагрузок (до 400 кВА/км<sup>2</sup>). Значительные преимущества имеет система двух ступеней напряжения и в отношении потерь энергии [Л. 2].

В городах США находят также применение смешанная система<sup>1</sup> распределения электроэнергии с однофазными ответвлениями к потребителям. Преимуществом этой системы является возможность перевода сети на более высокое напряжение с наименьшими затратами. Первоначальная стоимость сооружения сети снижается при расположении воздушных линий высокого и низкого напряжения на общих опорах и при общем заземляющем проводе. К недостаткам таких схем следует отнести повышенную стоимость однофазных двигателей по сравнению с трехфазными (примерно в 1,7 раза) и увеличенные потери энергии в железе однофазных трансформаторов и в линиях сети [Л. 2]. Применению смешанной системы в городах способствовало ее широкое предварительное освоение и положительные результаты эксплуатации в сельскохозяйственных районах, отличающихся большим числом однофазных нагрузок.

**Ступени напряжения.** Для капиталистических стран показательное отсутствие стандартной шкалы напряжений. Хотя в процессе развития городской электроснабжающей системы и наблюдалась тенденция к введению большего единообразия в шкалу номинальных напряжений, но до настоящего времени имеет место значительное их разнообразие. Так в США: 33; 22; 13,2; 12; 7,2; 4,86; 4,16 кВ и 600; 480 (440); 240; 208; 120 В; в Западной Европе: 33; 20; 15; 11; 6; 3 кВ; 380; 220 и 120 В.

В целом для городских электроснабжающих систем США наблюдается общая тенденция к повышению номинального напряжения первичных сетей, обусловленная технико-экономическими преимуществами. Например, для города с числом жителей 150 тыс. чел. и плотностью нагрузки 1 700 кВА/км<sup>2</sup> общая стоимость первичной сети (капиталовложения и эксплуатационные расходы) при напряжении 12 ÷ 13,2 кВ оказывается на 144 тыс. долл. меньше, чем при напряжении 4 кВ [Л. 3].

Напряжения 12 и 13,2 кВ в ряде городов США применялись для воздушных сетей еще до второй мировой войны при использовании смешанной системы распределения электроэнергии. Первоначальные затраты оказывались при этом наименьшими (экономия достигала 50%).

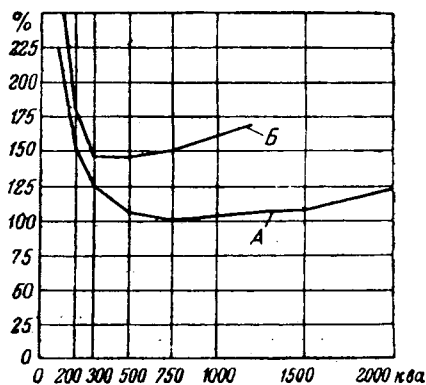
Любопытно отметить, что главное затруднение при переводе первичных сетей городов на напряжение 12 ÷ 13,2 кВ состояло в сохранении необходимого расстояния от проводов до деревьев. Выходом из него явились подрезка деревьев или применение в этих местах кабеля, подвешиваемого на столбах (см. ниже).

Реконструируемые и сооружаемые вновь первичные питающие сети нередко выполняются уже на номинальные напряжения 22 и 33 кВ [Л. 4, 5, 19].

В Западной Европе номинальные напряжения первичных сетей были выше, чем в США. Однако, в ряде случаев, и здесь наблюдается тенденция к переводу существующих сетей на более высокое напряжение [Л. 6].

Значительная доля капиталовложений и большие потери энергии, свойственные распределительным сетям низкого напряжения, привлекли серьезное внимание к их реконструкции. Одним из основных направлений здесь явилось повышение номинального напряжения. Вместо применявшейся ранее трехфазной системы на 220—120 В получает распространение четырехпроводная система на

Рис. 1. Удельная относительная стоимость (%/кВА) радиальной сети с комплектными подстанциями в зависимости от мощности комплектных подстанций  
А—вторичная сеть с номинальным напряжением 480 В; Б—то же 208/120 В.



<sup>1</sup> См. подробнее "Одноразные распределительные сети в США". Электричество № 4, стр. 15, 1945.

напряжении 440—380 в и частично смешанная система (обычно трехпроводная). Это позволяет выполнять включение токоприемников на фазное напряжение.

Экономические преимущества повышения номинального напряжения во вторичных сетях для случая выполнения глубокого ввода высокого напряжения с применением комплектных подстанций—показаны на рис. 1 [Л. 7].

Схемы коммутации сетей. Подстанции. Конструкции сетей. В практике США нашли преимущественное применение приведенные в таблице и на рис. 2 схемы коммутации сетей и подстанций [Л. 8].

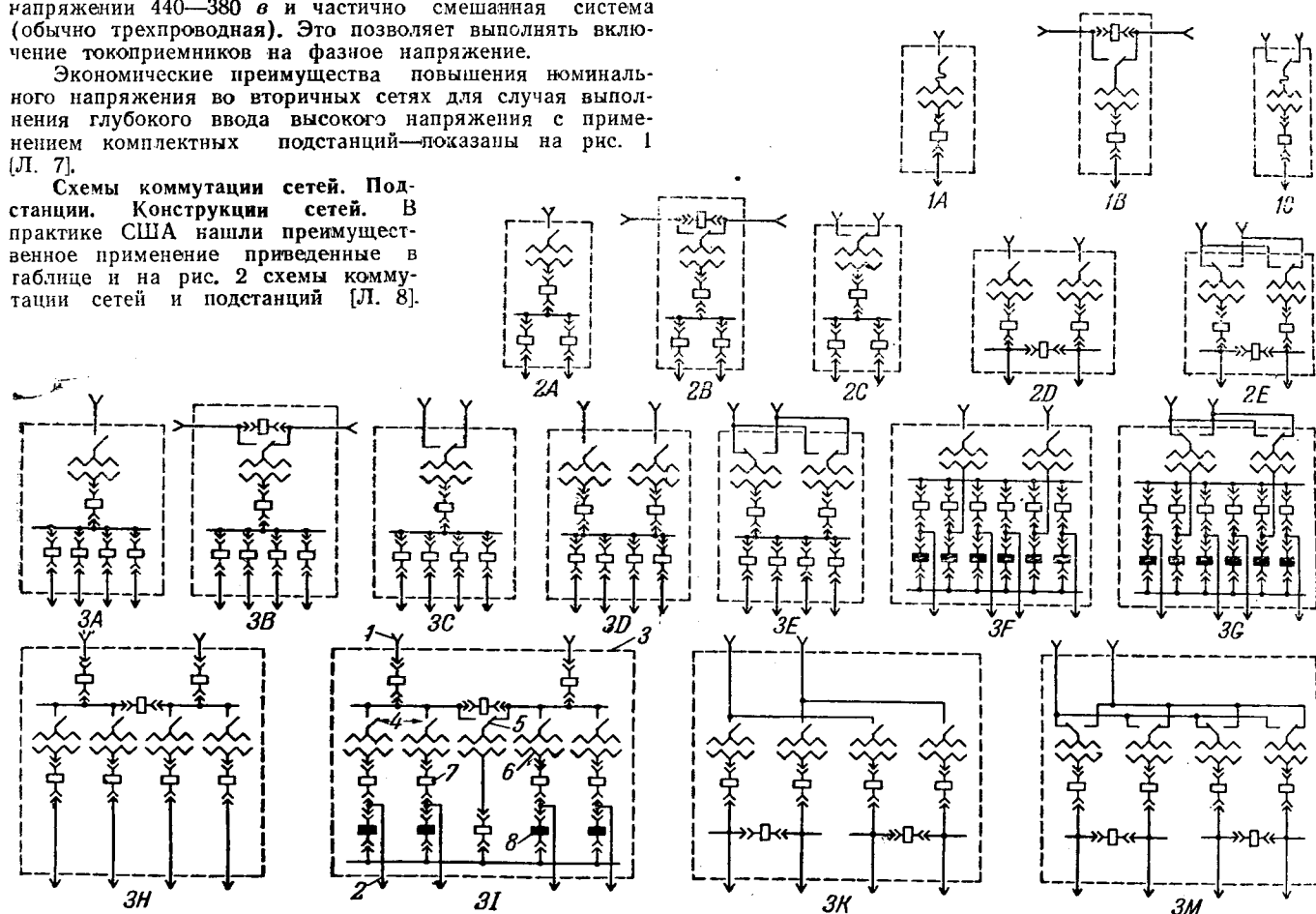


Рис. 2. Различные комбинации комплектного оборудования для распределительных подстанций.

1—ввод питающего фидера в н.; 2—отходящий фидер н. н.; 3—комплектное оборудование; 4—разъединитель или выключатель нагрузки; 5—переключатели; 6—силовой трансформатор; 7—выключатель комплектного оборудования в замкнутом положении; 8—то же в выключенном положении.

Объект	Схема коммутации сети	С х е м ы		
		подстанции	первичной сети (фидеров)	вторичной сети
Сельскохозяйственные районы	Радиальная	Однофидерная—1А, 1В, 1С двухфидерная—2А, 2В, 2С	Радиальные	Радиальные
Пригородные районы и малые города	Радиальная	Однофидерная—1А, 1В, 1С двухфидерная—2А, 2С, 2Д, 2Е	Радиальные	Радиальная или полумасштабная сетка
		Двухфидерная—2В, 2С, 2Д, 2Е	Петлевые	
Районы городов и большие города	Радиальные	Однофидерная—1А, 1В, 1С двухфидерная—2В, 2С, 2Д, 2Е Трех- или многофидерная	Радиальные	То же
	Первичная сетка	Однофидерная—1А или трех- и многофидерная—3А	Связывающие	То же
	Петлевая радиальная	Двухфидерная—2В, 2С, 2Д и 2Е или трех- и многофидерная—3В, 3М	Петлевые	То же
	Вторичная сетка	Двухфидерная—2Д, 2Е, или трех- и многофидерная—3Д, 3Е, 3Ф и 3Г	Радиальные	Петлевая, кольцевая или сетка
Коммерческие районы с высокой плотностью нагрузок	Вторичная сетка	Трех- или многофидерная—3Д, 3Е, 3Ф и 3Г	Радиальные	Сетка

Радиальная схема получила большое распространение как в случаях малой плотности нагрузок (сельскохозяйственные районы), так и при значительной плотности нагрузок (малые города, пригородные районы, большие города). В малых городах и пригородных районах чаще применяется радиальная схема с использованием смешанной системы распределения (рис. 3). В больших городах при сравнительно большей плотности нагрузок и близком расположении фидеров также применяется радиальная схема, но с аварийными связями (рис. 4) [Л. 9]. Их про-

пускная способность составляет примерно  $\frac{2}{3}$  или больше от таковой для фидеров.

Большое распространение (особенно в США) получили петлевые схемы для питающих и распределительных сетей (рис. 5). В них отсутствуют специальные аварийные связи, так как сами эти схемы достаточно обеспечивают бесперебойное электроснабжение потребителей.

Высокая степень надежности электроснабжения в сочетании с хорошим режимом напряжений, эксплуатационной гибкостью и экономичностью достигается при срав-

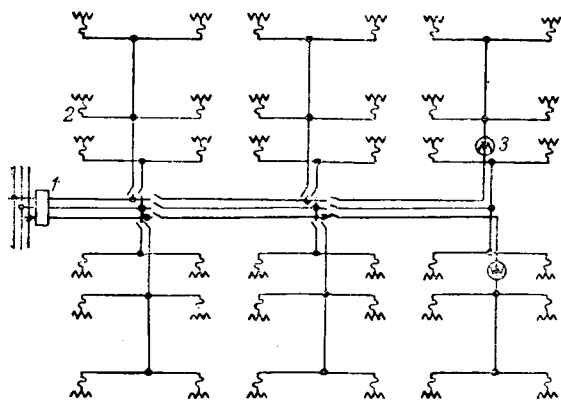


Рис. 3. Первичные радиальные распределительные сети смешанной системы. Каждая линия изображает отдельную фазу.

1—трехфазный выключатель; 2—предохранитель или защитный автомат; 3—фидерный регулятор напряжения.

нительно больших плотностях нагрузок устройством замкнутых сетей высокого и низкого напряжения. Применяются две основных разновидности сетей высокого напряжения: а) с двумя выключателями в каждом фидере, соединяющем подстанции сетки (по одному на его концах) и б) с одним выключателем в соединительном фидере, обычно в его середине. Главным преимуществом первой разновидности является падение меньшей нагрузки при повреждении в соединительном фидере. Вторая разновидность более экономична, требует в два раза меньше выключателей. Линии, питающие комплекты подстанции сетки, выполняются обычно на напряжение 11—33 кВ при мощности этих подстанций в 1 000—3 000 кВА. Находит также применение модификация второй разновидности сетки—с установкой тщательно отрегулированных предохранителей на середине соединительного фидера. Эти предохранители должны подвергаться достаточно частому осмотру. В ряде городов, существующие подстанции приспособляются для работы их в условиях сетки (разделяются на секции мощностью 1 000—3 000 кВА), причем в большинстве случаев дополнительно требуется только специальная защита. Сетка высокого напряжения часто применяется в небольших городах или торговых районах, где нагрузка составляет всего несколько сот киловатт.

Сопоставление распределительных систем при разных типовых конструкциях линий в районе площадью около 41 км<sup>2</sup> показывает, что при плотности нагрузок 200—2 000 кВА/км<sup>2</sup> сетка высокого напряжения требует меньших капитальных затрат, если в основном она выполняется воздушной. Но эта система оказывается неэкономичной при выполнении всех линий подземными кабелями и при плотности нагрузок ниже 200 кВА/км<sup>2</sup> [Л. 10]. Такая система применима при неравномерных по плотности нагрузках, а также при неодинаковом их росте.

Весьма большое распространение получила замкнутая сетка низкого напряжения, при которой отпадает необходимость резервирования в первичной сети, а осуществление глубокого ввода может быть выполнено по простой радиальной схеме. Вторичная сетка применяется преимущественно в виде подземной сети, хотя в ряде случаев она выполняется также и воздушными линиями, представляющими иногда продолжение подземной сетки. Эта сетка большей частью выполняется четырехпроводной на напряжение 208/120 в или 380/240 в. Первичная сеть выполняется на напряжение 33, 22 и 12 кВ.

В подземных сетях применяются комплекты подстанции с трансформаторами мощностью 150—600 кВА, а в надземных сетях—на 50—150 кВА. Сопоставление первоначальных затрат показывает, что при выполнении первичной и вторичной сетей воздушными линиями система вторичной сетки оказывается наиболее рациональной при плотностях нагрузок выше 1 200 кВА/км<sup>2</sup>, а при выполнении воздушной только первичной сети—при плотностях нагрузок выше 1 400 кВА/км<sup>2</sup> [Л. 10].

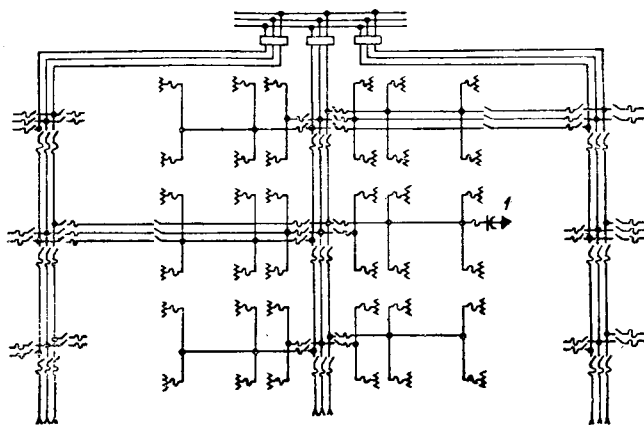


Рис. 4. Первичные радиальные распределительные сети смешанной системы, с аварийными связями. Каждая линия изображает отдельную фазу.

1—конденсатор.

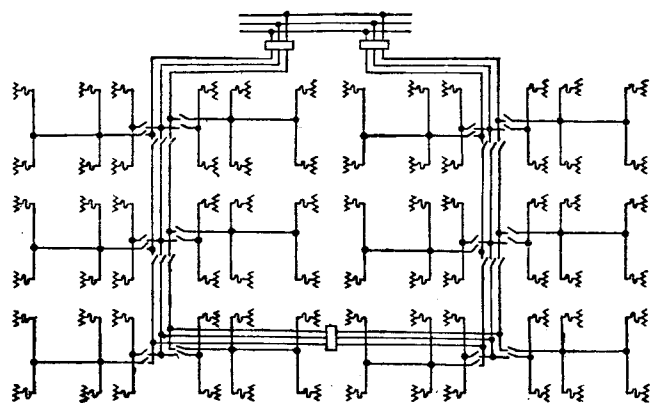


Рис. 5. Первичные петлевые распределительные сети смешанной системы. Каждая линия изображает отдельную фазу.

Анализ годовых эксплуатационных расходов устанавливает, что при нагрузках выше 3 800 кВА/км<sup>2</sup> вторичная замкнутая сетка, выполненная подземным кабелем, более экономична, чем радиальная система с применением воздушных линий [Л. 11].

Американская сетка выполняется жесткой и снабжается сетевыми автоматами у трансформаторов. Система сетки, разработанная в СССР,—без сетевых автоматов и с предохранителями во вторичных магистралях<sup>2</sup>—является более простой и обеспечивающей бесперебойность электроснабжения.

Значительное распространение получили схемы сетей, именуемые полужамкнутой сеткой [Л. 12] и представляющие параллельное соединение нескольких трансформаторов на стороне низкого напряжения, а со стороны высокого напряжения присоединенных к общему распределительному фидеру (рис. 6). Защита трансформаторов и вторичных сетей в этих схемах осуществляется предохранителями. Применение полужамкнутой сетки в большинстве случаев вызвано ростом числа и мощности установок с электродвигателями для коммунальных целей. Значительные пусковые токи таких установок обуславливают недопустимые колебания напряжения у потребителей. Наряду с основным назначением, эти схемы позволяют также уменьшить суммарную установленную мощность сетевых трансформаторов по сравнению с радиальной схемой.

Характерной особенностью современного строительства подстанций является применение блоков и комплектов устройств, которые могут быть добавлены или изъяты в зависимости от потребности эксплуатации [Л. 13].

<sup>2</sup> См. Электричество, № 5, 1945, стр. 54 и в настоящем номере стр. 94—95.



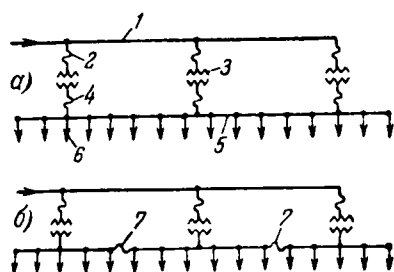


Рис. 6. Типовые схемы полужамкнутой сети.

1—распределительный фидер; 2—высоковольтные предохранители; 3—сетевой трансформатор; 4—низковольтный предохранитель; 5—вторичная распределительная сеть; 6—вводы к потребителям; 7—предохранители в сети низкого напряжения.

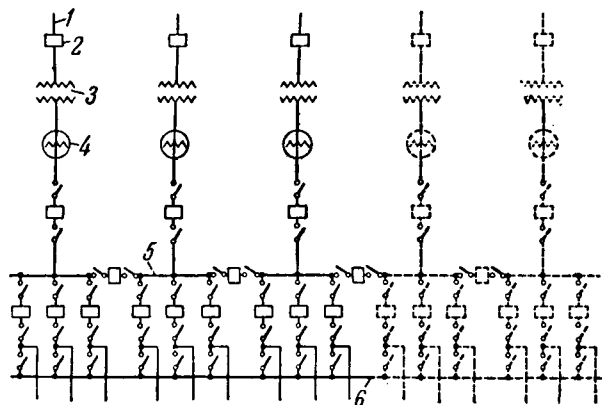


Рис. 7. Распределительная подстанция типа «секционного книжного шкафа», составленная из отдельных комплектных подстанций.

1—линия; 2—автоматический выключатель; 3—трансформатор; 4—регулятор; 5—главные шины; 6—передаточные шины.

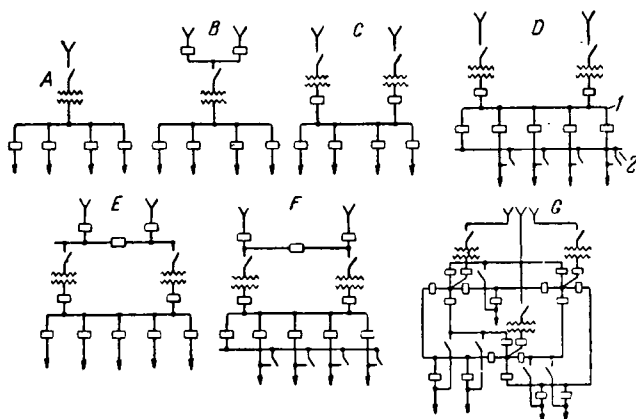


Рис. 8. Варианты типовых схем питающих подстанций.

1—главные шины; 2—передаточные шины. Подстанции А и В  $1 \times 5000$  кВА 13,4 кВ; подстанции С, D, E, F  $2 \times 3750$  кВА 13,4 кВ; подстанции G  $3 \times 2500$  кВА 13,4 кВ.

Комплектные подстанции изготавливаются для применения в различных случаях [Л. 14]: для городов со значительной нагрузкой и для крупных промышленных предприятий (1500—25000 кВА) для изолированного питания и для сетей высокого напряжения (750—2000 кВА), а также для резерва (передвижная подстанция 1000—3000 кВА).

Весьма большое применение в США получило соединение комплектных подстанций в одну распределительную подстанцию типа «секционного книжного шкафа» (рис. 7).

Недавно разработаны и применены подстанции стандартных конструкций (стандартизация структуры и устройства ее корпуса), дающие возможность устанавливать оборудование разных размеров и использовать снятое с

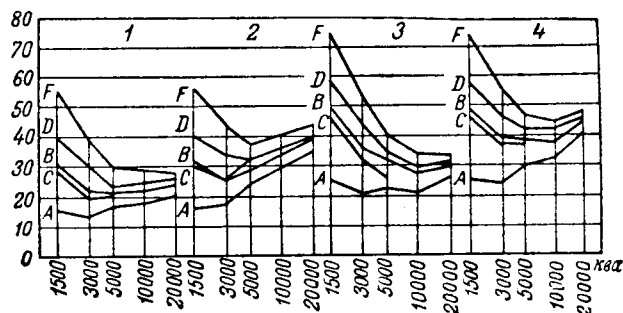


Рис. 9. Зависимость суммарных капиталовложений в долларах на 1 кВА нагрузки от мощности подстанций при различном конструктивном выполнении сетей.

1—воздушные питательная и первичная распределительные сети; 2—воздушная питательная сеть и подземная кабельная первичная распределительная сеть; 3—подземная кабельная питательная сеть и воздушная первичная распределительная сеть; 4—подземные кабельные питательная и первичная распределительные сети. Плотность нагрузки 580 кВА/км<sup>2</sup>. Номинальные напряжения: питательной сети—13,8 кВ, первичной распределительной сети—4,16 кВ. Обозначения соответствуют схемам, приведенным на рис. 8.

других подстанций. Это снижает стоимость их сооружения и расширения [Л. 15].

Одним из основных направлений в развитии схем электроснабжения городов является применение глубокого ввода высокого напряжения с маломощными подстанциями. Дробление подстанций стало особенно развиваться в связи с применением комплектных устройств и дистанционного управления выключателями и разъединителями. Такая схема, наряду с уменьшением потерь энергии и значительной экономией цветных металлов, оказывается значительно лучше приспособленной к питанию нагрузки. В этом случае резервная мощность при небольших подстанциях значительно меньше. Указанной схеме уделяется большое внимание не только в США, но и в Западной Европе. В английской стандартной системе с трансформаторами небольшой мощности затрата меди составила 78% от затрат при обычной системе, с крупными подстанциями при таких же нагрузках, но распределенных на площади, в 1,6 раза меньшей [Л. 16].

Специальные технико-экономические исследования оптимальной мощности подстанций при разных схемах их коммутации (рис. 8), различном конструктивном выполнении первичной сети и разных ступенях ее напряжения (13,8 кВ и 34,5 кВ) привели к нижеследующим основным выводам [Л. 17].

1. Наиболее экономичное решение для простой радиальной воздушной сети получается при подстанциях мощностью 1500 и 2500 кВА (рис. 9, кривые 1).

2. Наиболее экономичное решение для замкнутой распределительной сети получается при подстанциях мощностью 2500—5000 кВА (рис. 9). Более мощные подстанции оказались экономичными в случае подземных кабельных сетей, а менее мощные—в случае воздушных сетей.

3. Повышение номинального напряжения питающих линий с 13,8 кВ до 34,5 кВ увеличивает капиталовложения только при подстанциях мощностью до 5000 кВА (рис. 10). Так, при подстанциях мощностью 1500—3000 кВА повышение капиталовложений составляет: в случае кабельной сети около 20%, а в случае воздушной—около 14%. При мощности подстанций выше 5000 кВА в воздушных сетях и выше 7500 кВА в подземных кабельных сетях капиталовложения при указанном повышении напряжения снижаются.

4. С увеличением номинального напряжения питающих линий повышается наименьшая мощность подстанций (рис. 10) для всех рассмотренных схем (рис. 8) с 3000—5000 кВА при напряжении 13,8 кВ до 5000—20000 кВА при переходе на напряжение 34,5 кВ.

5. Увеличение напряжения питающих линий приводит к снижению потерь энергии. Так, при подстанциях мощностью 1500—10000 кВА переход на напряжение 34,5 кВ приводит к уменьшению стоимости потерь энергии в сред-

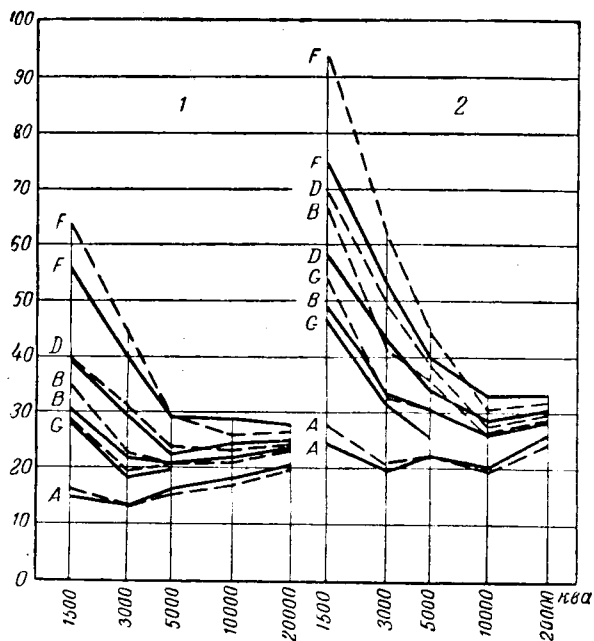


Рис. 10. Зависимость суммарных капиталовложений в долларах на 1 кВА от мощности подстанций и конструктивного выполнения сетей.

1—воздушные питательная и первичная распределительные сети; 2—подземная кабельная питательная сеть и воздушная первичная распределительная сеть. Плотность нагрузки 580 кВА/км<sup>2</sup>. Обозначения соответствуют схемам, приведенным на рис. 8. Номинальные напряжения питательной сети: — 13,8 кВ, — — — 34,5 кВ.

нем на 10%. Суммарные расходы (капиталовложения и стоимость потерь энергии) оказываются минимальными при мощности подстанций около 5000 кВА (рис. 11).

Весьма важной тенденцией является упрощение схем подстанций в связи с повышением надежности и введением новых типов высоковольтного электрооборудования.

Переход на трехфазное оборудование вместо однофазного позволило внедрить стандартные бронированные распределительные устройства с одной системой шин. Вместо выключателей эффективно используются предохранители высокого напряжения с большой отключающей способностью (до 1000 тыс. кВА) и разъединители мощности. Широко внедряются предохранители и выключатели повторного действия в воздушных распределительных сетях с номинальным напряжением 13—35 кВ, степень надежности которых относительно мала. Стоимость предохранителей повторного действия примерно на 40% ниже стоимости выключателей повторного действия [Л. 18].

Усовершенствована релейная защита сетей в связи с применением быстродействующих выключателей (го средним временем выключения в 6—9 периодов).

Применение трубчатых разрядников обеспечило значительное повышение надежности работы воздушных линий 13,8 кВ (вместо 42 повреждений—2 повреждения в год на 100 миль линии) [Л. 19]. Повышена импульсная прочность выключателей.

Возрастающее применение в США получают кабели на напряжения до 12 кВ, открыто прокладываемые на воздухе [Л. 20]. Такие прокладки применяются в районах городов, в сельскохозяйственных и курортных местностях, а также в каналах метрополитена. Кабели выполняются из обычных медных жил, с короностойкой резиновой изоляцией и верхней неопределенной неэкранированной оболочкой и употребляются как в трехфазном, так и в однофазном исполнении. При осуществлении смешанной системы распределения эти кабели связываются медной лентой с медным многократно заземленным тросом. Этот трос служит нейтралью для магистральных линий, воздушных линий вторичной сети и линий уличного освещения [Л. 21]. При наружной прокладке кабели укрепляются на деревянных столбах длиной 10,5 м, на высоте около 8,4 м над поверхностью земли. Длина столба увеличи-

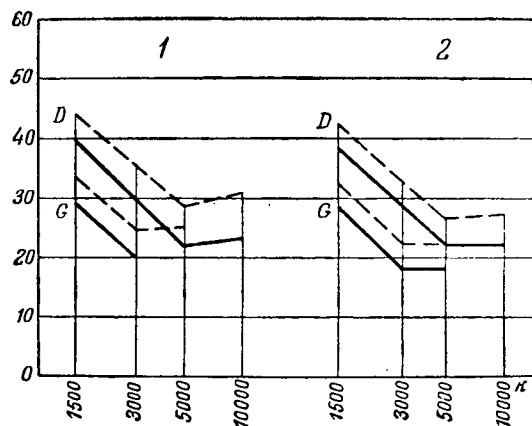


Рис. 11. Зависимость суммарных расходов (капиталовложений и стоимость потерь энергии) в долларах на 1 кВА нагрузки от мощности подстанций.

1—плотность нагрузки 580 кВА/км<sup>2</sup>; 2—плотность нагрузки 1160 кВА/км<sup>2</sup>. Питательная сеть 13,8 кВ и первичная распределительная сеть 4,16 кВ выполнены воздушными. Обозначения соответствуют схемам, приведенным на рис. 8. — капиталовложения, — — — капиталовложения совместно со стоимостью потерь энергии.

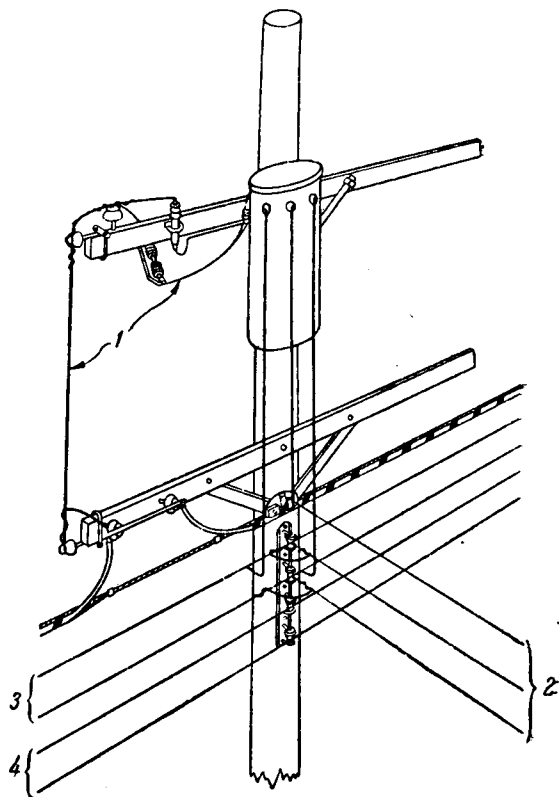


Рис. 12. Обычная коммутация вторичной сети при применении однофазных трансформаторов и кабелей, укрепленных на столбах.

1—изолированный провод; 2—трехпроводная сеть; 3—сеть освещения; 4—линия уличного освещения.

вается до 12—13,5 м, если на нем, кроме того, устанавливаются трансформатор и предохранители низкого напряжения (рис. 12).

В случае соединения кабелей с воздушными линиями практикуется установка разрядников. Хотя надежность работы современных воздушных линий на 33 кВ значительно повышена (в среднем — около трех повреждений на 100 миль в год) [Л. 19], все же линии такого напряжения выполняются в городах преимущественно подземным кабелем. Наряду с этим наблюдается тенденция бо-

лее широкого применения в городах воздушных линий, поскольку при этом значительно упрощается выполнение «тпаек».

Отсутствует однозначное решение по выбору способа конструктивного выполнения глубокого ввода в схемах электроснабжения городов. Этот вопрос решается на основе всестороннего сопоставления вариантов для каждой конкретной схемы.

Значительно повышена надежность работы сетевых трансформаторов, причем особенно улучшены их импульсные характеристики (все виды повреждений трансформаторов уменьшились за десятилетие с 0,8% аварий в год до 0,1% на одну группу трансформаторов) [Л. 18]. Широко развита тенденция (особенно в Западной Европе) замены масла в высоковольтной аппаратуре (выключатели, измерительные трансформаторы, проходные изоляторы, концевые муфты кабелей) негорючими изоляционными материалами.

**Регулирование напряжения.** Проблема регулирования напряжения уделяется, как и раньше, большое внимание. С целью автоматизации этого процесса широко применяются (особенно в США) трансформаторы со встроенными регуляторами, а также добавочные трансформаторы и конденсаторы. Такая встроенная аппаратура для автоматического регулирования напряжения выпускается в массовом количестве для трансформаторов комплектных подстанций, особенно в пределах мощностей 750—5 000 *кВА*. Налажен также выпуск малых трансформаторов на 10—20 *кВА* с встроенными регуляторами [Л. 22].

В первичных распределительных сетях нашли применение статические конденсаторы для целей регулирования напряжения и для улучшения коэффициента мощности. Расчеты показали, что применение параллельно включенных конденсаторов для целей регулирования напряжения наиболее рационально в случае небольшой плотности нагрузок. Кроме того, установлена целесообразность комбинированного применения параллельно включенных конденсаторов и регуляторов [Л. 23]. Все возрастающее применение находят конденсаторы во вторичных воздушных сетях, где они устанавливаются вблизи больших реактивных нагрузок (крупные индукционные двигатели). В хорошо нагруженных вторичных сетях при коэффициентах мощности ниже 0,9 применение конденсаторов весьма экономично [Л. 24]. Во вторичных воздушных сетях находит применение последовательное включение конденсаторов.

**Выводы.** 1. Необходимость технической реконструкции городского сетевого хозяйства за рубежом обусловила тенденцию повышения эксплуатационного напряжения во всех звеньях городской электроснабжающей системы: вновь сооружаемые питательные линии преимущественно выполняются на 22 и 33 *кВ*, а вторичные распределительные сети на 220 *В* и на 440/380 *В* (преимущественно внутри промышленных предприятий).

2. Изменение схем коммутации городской электроснабжающей системы включает следующие основные тенденции: а) осуществление глубокого ввода высокого напряжения к центрам нагрузки при одновременном дроблении мощности подстанций; б) осуществление электроснабжения городов по системе двух ступеней напряжений; в) применение смешанной системы распределения электроэнергии; г) применение в районах со значительной плотностью нагрузки (особенно при осуществлении глубокого ввода) замкнутых сетей высокого и низкого напряжения; д) упрощение схем коммутации подстанций и их стандартизация; е) упрощение электрооборудования, разработка и внедрение новых типов.

3. Повышение надежности электрооборудования и его упрощение в основном идет по следующим направлениям: а) повышение надежности воздушных линий 13—33 *кВ* усовершенствованием их защиты от перенапряжений и коротких замыканий; б) применение подземных кабельных линий на эти напряжения; в) применение кабельных линий на столбах вместо голых воздушных проводов для напряжения до 12 *кВ*; г) увеличение импульсной прочности сетевых трансформаторов и выключателей; д) вытеснение масла из высоковольтной аппаратуры распределительных устройств; е) введение дистанционного управления выключателями и разъединителями; ж) применение вместо выключателей плавких предохранителей высокого напряжения с отключающей способностью до 1 000 тыс. *кВА*; з) применение плавких предохранителей и выключателей повторного действия для воздушных линий; и) применение вместо выключателей разъединителей мощности.

4. Обеспечение необходимого качества напряжения у потребителя применением автоматического регулирования напряжения или специальных схем коммутации сетей (например, полузакнутой сетки).

### Литература

1. A. Adolph. JIEE, т. 88, № 503, стр. 634, 1938.
2. O. B. Falls. El. Light a. Power, № 2, стр. 78, 1945.
3. A. E. Silver. Bull. Edison El. Inst., т. 12, № 8, стр. 248, 1944.
4. G. C. Van Antwerp. El. Light a. Power, т. 22, № 7, стр. 34, 1944.
5. El. Light a. Power, № 8, стр. 72, 1944.
6. W. Kolbe. El. Wirt., т. 39, № 1, стр. 5, 1940.
7. D. I. Beeman, R. H. Kaufmann. El. Eng., т. 61, № 5, стр. 272, 1942.
8. I. S. Parsons. El. Light a. Power, т. 25, № 10, стр. 78, 1947.
9. I. S. Parsons. El. Light a. Power, т. 25, № 11, стр. 62, 1947.
10. I. S. Parsons, H. G. Barnett. Electrical Transmission and Distribution. Reference Book, гл. 21, стр. 580, 1944.
11. A. M. Dayle. El. Eng., т. 55, № 2, стр. 41, 1946.
12. I. S. Parsons, H. G. Barnett. Electrical Transmission and Distribution. Reference Book, гл. 20, стр. 567, 1944.
13. S. B. Farnheim. GER, т. 48, № 11, 1945.
14. M. C. Lachlon. El. Light a. Power, т. 22, № 1, стр. 76, 1944.
15. W. R. Weise. El. Light a. Power, т. 26, № 6, стр. 128, 1948.
16. Leech. JIEE, ч. 2, т. 88, стр. 525, 1941.
17. O. B. Falls. Tr. AIEE, т. 63, стр. 1078, 1944.
18. J. W. Drummond, E. E. Pilpho, E. P. Rhine. El. Light a. Power, т. 21, № 8, 1943.
19. A. Monteth. El. World, т. 121, № 24, стр. 93, 1944.
20. H. E. Jung, R. C. Blankenburg. El. Eng. № 3, стр. 223, 1948.
21. I. H. Miller. El. Light a. Power, т. 25, № 4, стр. 48, 1947.
22. R. E. Cootes, E. M. Hunter. GER, № 11, стр. 8, 1946.
23. O. B. Falls. El. World, т. 127, № 5, стр. 54 и № 7, стр. 105, 1947.
24. C. Hutchinson. El. Light a. Power, т. 26, № 6, стр. 135, 1948.

Кандидат техн. наук И. Г. ГЕРЦЕНШТЕЙН



## Электрификация железнодорожного транспорта на однофазном токе 50 гц

В связи с дефицитом угля в западно-европейских государствах, находящихся в сфере действия «плана Маршалла», еще более усугубившего тяжелое политико-экономическое положение этих стран, во Франции и Бельгии уделяется внимание вопросу перевода железных дорог на электрическую тягу. По подсчетам французских инженеров [Л. 1], экономия угля при переводе французских железных дорог на электрическую тягу составит 55%, а при использовании электроэнергии гидростанций может еще увеличиться.

**Электрификация железных дорог Франции.** Изучению проблемы выбора системы тока и рабочего напряжения в контактном проводе посвящен ряд статей. В этих статьях авторы отмечают, что расходы, обусловленные значительными одновременными капиталовложениями на стационарные сооружения — контактная сеть, подстанции и пр., не должны превышать экономии, получаемой от уменьшения расходов по эксплуатации электрифицированных железных дорог. Следует, однако, по мнению автора, различать капиталовложения в подвижной состав и в стационарные сооружения. Электровоз стоит приблизительно в два раза дороже паровоза, но зато электровоз в течение года выполняет в два раза больше работы. Поэтому по мере амортизации паровозного парка затраты железных дорог на приобретение подвижного состава остаются неизменными, независимо от исполнения парка паровозами или электровозами.

Стоимость подвижного состава и эксплуатационные расходы в основном пропорциональны объему перевозок. Иначе обстоит дело со стационарными сооружениями. Их стоимость не пропорциональна объему перевозок, а зависит исключительно от количества электрифицируемых километров пути. Как отмечается в статье, наиболее рациональной системой будет такая, при которой электровоз питается однофазным током 50 гц. При этой системе согласно произведенным расчетам стоимость стационарных сооружений снижается на 50% в сравнении с системой постоянного тока 1500 в. Для подвергавшейся исследованию линии с учетом электровозов экономия в целом составляет: для меди—65%; стали—45%; цемента—45%.

В таблице показаны потребности сечения меди, расстояния между подстанциями и характеристики подстанций для трех систем: постоянного тока с напряжением 1500 и 3000 в, и однофазного тока 15 000 — 20 000 в, 16 2/3 и 50 гц.

	Система однофазного тока 16 2/3 и 50 гц	Система постоянного тока	
		1500 в	3000 в
Напряжение в контактных линиях . . .	15 000—20 000 в	1500 в	3000 в
Сечение контактных проводов . . . . .	100 мм <sup>2</sup>	500 мм <sup>2</sup>	360 мм <sup>2</sup>
Расстояние между подстанциями . . .	50—80 км	15—20 км	30—40 км
Оборудование на подстанциях . . .	Трансформаторы	Группы из трансформаторов и ртутных выпрямителей	

Для большей наглядности на рисунке даны схемы четырех вариантов электрификации французской железной дороги Клермон—Ферран—Ним, протяженностью в 300 км. Даны такие варианты: А — система постоянного тока 1500 в; Б — система постоянного тока 3000 в; В — система однофазного тока 16 2/3 гц 15 000 в; Г — система однофазного тока 50 гц 20 000 в. Здесь наглядно выявлены преимущества стационарных сооружений системы однофазного тока 50 гц.

В статье «Проблема электрической тяги на однофазном токе 50 гц» [Л. 3] высказывается мысль, что если говорить о расширении электрификации железных дорог Франции, то следует ориентироваться на систему тяги с наименьшей стоимостью стационарных сооружений, и что этому требованию из четырех систем удовлетворяет только система однофазного тока 50 гц, представляющая идеальное, с точки зрения экономии, решение рассматриваемой задачи. Это справедливо, указывает автор, не только для второстепенных линий, но также и для главных линий с большим движением. Результаты трехлетнего изучения работы опытной линии на однофазном токе 50 гц в Холлентале (французская зона оккупации) дают, по мнению автора, основания заявить, что поставленная задача может считаться решенной. Необходимо только проведение соответствующих экспериментов для того, чтобы поставить эту работу на практическую базу.

Дальнейшее развитие электрификации железных дорог на постоянном токе 1500 в с точки зрения рентабельности не может быть оправдано. Если также рассматривать систему постоянного тока 3000 в под углом зрения рентабельности, то и 3000 в не вносит таких решающих изменений, чтобы можно было серьезно говорить о внедрении этой системы наряду с существующей во Франции системой 1500 в. Системы постоянного тока более высокого напряжения — 4500 в и выше — сопряжены с такими техническими трудностями, которые пока еще не могут быть решены.

В ближайшее время, с вводом в эксплуатацию электрифицированной железнодорожной линии Париж—Лион, будет завершена электрификация 10% всей французской сети, или 13% в однопутном исчислении [Л. 1]. Автор высказывается о целесообразности увеличить протяженность электрифицированных железных дорог Франции в три—четыре раза.

**Электрификация железных дорог Бельгии.** В Бельгии [Л. 2] проектируется в течение 5 лет осуществить электрификацию 1500 км железнодорожного пути. Этот проект охватывает 50% всех двухпутных линий и 70% всего графика движения бельгийских железных дорог. Запроектированную работу собираются выполнить к началу 1952 г. В Бельгии признали для себя более выгодной систему постоянного тока 3000 в, исходя из следующих соображений:

1. Система однофазного тока нормальной частоты 50 гц, которая представляет наибольший интерес, пока еще не вышла из стадии предварительного изучения.

2. Система однофазного тока пониженной частоты 16 2/3 гц была бы рентабельна при условии питания преобразовательных подстанций от трехфазных распределительных сетей 50 гц с преобразованием тока на пониженную частоту 16 2/3 гц посредством ртутных выпрямителей. Однако, бельгийские специалисты отказались от надежды осуществить эту задачу в ближайшем будущем.

3. Электровозы, действующие на однофазном токе, не позволяют бельгийскому подвижному составу циркулировать на железных дорогах Франции и Голландии, где применена система постоянного тока 1500 в.

4. Переход на изготовление железнодорожного оборудования, работающего на однофазном токе, не будет способствовать развитию экспорта, так как запросы, поступающие в Бельгию из-за границы, относятся преимущественно к оборудованию для тяги на постоянном токе 3000 в.

5. В Бельгии разветвленная конфигурация железнодорожной сети и линий электропередачи облегчает выбор мест для частого размещения преобразовательных подстанций.

Приведенные выше соображения автора статьи отражают консервативные интересы фирм в вопросах развития техники. Пункты 3 и 4 обусловлены не техническими соображениями, а боязнью лишиться рынков сбыта и районов эксплуатации своего подвижного состава.

Технические проблемы, обусловленные однофазным током 50 гц, были предметом рассмотрения в двух статьях [Л. 1] и [Л. 3].

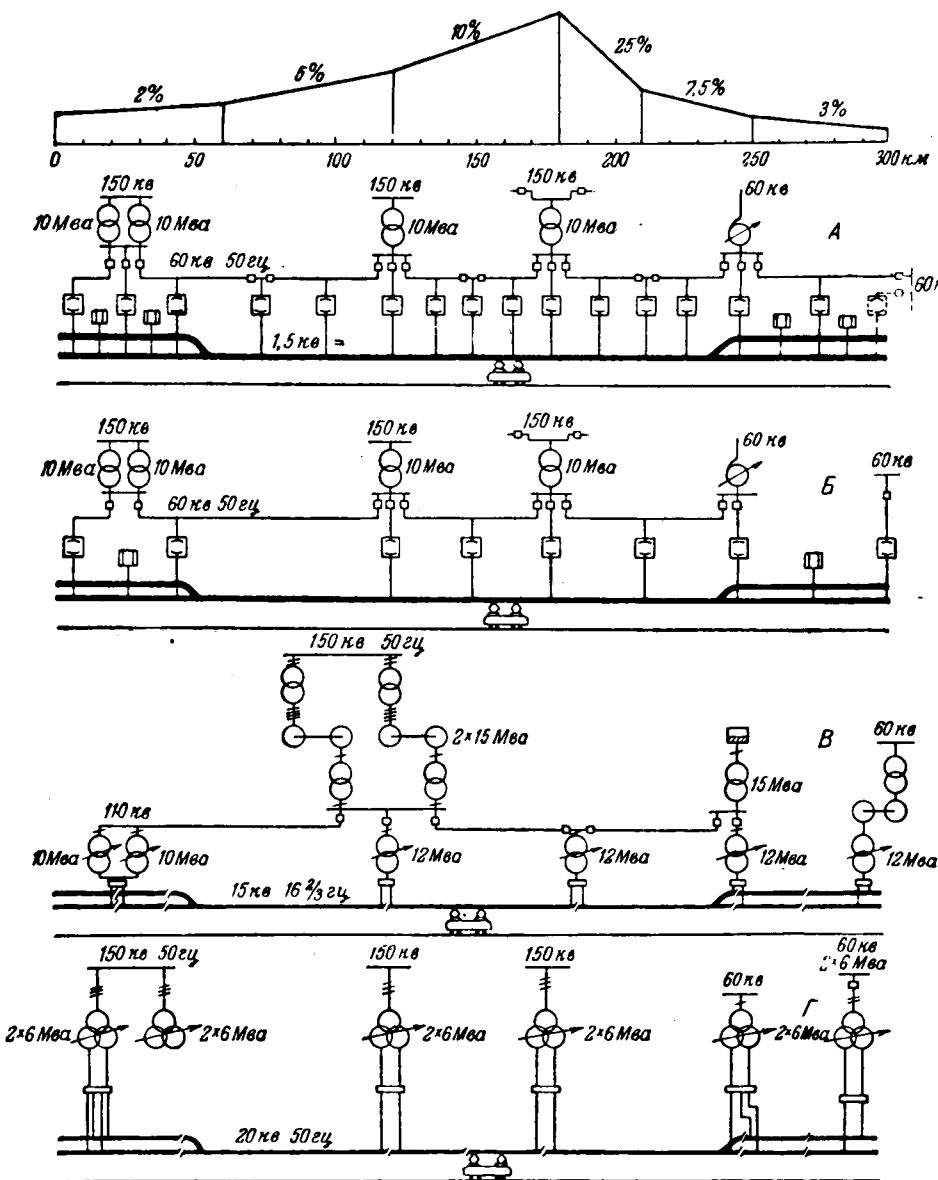
Хорошо известно, что приключение значительных однофазных мощностей к трехфазной системе может вызвать асимметрию напряжений в фазах со всеми вытекающими отсюда неприятными последствиями для соседних потребителей, а также для самих электростанций. Чтобы устранить вредные влияния асимметрии следует обеспечить как можно меньшую индуктивность линии. Для этого, понятно, могут быть применены разные компенсирующие устройства.

методами расчета уменьшения асимметрии. Эти методы были проверены экспериментально.

Влияние на линии связи, проходящие вдоль железнодорожных путей и устранение помех при переходе на однофазный ток 50 гц находит, по мнению автора, свое естественное решение в том, что Управление почт, телеграфа и телефона Франции разработало свой собственный план замены воздушных линий кабельными.

Подобная реконструкция системы воздушных линий связи, расположенных вдоль железнодорожных путей оправдывается технически и экономически вне зависимости от электрификации транспорта. Управлением железных дорог Франции согласован перевод на кабель ряда линий связи, вдоль существующих железнодорожных путей, которые даже не предполагается электрифицировать на однофазном токе 50 гц. Не следует забывать, добавляет автор, что и система постоянного тока, в свою очередь, также оказывает вредное влияние на окружающие устройства своими блуждающими токами.

Главная трудность рассматриваемой проблемы — это создание однофазного тягового двигателя 50 гц. Серийные двигатели наилучшим образом отвечают условиям тяги благодаря своей автоматической регулировочной характеристике: тяговое усилие — скорость. Однофазные серийные двигатели при равенстве диаметров коллекторов реализуют меньшую мощность, чем серийные двигатели постоянного тока. Его использование хуже двигателя постоянного тока. Однако, основное отличие выражается в процессе коммутации. При постоянном токе проблема коммутации решается сравнительно просто. При однофазном токе процесс коммутации усложняется тем, что главный магнитный поток наводит в коммутируемом витке вторую э. д. с., которая может быть названа трансформаторной, аналогичной по своему характеру с э. д. с. индуктируемой во вторичной обмотке трансформатора. Эта э. д. с. трансформации зависит, во-первых, от величины главного потока, а во-вторых, от частоты тока и сдвинута на  $90^\circ$  относительно реактивной э. д. с. Результирующую э. д. с. в коммутируемом витке возможно компенсировать соответствующим смещением потока дополнительных полюсов. Для обеспечения хорошей коммутации требуется автоматическое регулирование величины шунтирующего сопротивления обмоток дополнительных полюсов. Изменение этого сопротивления должно производиться в зависимости от скорости, а также от нагрузки. Практически эту задачу трудно реализовать. Поэтому обычно ограничиваются подбором величины сопротивления для полной компенсации э. д. с. в коммутируемом витке при среднем режиме, наиболее часто встречающимся в эксплуатации. В частности, при пуске следует развивать большее ускорение, чтобы способствовать быстрому переходу двигателя в зону скоростей с хорошей коммутацией. Таким образом, при однофазном токе огра-



Асимметрию можно значительно уменьшить путем секционирования контактной сети и питанием отдельных участков от различных фаз в добавлении к рациональному выбору точек питания от высоковольтной сети. Вместо обычных трансформаторов следует применять трансформаторы системы Скотта, которые обеспечивают наилучшие условия для трехфазной сети при больших однофазных нагрузках. Как известно, такие трансформаторы нашли применение в Холлентале<sup>1</sup>.

Результаты изучения и опыты, проведенные Управлением французских железных дорог на опытной линии в Холлентале, дали возможность автору утверждать, что для французской высоковольтной сети асимметрия не превысит допустимых пределов. Управление государственных железных дорог Франции располагает в настоящее время, по словам автора статьи [Л. 3], надежными

<sup>1</sup> Опытная ветка 57 км, построенная в Германии (в горах Бавария) и пущенная в пробную эксплуатацию еще в 1936 г. В течение почти 8 лет немцами там производились испытания четырех опытных электровозов — Сименса, АЕС, ВВС и Круппа, питание которых осуществлялось от контактной сети однофазного тока 50 гц.

нижение режима работы двигателя определяется не только температурой перегрева, как при постоянном токе, но зависит также в равной степени от величины напряжения э. д. с. в коммутируемой секции. Последнее не должно выходить за пределы определенных значений, т. е. должно быть учтено ограничение по коммутации.

В однофазных серийных коллекторных двигателях 50 гц необходимо снизить магнитный поток на полюс в три раза в сравнении с потоком двигателя 16 $\frac{2}{3}$  гц. Для двигателя 50 гц одинаковой мощности это приводит к возрастанию тока в три раза, а следовательно, и к увеличению размеров коллектора и числа щеток. Таким образом, коллекторный двигатель 50 гц значительно тяжелее и более сложен по своей конструкции, чем двигатель 16 $\frac{2}{3}$  гц. Однако, серьезное изучение этого вопроса, по утверждению автора [Л. 3], приводит к благоприятным выводам. Не следует все же забывать те преимущества, которые свойственны однофазным серийным коллекторным двигателям. Действительно, при постоянном токе двигатель должен быть построен на максимальное напряжение контактной сети значительно превышающее среднее рабочее напряжение двигателя. Разгон двигателя постоянного тока осуществляется с помощью реостатов, работа которых, по условиям габаритов, рассчитывается на небольшой промежуток времени. Для расширения диапазона скоростей серийных двигателей постоянного тока приходится снижать тяговое усилие из-за шунтирования главного потока. К тому же возможности этого способа регулирования скорости крайне ограничены, а электрооборудование для переключения сопротивлений и ослабления главного потока очень сложно и в сильной степени отрицательно влияет на качество электровоза постоянного тока.

Серийные однофазные коллекторные двигатели, наоборот, осуществляют регулирование скорости совершенно главным, соответствующим изменением подводимого напряжения к двигателю от нуля до максимальной величины. При этом каждое ответвление вторичной обмотки трансформатора может использоваться длительно. Такой двигатель способен отдавать свою полную мощность также при повышенных скоростях.

Однофазные электровозы в ближайшее время будут стоить не дороже электровозов постоянного тока 1500 в.

Существуют и другие возможные решения рассматриваемой проблемы: электровоз Кандо, двигатели Пунга-Шен, ртутные выпрямители на самом электровозе.

Следует отметить, что в Советском Союзе с 1931 г. академик К. И. Шенфер начал работать над проблемой создания однофазного коллекторного двигателя 50 гц. В настоящее время эти работы продвинуты вперед.

Опытные электровозы 50 гц. Управлением государственных железных дорог Франции заказано три опытных электровоза. Проекты этих электровозов были рассмотрены еще в апреле 1948 г. и они должны быть готовы в 1950 г. Предполагается использовать опытные электровозы в наиболее разнообразных и тяжелых условиях эксплуатации с целью как можно более всестороннего их испытания.

Основные характеристики опытных электровозов такие: общий вес—114 т, ходовая формула СоСо и ВВВ (6 ведущих осей), давление на ось—19 т, длительная мощность—3000 л. с., максимальная скорость 90—100 км/ч, скорость длительного режима—65 км/ч.

Для изготовления этих электровозов привлечен ряд французских и швейцарских фирм. Два электровоза оборудуются однофазными коллекторными двигателями 50 гц, а один двигатель—генератором и двигателями постоянного тока.

Швейцарская фирма «Эрликон» [Л. 4] и локомотивостроительная фирма «Винтертур» (Швейцария) строят один опытный электровоз типа СоСо с однофазными коллекторными двигателями 50 гц. Длительная его мощность 2590 квт. Тяговое усилие 14,2 т. Скорость 65 км/ч (при длительной мощности). На каждую ось приходится один двигатель. Всех двигателей шесть. Напряжение однофазного коллекторного двигателя 50 гц—250 в.

Другой электровоз также типа СоСо с однофазными

коллекторными двигателями 50 гц изготавливается французской фирмой Альстон-Томпсон. У этого электровоза на каждой оси приходится по два двигателя. Несмотря на это мощность его меньше мощности электровоза «Эрликон». Осторожности ради эта фирма (Альстон-Томпсон) изготовляет двигатели меньшей мощности.

Наконец третий электровоз типа ВВВ изготавливается французской фирмой «Вестингауз» совместно с фирмой «Шнейдер». Последняя выполняет его механическую часть. Этот опытный электровоз оборудуется вращающимся преобразователем (асинхронный двигатель и генератор постоянного тока) и нормальными серийными двигателями постоянного тока 1500 в.

Для всех трех электровозов предусмотрена возможность также работать от сети постоянного тока 1500 в. С этой целью на каждом электровозе с однофазными коллекторными двигателями 50 гц предусмотрен добавочный вращающийся преобразователь пониженной мощности. Эти агрегаты предназначены преобразовывать постоянный ток 1500 в в переменный ток 30 гц.

При работе опытных электровозов с однофазными коллекторными двигателями 50 гц на участках постоянного тока 1500 в тяговое усилие двигателей не изменяется, но их скорость уменьшается. При этом также используется электровозный трансформатор с его переключающей аппаратурой.

Опытный электровоз «Вестингауз-Шнейдер» при работе на участках постоянного тока 1500 в может непосредственно питать свои двигатели от контактной сети, так как на нем установлены нормальные двигатели постоянного тока 1500 в и в этих условиях он развивает полную мощность.

Во время разгона опытного электровоза «Вестингауз-Шнейдер» при работе на участках постоянного тока 1500 в его генератор постоянного тока используется в виде вольтодобавочной машины. Это позволяет обойтись без полного комплекта пуско-регулирующей аппаратуры, необходимой электровозу постоянного тока 1500 в.

В части однофазных коллекторных двигателей 50 гц не реализованы принципиально новые решения ни в швейцарских, ни во французских двигателях. Их схемы не отличаются от схемы двигателей 16 $\frac{2}{3}$  гц.

**Выводы.** Два основных фактора, по словам автора, препятствовали развитию электрификации по системе однофазного тока 50 гц [Л. 3]. Первый—отсутствие электровоза, второй—затруднения с обеспечением надежного питания больших однофазных нагрузок электрифицированных железных дорог из-за недостаточного развития общей системы электроснабжения. Оба препятствия сейчас считаются устраненными и поэтому в настоящее время представляется возможным внедрить на железнодорожном транспорте систему однофазного тока 50 гц. Эта система характеризуется в статье следующими особенностями:

1. Не требуется устройства специальных высоковольтных линий вдоль путей, предназначенных для питания электрифицированных железных дорог.

3. Питанием контактного провода от простых трансформаторных понижающих подстанций с расстояниями между ними от 50 до 100 км.

3. Повышением напряжения в контактной сети, например, до 25 кв, что в значительной степени облегчает ее конструкцию (провода, опоры и пр.).

### Литература

1. P. Marcel, S. M. Armand. La traction électrique par courant monophasé à 50 périodes. Revue Générale des Chemins de Fer, № 2, 1948.
2. A. Lessines. Bulletin Scientifique A. I. M., № 11, 1947.
3. M. Garreu, RGF, № 7, 1948.
4. Versuchlokomotive für Einphasen-Wechselstrom von 50 Hz. Bull. ASE № 15, 1948.

Кандидат техн. наук Л. М. ШИЛЬДИНЕР  
и инж. Д. Д. ЗАХАРЧЕНКО

## Основные требования к стандартам на электрооборудование

Инж. С. М. ЛИВШИЦ

Центроэлектромонтаж

Отечественная электротехническая инженерная общественность всегда придавала большое значение нормативам высококачественной электротехники. Основным нормативным документом русских электротехников были Правила и нормы, в составлении которых принимали активное участие передовые деятели русской электротехники, организованные в VI отделе Русского технического общества. Проекты Правил и норм публиковались и обсуждались на страницах журнала «Электричество», утверждались же правила и нормы Всероссийскими электротехническими съездами. Последняя, неотмеченная и поныне, редакция правил и норм была утверждена IX ВЭС в 1929 г.

Бурный рост промышленности Советского Союза за период сталинских пятилеток в корне изменил объем и технический уровень электроустановок Союза; выросла мощная советская электропромышленность. Нормативная деятельность не поспевала за развитием электротехники, что объясняется частично также и отсутствием единого электротехнического научного центра, который бы руководил техникой деятельностью советских электротехников во всех разветвленных каналах народного хозяйства СССР. Всесоюзное научное инженерно-техническое общество энергетики (ВНИТОЭ), проводящее значительную работу по технической пропаганде и обмену опытом путем созыва технических совещаний и сессий, не приняло еще на себя руководство нормативной электротехнической деятельностью, которая пошла по линии ведомств. На страницах электротехнических журналов разрабатываемые электротехнические нормативы находили до сих пор недостаточное освещение.

Важнейшие электротехнические нормативы разделяются на четыре основные категории:

а) Государственные общесоюзные стандарты (ГОСТ), устанавливающие обязательные для всех ведомств технические условия на продукцию электротехнических заводов;

б) Ведомственные технические условия (ВТУ) на изделия;

в) «Правила устройства», регламентирующие нормы проектирования и монтажа электротехнических установок сильного тока и

г) «Правила эксплуатации», регламентирующие требования к эксплуатации электроустановок.

Между нормативами перечисленных категорий должна существовать, очевидно, самая тесная связь, а между тем, они разрабатываются и издаются различными организациями, не всегда работающими координированно.

ГОСТ разрабатываются изготовителями электрических изделий, а утверждаются Управлением стандартизации Гостехники СССР (ранее Всесоюзным комитетом стандартов — ВКС). Правила устройства электротехнических установок сильного тока ныне разрабатываются МЭС и

*Отмечается большое значение электротехнических нормативов: государственных стандартов, «правил устройства» и «правил эксплуатации» и необходимость участия электротехнической общественности и прессы в их создании. Основное содержание статьи посвящено изложению главных требований к государственным стандартам. Выдвигаемые положения иллюстрируются наиболее характерными конкретными примерами применения этих положений в отдельных стандартах.*

Главэлектромонтажом МСПТИ и ими же утверждаются. Общие электротехнические правила эксплуатации разрабатываются и утверждаются МЭС. К таким правилам относятся в основном «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей» (1940 г.) и «Правила технической эксплуатации электроустановок промышленных предприятий» (1947 г.). Кроме того, имеется множество правил и инструкций по эксплуатации электрооборудования промышленных установок, издаваемых различными министерствами.

Координирование работы по составлению, обсуждению и утверждению указанных нормативов, вовлечение в это важное государственное дело всей массы инженеров и техников-электриков нашей Родины является, по нашему мнению, почетнейшей задачей ВНИТОЭ и нашей электротехнической прессы, в первую очередь, журнала «Электричество».

В настоящее время в СССР имеется значительное по объему законодательство в области государственных и ведомственных стандартов, способствовавшее улучшению качества электротехнических изделий сильного тока и поднятию технического уровня изделий электропромышленности. Необходимо проводить дальнейшую интенсивную работу в направлении увеличения количества стандартов, а главное в направлении пересмотра существующих стандартов с целью дальнейшего повышения технического уровня и качества продукции.

Основным назначением ГОСТ является установление технических условий на электрические машины, аппараты, кабельные и др. изделия, стоящих на уровне передовой техники. Стандарты не должны лишь фиксировать существующий уровень техники заводов-производителей оборудования; они должны являться одним из действенных рычагов к непрерывному поднятию продукции заводов электропромышленности на более высокий технический уровень. Для примера укажем, что издание нового ГОСТ 185-47 на электродвигатели трехфазного тока крановые и металлургические, предпринятое ВКС по инициативе потребителей, способствовало скорейшему налаживанию производства новых машин, удовлетворяющих требованиям современного электропривода механизмов прерывистого режима и способствующих внедрению трехфазного тока вместо постоянного в металлургические и другие приводы. Конечно, стандарты не могут отвлечаться от реальных возможностей производства, от уровня техники смежных производств (электроизоляционных, металлургических и т. д.). Поэтому ГОСТ, подобно барометру, должны «предсказывать» ближайшие возможности повышения технического уровня промышленности. Все ГОСТ должны периодически, в определенные сроки, пересматриваться в целом, а отдельные параграфы стандартов



могут и должны пересматриваться по мере надобности, — значительно чаще, чем в настоящее время.

**Удешевление эксплуатации.** Основная задача, возникающая при создании новых и пересмотре старых ГОСТ, — сформулировать такие технические условия, которые бы способствовали удешевлению, в широком смысле слова, стоимости эксплуатации электроустановок путем уменьшения количества эксплуатационного персонала и повышения энергетических показателей электрических машин. Уменьшение количества электротехнического персонала в эксплуатации по обслуживанию и ремонту является одним из факторов увеличения производительности труда в промышленности и снижения себестоимости продукции — оно может быть достигнуто за счет существенного повышения надежности работы оборудования. Повышение надежности, в свою очередь, является стимулом к уменьшению потребности резервирования элементов электрооборудования, столь широко применяемого ныне при проектировании и в эксплуатации.

**Снижение капиталовложений.** Одновременно с удешевлением эксплуатации нужно добиваться снижения капиталовложений в электроустановки, что достигается, в первую очередь, путем уменьшения затрат на электрооборудование и материалы. Снижение стоимости оборудования и материалов достигается, в числе прочих методов, за счет массовости производства, чему в большой мере может способствовать разумная стандартизация.

Равным образом стандарты должны учитывать и необходимость снижения стоимости строительства и монтажа электроустановок путем их индустриализации и применения скоростных методов. Последнее должно идти по пути создания стандартов на комплектные электроустановки (например, на комплектные подстанции и распределительные устройства высокого и низкого напряжения) и обеспечения комплектности поставок отдельно устанавливаемых видов электрооборудования, относящихся к одному агрегату.

**Повышение надежности и срока службы.** Трудно переоценить величину экономического эффекта, который может дать для страны повышение надежности выпускаемого оборудования. Яркой иллюстрацией является практика применения проводов для прокладки в трубах. Изготавливаемые ныне кабельной промышленностью провода с резиновой изоляцией типа ПРТО для протяжки в трубах (ВТУ НКЭП 128-43) недостаточно приспособлены для работы в цеховых трубных канализациях энергии (в земле, фундаментах и т. п.). Они не стойки против воздействия всегда имеющейся в трубах воды и часто попадающих в трубы эмульсии и масла. Часто в трубах прокладывают провода ПР-500 и АПР-500, еще менее годные для указанных условий работы. Нередко провода в трубах работают очень малый срок (до нескольких месяцев). Не говоря уже о том, что пробой проводов влечет за собой простой иногда целых технологических линий, частая замена проводов обходится очень дорого. Обеспечение долговечности трубных проводов путем повышения влагостойкости и маслостойкости изоляции проводов — основной вопрос при создании нового стандарта на провода для прокладки в трубах.

С другой стороны при утверждении нового стандарта потребители могут пойти на существенные облегчения действующих технических условий: на уменьшение излишней гибкости (многопроволочности) жил проводов больших сечений для трубных прокладок и на уменьшение сортамента за счет отказа от многожильных силовых проводов, применение которых не дает преимуществ в монтаже и эксплуатации, но влечет за собой увеличение трудоемкости при изготовлении жил и увеличение числа типо-размеров, препятствующее большей массовости производства. Этот пример является иллюстрацией возможного при издании стандартов отказа от недостаточно обоснованных требований к продукции электропромышленности.

Повышение надежности работы оборудования должно быть достигнуто, в первую очередь, за счет применения материалов лучшего качества, лучших технологических процессов и усиления технического контроля. Однако, за-

частую следует идти также на понижение допускаемых ныне технических норм нагрева, что приведет к повышению износостойкости машин и аппаратов, увеличению срока их службы и к уменьшению количества аварий и ремонтов в процессе эксплуатации. В целях экономии материалов в электромашиностроении до войны была допущена чрезмерная токовая нагрузка оборудования. Хотя машины и выдерживали за счет интенсивной вентиляции предписанные стандартами нормы нагрева, но они не всегда оказывались достаточно стойкими в суровых эксплуатационных условиях. В особенности это относится к нормальным электродвигателям «общего применения», мощностью до 100 кВт; они оказались недостаточно прочными при включении в сеть застопоренного двигателя, при внезапных перегрузках, при работе в двух фазах вследствие перегорания предохранителя в одной из фаз. В этих неизбежных в эксплуатации, режимах двигателя должны быть достаточно выносимыми к кратковременным, но большим по величине перегрузкам, причем выносимость их может быть охарактеризована быстротой нарастания температуры обмоток заторможенного двигателя, которая у машин новых серий должна быть значительно ниже, чем у чрезмерно использованных двигателей серий АД и МА, теплостойкость обмоток которых мала.

Другим примером учета ненормальных эксплуатационных условий является необходимость предъявления более жестких требований к электродвигателям и катушкам напряжения различных аппаратов (контакторов, реле, тормозов) в смысле безотказной работы при неизбежных отклонениях эксплуатационных напряжения и частоты. Громадное большинство промышленных установок снабжается электрической энергией от районных сетей. В существующих установках отклонения напряжения от номинальных доходит порой до 15–20%. Расчеты заводских сетей на отклонение напряжения показывают, как дорого и трудно (а иногда невозможно) бывает обеспечить колебания уровня напряжения у электродвигателей в пределах  $\pm 5\%$  (как это обусловлено ГОСТ 183-41) в различных, даже неаварийных, режимах нагрузки. Поэтому надо считать, что увеличение допуска на отклонение напряжения до  $\pm 10\%$  является совершенно обоснованным требованием эксплуатации. Разумеется, это требование относится лишь к надежности работы оборудования при таких отклонениях (нагрев и момент вращения или тяговое усилие); не следует требовать сохранения нормированных экономических параметров (к. п. д.,  $\cos \varphi$  и др.) при отклонениях напряжения на  $\pm 10\%$ .

**Улучшение энергетических характеристик.** Важным требованием, относящимся ко всем электрическим машинам, является повышение энергетических показателей: к. п. д. и коэффициента мощности. Этот вопрос подробно освещался в последние годы на страницах электротехнических журналов. Улучшение энергетических показателей машин может быть достигнуто частично за счет улучшения качества применяемых материалов: листового электротехнической стали с уменьшенными потерями и частично за счет увеличения количества активных материалов, главным образом меди, в машине. Однако, требуя улучшения энергетических показателей машин в целях уменьшения потерь энергии, не следует впадать в другую крайность, которая бы привела к неоправданному расходу материалов, увеличению веса и габаритов машин, их стоимости и производственных возможностей электромашиностроительных заводов.

Сложная задача конструкторов электрических машин и трансформаторов заключается в том, чтобы найти практические нормы энергетических показателей, приемлемые как для потребителей машин, так и для заводоизготовителей, отвечающие интересам народного хозяйства в целом.

Важно, чтобы энергетические показатели нормировались не только для номинального режима, но и для режима средней характерной эксплуатационной нагрузки машин; например, для нормальных электродвигателей мощностью до 15 кВт, основным потребителем которых является станковый привод, характерным режимом является средняя нагрузка в 50%.

**Улучшение приводных характеристик электродвигателей.** Существенным качественным показателем электрооборудования является наилучшая приспособляемость его



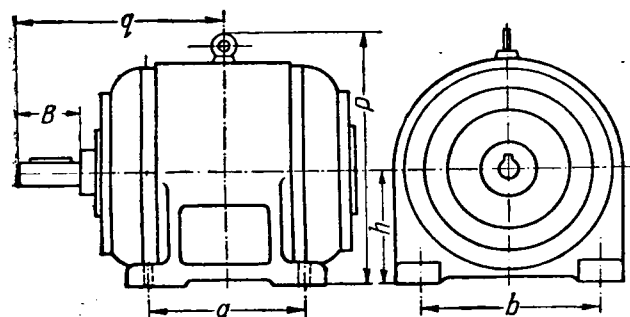


Рис. 1.

Тип	Мощность, квт	P	b	B	q	a	h
Р 41-4	4,5	331	240	80	274,5	205	150
АД 41-4	4,3	327	250	80	262	110	150
МКБ-19/4	3,8	380	300	80	368	284	170
Р 42-4	5,8	331	240	80	274,5	205	150
АД 42-4	5,8	327	250	80	262	140	150
МКБ-14/4	5,5	380	300	80	368	240	170
МКБ-17/4	11	255	400	110	413	295	225
АД 52/4	10	374	265	110	349	140	170
МА 202-1/4	13	432	325	110	342	115	200
АД 21/4	1,0	222	190	60	242	80	112
ТНГ-51	1,0	195	165	35	173	50	100
МА 204-1/4-кз	37	541	410	140	425	150	220
МКА 22/4-кк	37	625	625	140	529	385	280

к сопряженному механическому оборудованию. Яркой иллюстрацией является повышение вращающих моментов асинхронных электродвигателей (особенности минимальных моментов в процессе пуска) в проекте нового основного стандарта на электрические машины, иллюстрируемое табл. 1.

Таблица 1

#### Кратность вращающих моментов асинхронных электродвигателей

	По ГОСТ 183-41	По проекту нового ГОСТ
Кратность начального пускового момента	0,9	до 25 квт $\geq 1,25$ свыше 25 квт $\geq 1,0$
Кратность момента в процессе пуска	0,6	до 25 квт $\geq 1$ свыше 25 квт $\geq 0,8$
Кратность максимального момента	1,65	при 2; 4 и 6 полюсах $\geq 1,8$ при 8 и более полюсах $\geq 1,65$

Стандартизация монтажных размеров электродвигателей. Важным требованием к ГОСТ, связанным с удешевлением эксплуатации, является стандартизация монтажных размеров в целях обеспечения взаимной заменяемости электрооборудования массового применения, изготавливаемого различными заводами или одним и тем же заводом в разные годы. Это, в первую очередь, относится к видам электрооборудования, сопрягаемым механически с технологическим оборудованием, т. е. к электродвигателям. Опыт показал, что отсутствие всеобщего стандарта на монтажные размеры электродвигателей влечет за собой отсутствие взаимной заменяемости не только электродвигателей, изготавливаемых заводами различных министерств, но и выпускаемых заводами МЭП.

Из рис. 1, на котором показаны основные монтажные размеры (в мм) некоторых выпускаемых ныне нормаль-

ных электродвигателей (для синхронной скорости вращения 1500 об/мин), видны значительные различия между монтажными размерами электродвигателей примерно одних и тех же внешних параметров (мощность, скорость вращения, исполнение), исключающие взаимную заменяемость без существенных затрат по приспособлению механической части. Такое расхождение монтажных размеров либо требует наличия значительного парка запасных электродвигателей у потребителей, либо влечет за собой длительные простои рабочих машин во время ремонта или приспособления электродвигателей. Кроме того, затруднено конструирование машин-орудий, так как конструктор при проектировании соединительных муфт, фланцев и т. п. и фундаментной плиты под двигатель может ориентироваться лишь на один из выпускаемых электропромышленностью типов машины данных параметров. Отсутствие стандартов на монтажные размеры вызывает потребителя и при реализации заказов, а также в эксплуатации — при замене вышедшего из строя двигателя резервным.

Даже электродвигатели одних и тех же серий, но выпускаемые разными заводами, не имеют одинаковых монтажных размеров. Так, например, машины постоянного тока серии ПН одной и той же величины различаются по некоторым монтажным размерам.

Электродвигатель типа ПН 28,5 завода «Электросила» имеет диаметр вала 30 мм, а Прокопьевского завода — 25 мм; ширина шпоночной канавки у первой машины равна 10 мм, у второй — 8 мм.

Размер  $t$  (рис. 2) в мм машин типа ПН также различен:

Габарит машины	Завод «Электросила»	Прокопьевский завод
ПН-10	22,5	22,0
ПН-17,5	28,0	27,5
ПН-28,5	33,5	27,5
ПН-45	38,5	38,0
ПН-68	38,5	38,0

Толщина шпонок или глубина шпоночных канавок вовсе не показаны на габаритных эскизах каталога ЦБТИ на машины постоянного тока.

Предпринятая в 1947 г. МЭП попытка свести в один документ — «ведомственную нормаль» — все ныне нормализуемые размеры электродвигателей трехфазного тока с короткозамкнутым ротором представляет лишь паллиатив, могущий интересовать только заводских конструкторов, но не удовлетворяющий интересам потребителя.

Под стандартизацией монтажных размеров электродвигателей нужно понимать стандартизацию монтажных размеров целых корпусов электродвигателей с одинаковыми или близкими техническими параметрами, так как только стандартизация корпусов приводит к основной цели — обеспечению взаимозаменяемости машин в эксплуатации.

Стандартизация корпусов может быть осуществлена путем присвоения каждому комплексу монтажных размеров корпуса машины определенного «монтажного номера».

Все выпускаемые двигатели данного вида (например, асинхронные с короткозамкнутым ротором) должны укладываться по размерам в таблицу монтажных номеров, для чего монтажные номера должны быть тесно связаны особой таблицей с мощностями и скоростями вращения электродвигателей данного вида. Последняя связь возможна лишь при условии стандартизации шкалы мощностей электродвигателей.

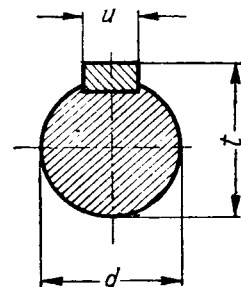


Рис. 2.

Стандартная шкала мощностей электродвигателей. Единая твердая шкала мощностей электродвигателей была в СССР разработана ХЭМЗ в 1927 г. и внедрена на всех электромашиностроительных заводах страны. По этой шкале изготовлялись серии двигателей И, Т, УТ, аРРV, БАО.

В 1932 г. от этой («старой») твердой шкалы мощностей электропромышленность отказалась под предлогом необходимости полного использования всех моделей существовавших серий машин по нагреву. Отказ от твердой шкалы мощностей и общий пересмотр конструкций машин в целях максимальной экономии материалов, в частности меди, привел к созданию в 1935—1936 гг. новых единых серий электрических машин, являющихся рекордными по использованию материалов. Практика эксплуатации этих машин выявила их эксплуатационные недостатки:

- а) низкие энергетические показатели,
- б) чрезмерно большие пусковые токи (до  $10 \div 11$  кратных в серии АДО).
- в) неудовлетворительные характеристики по моментам,
- г) пониженную эксплуатационную надежность.

В отношении назначения мощностей машины установился произвол: заводами-изготовителями мощность назначалась та, которую удавалось «выжать» из данной модели, часто еще не прошедшей даже всех типовых испытаний. Это привело к тому, что только что выпущенные каталоги через короткое время изменялись: так, например, каталог электродвигателей АД 1937 г. был аннулирован и заменен каталогом 1938 г.; каталог электродвигателей МА-200 1937 г. был аннулирован и заменен каталогом 1939 г.

Однако, и в измененные каталоги заводы продолжали в дальнейшем вносить новые изменения.

Кемеровский завод в каталожных листах на двигатели серии МА-200 изменил данные каталога ХЭМЗ 1939 г.

Тип	Скорость вращения, об/мин.	Мощность, кВт		Разница, %
		ХЭМЗ (каталог 1939 г.)	Кемеровский завод (каталог МЭП 1947 г.)	
МА-203-2/4 . . .	1500	28,5	27,5	—3
МА-203-2/6 . . .	1000	19,7	18,7	—5
МА-202-1/8 . . .	750	6,4	6,0	—6
МА-202-2/8 . . .	750	8,3	8,0	—3

Номинальные мощности двигателей новой серии «Урал» также отличаются от мощностей двигателей серии «АД» (по каталогу ЦБТИ МЭП, 1947 г.):

Тип	Скорость вращения, об/мин.	Мощность, кВт		Разница, %
		Серия «АД»	Серия «Урал» (тип Р)	
41/4 . . . . .	1500	4,3	4,5	+4
51/4 . . . . .	1500	7,8	8,0	+2
42/6 . . . . .	1000	3,5	3,3	—6
51/6 . . . . .	1000	5,0	4,5	—10

Такой неоправданный произвол в назначении номинальных мощностей электродвигателей объясняется исключительно отсутствием связывающего заводы начала — твердой шкалы мощностей.

С точки зрения стандартизации мощностей представляет интерес проанализировать сводный каталог асинхронных нормальных электродвигателей, выпускавшихся

заводами МЭП в 1947 г. В пределах мощностей от 1 до 2 кВт имеет место следующая картина:

Мощность модели, кВт . . . . .	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Число моделей данной мощности (разных скоростей и исполнений) . . . . .	5	5	1	1	3	5	3	3	1	3

Итого от 1 до 2 кВт — 30 моделей.

Число значений мощностей и число каталожных номеров сводного каталога электродвигателей до 100 кВт

	0÷5 кВт	0÷20 кВт	0÷50 кВт	0÷100 кВт
Число значений различных мощностей . . . . .	41	80	110	121
Число каталожных номеров (моделей) . . . . .	105	178	232	247

Завод «Динамо» им. Кирова четыре раза переделывал каталог на электродвигатели серии КП-КПД, то увеличивая, то уменьшая мощности моделей и изменяя число оборотов при одной и той же их маркировке:

Год	Тип двигателя	Мощность, кВт (25% ПВ)	Скорость вращения, об/мин. (25% ПВ)
1931 . . . . .	КП 800/447	80	440
1936 . . . . .	КПД 800/447	100	430
1939 . . . . .	КПД 800/447	95	460
1941 . . . . .	КПД 800/447	82	425

Из изложенного выше очевидно, какие неудобства для эксплуатации, проектирования и поставки представляет отсутствие стандартной шкалы мощности.

С другой стороны, предпринятое в 1931—1932 гг. «выжимание» полной мощности из модели электродвигателя вряд ли давало настолько существенный результат, который бы мог оправдать отказ от твердой, стандартной шкалы мощностей электродвигателей: отсутствие ожидаемого эффекта объясняется тем, что степень точности определения потребной мощности электродвигателя для привода значительно ниже степени «недоиспользования» мощности двигателя по нагреву из-за необходимости уложить потребную мощность в твердую шкалу мощностей. Фактически конструкторы привода и эксплуатационники при выборе мощности двигателя ориентируются на определенную мощность и выберут для станка один и тот же двигатель, независимо от того, будет ли он маркирован 3,5 или 3,3 кВт.

Расчетчикам мощности крановых приводов известно, что подсчеты потребной мощности по различным методам дают результаты, отличающиеся друг от друга иногда на  $30 \div 50\%$ . На это отличие накладывается еще неопределенность с назначением расчетной величины ПВ, вследствие трудности подвести режим работы кранов под какой-либо твердый график; поэтому конструктору приходится при определении мощности электродвигателя пользоваться, главным образом, опытным, весьма приближенными данными. Кроме того, большинство крановых электродвигателей выбирается по моменту, а не из условий нагрева. Какой же смысл «выжимать» из этих двигателей максимальную мощность по нагреву за счет отклонения от твердой шкалы мощностей?

Отсутствие стандартной шкалы мощностей электродвигателей приводит к затруднениям со стандартизацией и эксплуатацией аппаратуры управления.

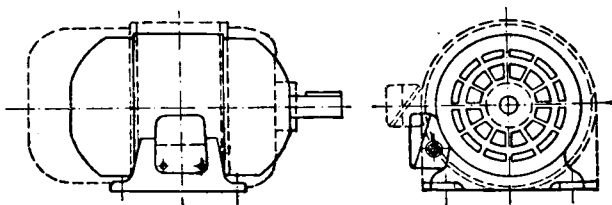


Рис. 3. Двигатели новой конструкции (сплошные линии) и старой конструкции (пунктирные линии); монтажные размеры сохраняются.

Даже элементарная аппаратура — пускатели — может быть жестко стандартизирована лишь применительно к стандартной шкале мощностей, а не в пределах мощностей от—до, так как элементы защиты — нагревательные элементы — должны выбираться в узких пределах номинальных токов. При отсутствии стандартной шкалы мощностей на крупной промышленной установке даже с одним только рабочим напряжением (например, 380 в) в диапазоне мощностей до 100 кВт требуется 52 нагревательных элемента. Между тем, при наличии стандартной шкалы мощностей электродвигателей в этом диапазоне можно было бы иметь всего 14 типов нагревательных элементов. Отсутствие стандартной шкалы мощностей и, как следствие, большой сортament нагревательных элементов являются одной из причин того, что тепловая защита двигателей по данным произведенных обследований редко где работает.

Так как для пускателя на данный номинальный ток приходится несколько нагревательных элементов на различные токи, то в настоящее время нагревательные элементы в проектах специфицируются отдельно от пускателей, что представляет затруднения при проектировании, поставке оборудования, монтаже и эксплуатации. Принятие стандартной шкалы мощностей даст возможность стандартизировать пускатели по мощностям электродвигателей и поставлять их комплектно с нагревательными элементами.

Однако, самым важным недостатком отсутствия твердой шкалы мощностей является, как сказано выше, трудность стандартизации монтажных размеров электродвигателей.

Иногда высказывается мысль о том, что стандартизация мощностей и монтажных размеров (корпусов) мешает, якобы, прогрессу электромашиностроения. Это мнение опровергается практикой электромашиностроения. На рис. 3 показана возможность конструирования электродвигателя значительно меньших габаритов на базе применения новых нагревостойких электроизоляционных материалов при сохранении монтажных размеров двигателя. Необходимо иметь в виду, что размеры электродвигателя определяются не только нагревостойкостью электроизоляционных материалов, но также и электрическими параметрами — опрокидывающим моментом, и механическими — размерами вала и подшипников.

Конечно, возможность появления необходимости изменения монтажных размеров в будущем не исключена, но на определенном отрезке времени стандартизация монтажных размеров может и должна сохраняться, а затем организовано (а не самоотечком) монтажные размеры могут быть пересмотрены.

Существенен вопрос — должна ли быть общая твердая шкала мощностей для всех видов электродвигателей (трехфазных с короткозамкнутым и фазным ротором, постоянного тока; стационарных и крановых; закрытых и открытых и т. д.) или для каждого вида двигателей, не заменяемых взаимно в эксплуатации, может быть нормирован свой ряд мощностей. Мы придерживаемся того мнения, что для новых серий машин нужно иметь одну и ту же твердую шкалу мощностей для всех электродвигателей: следует электродвигатели проектировать по заданным мощностям (как принято во всех областях энергетического машиностроения), отказавшись от практики установления случайных значений мощностей для запроектированных без твердого задания моделей.

Вопрос о том, каковы должны быть абсолютные зна-

чения ряда мощностей (каков должен быть коэффициент нарастания твердой шкалы мощностей) требует особого рассмотрения [Л. 1—2].

В настоящее время Управлением стандартизации для новых серий машин утверждена стандартная шкала мощностей асинхронных электродвигателей, мощностью от 1 до 100 кВт (ГОСТ 4542-48). Эта шкала мощностей, разработанная МЭП в результате инициативы Главэлектромонтажа МСПТИ, близка к ранее существовавшей в СССР («старой») шкале мощностей (табл. 2), но распространяется лишь на двигатели защищенного и закрытого исполнения.

Нужно пожелать, чтобы стандартная шкала мощностей была распространена на другие виды электродвигателей.

Стандартизация патронных предохранителей. Рассмотрим вопрос о стандартизации установочных размеров широко применяемых в промышленности предохранителей патронного (трубчатого) типа.

Таблица 2

Сравнение старой и новой шкал мощностей (квт)

Старая шкала 1927 г.	Шкала мощностей по ГОСТ 4542-48	Старая шкала 1927 г.	Шкала мощностей по ГОСТ 4542-48
0,52	—	14,5	14
1	1	20,5	20
1,7	1,7	29	28
2,85	2,8	40	40
4,5	4,5	55	55
6,8	7	75	75
10	10	100	100

Производством предохранителей занимается в СССР большое число заводов МЭП и других министерств. Естественно, что съемные патроны, поставленные заводом-изготовителем в комплекте предохранителя, постепенно выходят из строя, тогда как неподвижные контактные стойки, смонтированные на панелях и щитах, служат гораздо дольше. Потребитель обычно не имеет возможности получить через несколько лет запасные патроны именно от первоначального завода-изготовителя, да и заводы меняют типы выпускаемого оборудования. Вполне назрела необходимость обеспечить возможность применения патронов на данный ток для контактных стоек любых заводов-изготовителей, что может быть обеспечено лишь при условии стандартизации монтажных размеров трубчатых предохранителей (контактных стоек и патронов). Существует ГОСТ 3041-45 на предохранители с закрытыми разборными патронами без наполнителя (эти предохранители выпускаются разными заводами под маркой ПР и ПР-1), в котором установлены твердые монтажные размеры патронов. Однако, большинство установок монтируется с предохранителями других типов, главным образом, с открытыми трубками типа СПО и ПТ, номинальные токи и монтажные размеры которых не совпадают с номинальными токами и размерами предохранителей ПР (табл. 3 и рис. 4).

Таблица 3

Номинальные токи патронных трубчатых предохранителей

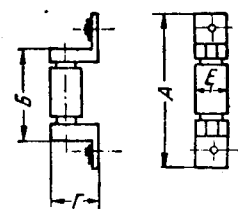
Тип предохранителей	Номинальные токи, а									
ПР . . . . .	15	60	—	100	—	200	—	—	350	600
ПТ . . . . .	—	—	—	100	—	200	—	300	—	—
СПО . . . . .	—	—	80	—	160	—	260	—	—	—

Исполнение	Тип	a	Завод-изготовитель	Размеры, мм											
				до 250 в						до 500 в					
				А	Б	В	Г	Д	Е	А	Б	В	Г	Д	Е
а	ПР-1	100	МЭП	195	150	—	61	—	33	245	200	—	61	—	33
а	ПР-100	100	Ташкент кий	—	—	—	—	—	—	245	—	—	59	—	33
а	ПТ-100**	100	Саратовский ГЭМ	214	—	—	106	—	—	—	—	—	—	—	—
а	А40 1/А411*	100	Ленинградский ГЭМ	—	—	—	—	—	—	135	117	—	—	—	40
б	ПР-1	100	МЭП	—	159	125	61	68	33	—	209	175	61	68	33
б	СПО	160	МЭП	—	—	—	—	—	—	—	—	150	97	53	—
а	ПР-1	350	МЭП	270	196	—	95	—	61	345	271	—	95	—	61
а	НП-5***	350	МЭП	345	265	—	98	—	75	—	—	—	—	—	—
а	А402/А412*	350	Ленинградский ГЭМ	—	—	—	—	—	—	167	130	—	—	—	56
а	КП-350	350	Ленинградский ГЭМ	—	—	—	—	—	—	228	90	—	—	—	55
б	ПР-1	350	МЭП	—	206	160	96	76	61	—	281	235	96	76	61
б	НП-5***	350	МЭП	—	265	235	98	76	75	—	—	—	—	—	—

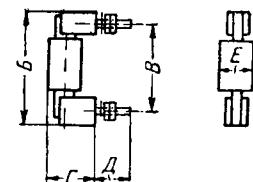
\* Числитель — каталожный номер патрона, знаменатель — номер основания.

\*\* До 250 в постоянного тока и 400 в переменного тока.

\*\*\* До 380 в.



а) Переднее присоединение



б) Заднее присоединение

Рис. 4.

В последние годы различные организации (ВЭИ, Севзапэлектроремонт МСПТИ и др.) запроектировали и наладили производство закрытых насыпных предохранителей высокой разрывной способности и значительно меньших внешних размеров, чем предохранители ПР, ПТ и СПО. Производство предохранителей заводами различных министерств бурно развивается.

Создается недопустимое многообразие значений номинальных токов и монтажных размеров трубчатых предохранителей. Нормативы на номинальные токи и монтажные размеры, установленные в ГОСТ 3041-45, в настоящее время совершенно недостаточны, так как они относятся лишь к предохранителям с закрытыми разборными патронами (типа ПР) и необязательны для предохранителей остальных конструкций.

Поэтому устаревший ГОСТ 3041-45 должен быть по возможности быстрее заменен новым ГОСТ более широкого охвата — на патронные предохранители всех конструктивных исполнений, где были бы зафиксированы обязательные номинальные токи, монтажные размеры, (разрывная мощность) и прочие обязательные параметры. В новом ГОСТ можно отказаться от деления предохранителей на две категории по напряжению — 250 и 500 в, так как область применения напряжения постоянного тока 220 в, ранее наиболее широко применявшегося в металлургии, постепенно все более сужается, и экономический смысл производства предохранителей на два напряжения теряется — следует оставить лишь напряжение 500 в.

Новый ГОСТ в отношении разрывных мощностей и монтажных размеров предохранителей должен ориентироваться не на предохранители типа ПР, а на современные предохранители высоких разрывных мощностей, которые к тому же стоят в производстве дешевле, не требуют для изготовления дорогих цветных металлов и фибры, и обладают значительно меньшими размерами.

Аналогично обстоит вопрос и со стандартизацией технических данных и монтажных размеров других аппаратов массового применения (рубильников, контакторов, пускателей и др.).

Стандартизация шкалы токов для аппаратов. Для аппаратов высокого напряжения существует стандартная шкала номинальных токов (ОСТ НКТП 2705). Для аппаратов низкого напряжения единого стандарта нет, вследствие чего возникает неоправданный разброд. Можно предложить введение единой шкалы номинальных токов для аппаратов высокого и низкого напряжения, коммутационных и пускорегулирующих (табл. 4).

Принятие новой шкалы повлечет за собой стосительно мало изменений в выпускаемой ныне аппаратуре: предохранители высокого напряжения на 50 а придется заменить предохранителями на 60 или 40 а, предохранители низкого напряжения и рубильники на 350 а заменить 400-амперными. Впрочем, рубильники еще и поныне заводами изготавливаются по моделям 400 а, существовавшим до введения ГОСТ 2723-43 и 3041-45. Номинальный ток 350 а в указанные стандарты, изданные во время войны, был занесен ошибочно, именно из-за отсутствия единой шкалы токов. Что касается пусковой аппаратуры, то существующие аппараты 350 а будут заменены

400-амперными (что уменьшит существующий чрезмерный разрыв в шкале между токами 300 и 600 а) и 200-амперными, чему способствует тенденция к постепенному вытеснению постоянного тока 220 в и замене его трехфазным 380 в, при котором рабочие токи электродвигателей получаются в два раза меньше.

Номинальные токи пусковых аппаратов (контакторов, пускателей) должны относиться к режимам, соответствующим стандартным режимам работы электродвигателей:

з) продолжительному — без подразделения на неправильно именуемые в стандартах на контакторы режимы «непрерывный» и «длительный» (с отключением через каждые 8 час. три раза подряд);

б) повторно-кратковременному (с ПВ = 25%), ибо этот режим является основным номинальным режимом для краново-металлургических электродвигателей (ГОСТ 184-47 и 185-47).

Высокие показатели по механическому износу аппаратов. Необходимо бороться с проявляющимся иногда стремлением заводов-изготовителей к перестраховке. Так, например, в ГОСТ 2758-44 на контакторы постоянного тока (§ 11) обусловлено число включений по условиям механического износа, равное 1 млн., что совершенно недостаточно в современных металлургических приводах (один из основных потребителей), где число включений в час достигает 1000 и выше и, таким образом, гарантированный ГОСТ срок службы контактора равен всего лишь 1—2 мес. Между тем, для новой серии контакторов постоянного тока завод МЭП гарантирует 25 млн. включений. Такое большое расхождение между требованиями ГОСТ и каталожными данными аппарата свидетельствует о недостаточной борьбе составителей ГОСТ за гарантии долговечности оборудования.

Новые конструкции. При разработке новых стандартов необходимо проявлять необходимую осторожность в смысле изменения отдельных параметров оборудования, учитывая наличие у потребителей изделий, выпускавшихся по ранее действовавшим стандартам и необходимости во взаимозаменяемости; наряду с этим необходимо давать дорогу новым конструкциям — более надежным в эксплуатации и более дешевым.

Таблица 4

Единая шкала номинальных токов аппаратов (в а)

—	—	2	4	6
10	15	20	40	60
100	150	200	400	600
1 000	1 500	2 000	4 000	6 000

Примечание. Допускаются дополнительные значения номинальных токов для максимальных реле, тепловых реле (элементов), трансформаторов тока, плавких вставок.

В течение многих лет в СССР применяется штепсельный круглый контакт. Всем известны из личной практики недостатки круглого штепсельного контакта: постепенная деформация разрезанных ножек у штепсельной вилки, ухудшение контакта, перегрев и отжиг металла и последующее обламывание одной половины ножки у вилки; наряду с этими эксплуатационными дефектами производством штепселя с круглым контактом является трудоемким. Значительно более прост в изготовлении и надежен в эксплуатации плоский штепсельный контакт, с успехом применявшийся для подключения шнуров к электроутюгам и другим приборам.

Необходимо разработать ГОСТ на плоские штепсельные контакты для новых установок, сохраняя на некоторое время возможность производства также и круглых штепселей для находящихся в эксплуатации установок.

Реализация требований стандартов. Очень важно, чтобы установленная стандартами номенклатура была обязательна для министерства—основного изготовителя данного типа оборудования. Заводы-изготовители не могут выпускать оборудование параметров, отличных от установленных стандартами. Но последние не налагают на изготовителей оборудования обязательства выпускать изделия по всей предусмотренной ГОСТ шкале. Приведем пример: в 1947 г. Московский трансформаторный завод им. Куйбышева и другие трансформаторные заводы самовольно, без согласования с потребителями, прекратили выпуск промежуточных мощностей—30; 75; 135; 240; 420; 750; 1350; 2400 и 4200 *кВА* из ряда мощностей, предусмотренных ГОСТ 401-41 на трансформаторы (в отличие от электродвигателей, в СССР существует стандартная шкала мощностей на трансформаторы). Благодаря этому, и без того достаточно грубая существующая шкала мощностей трансформаторов с коэффициентом нарастания  $y''$ , 1,33, была еще более заглублена и доведена до  $y''$ , 1,33 $\sqrt{2}$ =1,77. В 1948 г. по настоянию проектной организации производство трансформаторов 750 *кВА* было заводом восстановлено.

Произведенные нами подсчеты по предложенной в статье [Л. 1] формуле показывают, что отказ завода от изготовления промежуточных мощностей трансформаторов приводит к увеличению установленной мощности в

$$\frac{x''}{x'} = \frac{2y'(1+y'')}{2y''(1+y')} = \frac{2 \cdot 1,77(1+1,33)}{2 \cdot 1,3(1+1,77)} = 1,13 \text{ раза,}$$

т. е. на 13%. Соответственно увеличивается и расход активных и инертных материалов в производстве. Вряд ли такое сокращение шкалы трансформаторов может быть оправдано экономическими выгодами из-за уменьшения количества типоразмеров трансформаторов в производстве, в особенности если учесть, что трансформатор по своей природе принадлежит к числу машин материало-емких, а не трудоемких.

Во всяком случае, вряд ли можно признать практику установления шкал мощностей в существующих ГОСТ, основанную на изучении интересов потребителей и производителей оборудования, целесообразной, если производителю оборудования не возбраняется по своему усмотрению вводить в реальное производство и выводить из него тот ассортимент изделий из числа регламентированных стандартом значений, который он сочтет для себя выгодным. Без сомнения, орган, устанавливающий стандарты, должен вести и контроль за тем, чтобы соответствующим министерством был обеспечен выпуск изделий по всей шкале, установленной в стандарте.

Важно далее, чтобы достижения новых ГОСТ не были полностью или частично аннулированы оговорками в части методологии измерения обусловленных ГОСТ параметров и наличием допусков:

а) значения моментов должны определяться путем их замеров на валу двигателя, а не расчетным путем; в этом отношении ошибочной является формулировка § 15 ГОСТ 185-47 на асинхронные крановые электродвигатели, касающаяся величины вращающего момента при торможении противозвключением и гласящая: «Расчетная (разрядка моя. С. Л.) кратность вращающего момента (тормозного) в диапазоне скольжения от 100 до 200% по отношению к номинальному моменту должна быть не ниже 70% кратности начального пускового вращающего момента по отношению к номинальному моменту»; расчетные требования стандарта, не контролируемые на испытательном стенде, являются иллюзорными;

б) для вращающихся моментов, устанавливаемых в стандарте, на который ориентируется проектировщик привода при выборе электродвигателя, не должно существовать минусовых допусков.

Контроль за соблюдением стандартов. Соблюдение требований советских стандартов обязательно; несоблюдение стандартов влечет за собой ответственность по закону.

Кроме юридической защиты, однако, наши государственные органы стандартизации должны вести фактический контроль за соблюдением требований стандартов путем:

а) периодической проверки качества изделий в лабораториях заводов-изготовителей, научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений или в специально созданных лабораториях;

б) отбора протоколов типовых испытаний выпускаемых изделий.

Это особенно важно в отношении массовой продукции, по которой потребитель не может иметь контрольного технического аппарата по проверке качества продукции, в процессе реализации заказа. Всякий потребитель должен иметь возможность обратиться к органам, контролирующим соблюдение стандартов, с требованием выдачи удостоверения о соответствии тех или иных выпускаемых заводами-изготовителями изделий требованиям действующих стандартов.

Организационно-технические задачи стандартов. Наряду с установлением технических параметров электроизделий новые стандарты должны учитывать и ограждать интересы потребителей в организационном отношении. К таким вопросам относятся требования комплектности поставок, обязательности поставки запасных частей, эксплуатационных инструкций и указаний по ремонту и требования по установлению гарантийных сроков службы оборудования.

Стандартами должна быть запрещена имеющая у нас еще место поставка электродвигателей без аппаратуры управления, поставка пускателей без тепловой защиты и т. п.

#### Литература

1. С. М. Лившиц. О коэффициенте нарастания шкалы мощностей электродвигателей. ВЭП, № 4, 1948.
2. Д. Л. Варшавский, Я. С. Гурин, Б. И. Кузнецов. Новая серия асинхронных электродвигателей общего применения. ВЭП, № 9, 1948.

[7. 2. 1949]



# Об определении перегрева обмоток по действующему стандарту

Профессор Б. Ф. ВАШУРА

Харьковский электротехнический институт

В действующих стандартах для электрической аппаратуры, в части, касающейся методов определения перегрева обмоток, имеются некоторые неточности, исправление которых весьма желательно. Так, в стандарте „Аппараты электрические низкого напряжения“ — ГОСТ 2933-45, приведена формула для определения температуры перегрева обмоток (§ 28):

$$\theta = \vartheta_2 - \vartheta_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \vartheta_1) + \vartheta_1 - \vartheta_a. \quad (1)$$

В этой формуле цифра 235 соответствует величине обратной значению температурного коэффициента меди:

$$\alpha' = \frac{1}{\alpha} = 235.$$

Между тем, исходя из данных ГОСТ 2112-46 „Проволока медная, круглая для электротехнических целей“, значение  $\alpha'$  равно 238 (Приложение 1).

Насколько нам известно, вопрос о численном значении  $\alpha'$ , равном 238, ставился в свое время работниками завода ХЭМЗ перед соответствующими организациями со ссылкой на действовавший в то время ОСТ 7940. По приведенным в этом стандарте данным на основании выводов, указанных в приложении 1, значение  $\alpha' = 238$ .

Далее в том же ГОСТ 2933-45 (§ 23) приведено выражение поправочного коэффициента  $K$  для случая когда испытание производится при температуре окружающей среды, отличной от 35°C:

$$\text{для токовых катушек } K_1 = \frac{270}{235 + \vartheta_a}, \quad (2)$$

$$\text{для катушек напряжения } K_2 = \frac{235 + \vartheta_a}{270}. \quad (3)$$

В обеих формулах для  $K$  следует внести исправления: необходимо учитывать значение  $\alpha' = \frac{1}{\alpha} = 238$ , а не 235.

Таким образом, формула (2) должна иметь вид:

$$K_1 = \frac{273}{238 + \vartheta_a}. \quad (4)$$

Формула (3) на основании проведенного нами анализа (Приложение 2) должна быть следующей:

$$K_2 = \frac{238 + \vartheta_a + 2\theta}{273 + 2\theta}. \quad (5)$$

При пользовании формулой, указанной в стандарте, получается несколько заниженное значение температуры перегрева, что может привести к выпуску продукции, не удовлетворяющей требованиям ГОСТ.

В обозначениях температуры, принятых в разных стандартах, имеется несоответствие. Так, в стандарте „Условные обозначения механических величин“ температура обозначается буквой  $\tau$ , в ГОСТ 2112-46 буквой  $t$ , а в ГОСТ 2933-45 буквой  $\vartheta$ .

Приложение 1.

**Определение температурного коэффициента круглой медной проволоки для электротехнических целей.** Значение температурного коэффициента такой проволоки может быть найдено по данным ГОСТ 2112-46:

а) Электрическое (активное) сопротивление проволоки, отнесенное к 1 мм<sup>2</sup> поперечного сечения и 1 м длины при температуре 20° С, должно быть не более 0,01754 (для мягкой меди).

Пересчет сопротивления  $R_t$  медной проволоки длиной 1000 м и с площадью поперечного сечения 1 мм<sup>2</sup> при температуре  $t$  на сопротивление  $R_{20}$  той же проволоки при температуре 20° С производится по формуле:

$$R_{20} = R_t + 0,068 (20 - t).$$

Определим значение  $R_0$  при  $t = 0$ .

$$R_0 = R_{20} - 0,068 (20 - 0) = 17,54 - 1,36 = 16,18.$$

Далее, пользуясь известным соотношением:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

можем написать

$$R_{20} = R_0 (1 + \alpha t)$$

или

$$17,54 = 16,18 (1 + 20 \alpha).$$

Откуда  $\alpha = 0,0042$ ;  $\frac{1}{\alpha} = 238$ .

Приложение 2.

**Нахождение поправочного коэффициента  $K_2$  к формуле для определения температуры перегрева обмотки из медной проволоки.** Примем следующие обозначения (придерживаясь обозначений ГОСТ 2933-45):  $\vartheta_2$  — температура обмотки в нагретом состоянии при окружающей температуре  $\vartheta_a$ ;  $\vartheta'_2$  — температура обмотки в нагретом состоянии при окружающей температуре 35° С;  $\theta$  — установившийся перегрев обмотки при температуре окружающей среды  $\vartheta_2$ ;  $\theta'$  — при температуре окружающей среды 35° С.

Дифференциальное уравнение нагрева обмотки при нагрузке  $P$  имеет вид:

$$P dt = c G d \vartheta + \mu S (\vartheta_2 - \vartheta_1) dt. \quad (6)$$

При постоянном значении приложенного напряжения  $U$  имеем:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{R_0 (1 + \alpha \vartheta)}.$$

Установившееся состояние:

$$\vartheta = \vartheta_2; d\vartheta = 0.$$

В этом случае уравнение (6) может быть выражено так: при окружающей температуре

$$\vartheta_a: \frac{U^2}{R_0 (1 + \alpha \vartheta_2)} = \mu S (\vartheta_2 - \vartheta_a); \quad (7)$$

при окружающей температуре 35° С:

$$\frac{U^2}{R_0 (1 + \alpha \vartheta'_2)} = \mu S (\vartheta'_2 - 35). \quad (8)$$

Далее имеем:

$$\vartheta_2 - \vartheta_a = \theta; \quad (9)$$

$$\vartheta'_2 - 35 = \theta'. \quad (10)$$

Из (7), (8), (9), (10) получаем следующее отношение:

$$\frac{1 + \alpha \vartheta'_2}{1 + \alpha \vartheta_2} = \frac{\theta}{\theta'}.$$

или

$$(\theta')^2 + \frac{(1 + 35 \alpha)}{\alpha} \theta' - \frac{(1 + \alpha \vartheta_a + \alpha \theta)}{\alpha} = 0, \quad (11)$$

$$\theta' = \frac{1}{2} [-(\alpha' + 35) + \sqrt{(\alpha' + 35)^2 + 4(\alpha' + \vartheta_a + \theta) \theta}]. \quad (12)$$

При окружающей температуре 40° С имеем:

$$\theta' = \frac{1}{2} [-(\alpha' + 40) + \sqrt{(\alpha' + 40)^2 + 4(\alpha' + \vartheta_a + \theta)\theta}]. \quad (12')$$

Для решения задачи преобразуем подкоренное выражение:

$$\begin{aligned} & \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha} + 35 + 2\theta\right)^2 - 4(35 - \vartheta_a)\theta} = \\ & = \left(\frac{1}{\alpha} + 35 + 2\theta\right) - \frac{2(35 - \vartheta_a)\theta}{\frac{1}{\alpha} + 35 + 2\theta} + \\ & + \frac{2(35 - \vartheta_a)^2\theta^2}{\sqrt{(\frac{1}{\alpha} + 35 + 2\theta)^2 - 4(35 - \vartheta_a)\theta}} - \dots \end{aligned}$$

### По поводу замечаний Б. Ф. Вашуры

Принимать значение  $\alpha'$  равным 238 (вместо 235), необоснованно. Согласно приведенной в ГОСТ 2112-46 формулы  $R_{20} = R_t + 0,038(20 - t)$ .

Эта формула принята указанным ГОСТ для пересчета сопротивления  $R_t$  медной проволоки длиной 1000 м и сечением 1 мм<sup>2</sup> при температуре  $t^\circ$  на сопротивление  $R_{20}$  той же проволоки при температуре 20° С.

Между прочим, значение  $\alpha' = 234,5$  (округленное до 235) принято во всех стандартах национальных и международных.

Это число не условное, не „стандартное“ (Reference Number), какое принимается только для целей сравнительной оценки машин или аппаратов между собой. Число 235 есть значение, обратное экспериментально установленному значению температурного коэффициента меди, равного 0,00425 при 0°.

Приведенная же выше формула из ГОСТ 2112-46, которой Б. Ф. Вашура предлагает руководствоваться, как раз и является условной. Она, повидимому, учитывает то обстоятельство, что „измерение электрического сопротивления производится с точностью до 10% определяемой величины“<sup>1</sup> и что вследствие этого применение точной формулы

$$R_{20} = R_t + 0,0687(20 - t)^*$$

<sup>1</sup> См. ГОСТ 2112-43, п. 18.

\* Это равенство вытекает из соотношения  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{\alpha' + \vartheta_2}{\alpha' + \vartheta_1}$ , когда полагают  $\alpha' = 235$  и  $R_{20} = 17,54$ . Так имеем:

$$\frac{R_{20}}{R_t} = \frac{235 + 20}{235 + t} \quad \text{или} \quad \frac{17,54}{R_t} = \frac{255}{235 + t};$$

$$\frac{17,54}{255} = \frac{R_t}{235 + t}, \quad \frac{R_t}{235 + t} = 0,0387;$$

$$R_t = 0,0387 \cdot 235 + 0,0687 \cdot t; \quad R_{20} = 0,0387 \cdot 235 + 0,0387 \cdot 20;$$

откуда

$$R_{20} = R_t + 0,0387(20 - t).$$

Значение третьего члена ряда по сравнению с первым чрезвычайно мало, а поэтому принимаем во внимание только первые 2 члена ряда.

Тогда

$$\theta' = \frac{1/\alpha + \vartheta_a + 2\theta}{1/\alpha + 35 + 2\theta} \theta = K_2 \theta.$$

Считая  $1/\alpha = 238$ , получаем окончательное выражение для коэффициента  $K_2$ :

$$\text{при } 35^\circ \text{ С} \quad K_2 = \frac{238 + \vartheta_a + 2\theta}{273 + 2\theta}, \quad (5)$$

$$\text{при } 40^\circ \text{ С} \quad K_2 = \frac{238 + \vartheta_a + 2\theta}{278 + 2\theta}. \quad (5')$$

могло бы нередко приводить к формально неудовлетворительному результату  $R_{20} > 0,01754$ , так как согласно п. 6 того же ГОСТ 2112-43  $R_{20}$  не должно превышать 0,01754 ом на 1 м при сечении в 1 мм<sup>2</sup>.

Можно спорить о том, приемлема ли указанная вначале условная формула из стандарта. Страхуя от формально неудовлетворительного результата, она порою может привести к результату, только формально удовлетворительному. Но нельзя, базируясь на этой условной формуле, принять значение  $\alpha' = 238$ , противоречащее эксперименту.

Проведенный Б. Ф. Вашурой в Приложении 2 анализ приводит к правильному выражению для поправочного коэффициента

$$K_2 = \frac{\alpha' + \vartheta_a + 2\theta}{\alpha' + 35 + 2\theta}.$$

Данное в ГОСТ 2112-46 выражение поправочного коэффициента  $K_2$  неверно.

Разумеется, что и в предлагаемом Б. Ф. Вашурой выражении (4) следует принять  $\alpha' = 235$  (а не 238).

Отмеченное несоответствие в обозначениях температуры, принятых в разных стандартах, является одним из показателей не совсем удовлетворительного состояния разработки стандартов. Не только обозначения одних и тех же величин различны в разных стандартах, но и терминология одних и тех же понятий в разных стандартах часто встречается различная.

Кандидат техн. наук Л. М. ШНИЦЕР  
Московский трансформаторный завод





## Научно-техническая сессия в Ленинграде по вопросам перенапряжений

В работе сессии, организованной Министерством электрических станций СССР и ВНИТОЭ в марте с. г. в Ленинграде, приняло участие 110 делегатов, представлявших 20 энергосистем Советского Союза, заводы МТЗ, «Пролетарий», «Электроаппарат», «Уралэлектраппарат» и 9 научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений. Кроме делегатов в работе сессии приняли участие 45 представителей ленинградских заводов и проектных организаций.

На сессии были обсуждены 17 докладов и 4 содоклада по вопросам грозозащиты, перенапряжений, изоляции, а также норм на испытательные и разрядные напряжения.

Открывая сессию, доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский отметил большое значение и своевременность сессии.

С докладом от ЦНИЭЛ МЭС «Исследование грозозащиты энергетических систем и ее усовершенствование» выступил доктор техн. наук, проф. В. В. Бургсдорф, обобщивший опыт эксплуатации грозозащиты в большинстве энергосистем Советского Союза за последние 3 года<sup>1</sup>. Содоклады от энергосистем сделали инж. Г. И. Лысаковский (Донбассэнерго), инж. А. П. Карамзин (Свердловэнерго) и инж. Е. Кругликов (Ярэнерго).

Доклад «Автоматическое повторное включение, как способ грозозащиты» сделали инж. Н. Н. Беляков и инж. А. И. Гершенгорн (ЦНИЭЛ). В докладе «О применении в проектной практике руководящих указаний по защите от перенапряжений» инж. А. Н. Шеренцис (ТЭП) отметил необходимость переработки некоторых разделов «Руководящих указаний по защите от перенапряжений» (табл. 2 и др.). Доклад «Сравнительные расчеты грозозащиты линий передачи» сделал кандидат техн. наук М. В. Костенко (ЛПИ). Кандидат техн. наук Д. В. Разевиг (МЭИ) в докладе «Методы расчета грозозащиты вращающихся машин», на основе анализа литературных данных и некоторых собственных экспериментов, привел кривые, позволяющие весьма просто рассчитывать волновые параметры генераторов<sup>2</sup>.

Научные сотрудники ЛПИ инж. Г. С. Кучинский, кандидат техн. наук И. Ф. Половой и инж. О. В. Щербачев представили доклад на тему: «Определение надежности грозозащиты подстанций высокого напряжения». Доклад «Конструкция и характеристики вентильных разрядников 3—200 кВ» представили сотрудники ВЭИ: кандидат техн. наук Л. И. Иванов, кандидат техн. наук В. П. Савельев и кандидат физ.-матем. наук В. И. Пружинина.

Оживленные прения вызвал доклад инж. А. И. Пирязевой (ЛПИ) «Пропускная способность и остаточные напряжения современных вилтовых разрядников». Докладчик подверг критике принятую ныне в некоторых нормах оценку пропускной способности разрядника по максимальной амплитуде тока импульса данной продолжительности, которую разрядник может выдержать без разрушения. За критерий пропускной способности разрядника предлагается принять, в соответствии с требованиями эксплуатации, общее количество энергии, выделяющееся в разряднике при испытаниях его серией ударов тока одинаковой амплитуды и формы волны до момента разрушения разрядника. Содоклад «Исследование пробивных напряже-

ний вилтовых разрядников» сделал кандидат техн. наук Д. В. Шишман.

Кандидат техн. наук Г. Н. Тер-Газарян (ТНИСГЕИ) выступил с докладом «Динамические перенапряжения в энергосистемах»<sup>3</sup>. В докладе «К вопросу о расчете индуктированных напряжений» Д. В. Разевиг изложил предложенный им метод расчета индуктированных перенапряжений при прямом ударе молнии в трос с учетом влияния фронта тока молнии. В. В. Бургсдорф сделал также доклад на тему «Исследование открытых электрических дуг большой мощности»<sup>4</sup>.

Вопросу высоковольтной изоляции и норм на испытательные и разрядные напряжения была посвящена целая серия докладов. Кандидатом техн. наук А. В. Пановым (ВЭИ) было представлено два доклада: «К вопросу о нормах на испытательные и разрядные напряжения» и «К вопросу о координации изоляции высоковольтных трансформаторов».

Вопросу поведения изоляции при коммутационных перенапряжениях в зависимости от температуры окружающей среды и дождевой воды и от длительности перенапряжения посвятил свой доклад инж. Г. А. Лебедев (ВЭИ). В докладе «Разброс разрядных напряжений изоляторов и промежутков при импульсах» кандидат техн. наук В. К. Кожухов (ВЭИ) остановился на закономерностях, которым подчиняются кривые распределения отклонений от средней вольтсекундной характеристики при данном предразрядном времени. На большом количестве опытов (20 000 осциллограмм разрядов) было установлено, что эти отклонения подчиняются закону нормальных частот.

Кандидат техн. наук А. С. Зингерман (ЛПИ) сделал доклад «Импульсные характеристики изоляции при нестандартных волнах». Докладчик предложил взамен принятого в настоящее время определения вольтсекундной характеристики, как средней кривой в зоне рассеяния экспериментальных точек, строить семейство кривых, взятых для определенных вероятностей, которое образует вольтсекундную характеристику данного промежутка.

Доклад инж. Н. А. Козырева и кандидата техн. наук Д. В. Шишмана (ЛПИ) был посвящен импульсной прочности изоляции вращающихся машин. Этот вопрос исследован до сих пор весьма слабо. Произведенные в лаборатории ТВН ЛПИ исследования показали, что для определения электрической прочности изоляции машин применим метод математической статистики. Авторы рассчитали и построили по данным опытов вольтсекундные характеристики для трех машин различной мощности и напряжения, а также дали универсальные характеристики, которые позволяют строить вольтсекундные характеристики для других машин для различных волн и вероятностей пробоя.

В резолюции сессии отмечено, что за последние годы энергосистемы, научно-исследовательские институты и вузы Советского Союза провели ряд ценных исследований по вопросам перенапряжений и грозозащиты, которые делают своевременным пересмотр правил и норм в этой области. Сессией отмечена также необходимость обращения серьезного внимания на показатели экономической эффективности применяемых в настоящее время систем грозозащиты.

Инж. Л. С. УТКИНА

<sup>1</sup> См. статью В. В. Бургсдорфа на эту тему в журнале «Электричество», № 2, 1949 г.

<sup>2</sup> Статья Д. В. Разевига на эту тему будет опубликована в одном из ближайших номеров.

<sup>3</sup> Статья Г. Н. Тер-Газаряна на эту тему см. в журнале «Электричество», № 7, 1949.

<sup>4</sup> Статья В. В. Бургсдорфа на эту тему была опубликована в 1948 г. («Электричество», № 10).



## Ленинградская конференция читателей журнала „Электричество“

21 июня с. г. в зале Технической библиотеки Ленэнерго на Марсовом поле в Ленинграде была проведена конференция читателей журнала «Электричество». Конференцию организовали Ленинградское отделение Всесоюзного научного инженерно-технического общества энергетики (ЛОНИТОЭ) и редакция журнала «Электричество». В работе конференции приняло участие большое число читателей журнала — ленинградцев.

Председатель ЛОНИТОЭ инж. С. В. Усов обратился к присутствующим с кратким вступительным словом, в котором отметил, что журнал «Электричество» — старейший технический журнал, поддерживающий научно-пропагандистские традиции пионеров русской электротехники, — является основной трибуной советской электротехнической мысли, отражающей достижения советских электротехников, их творческую работу в многочисленных областях современной электротехники. — Мы любим этот журнал, воспитываемся на нем, гордимся и радуемся его успехам и кровно заинтересованы в его процветании. Однако журнал не свободен от недостатков, устранение которых является общим делом редакции, авторов и организаций ВНИТОЭ. Открывая конференцию, С. В. Усов призвал участвующих в ней читателей журнала и членов ВНИТОЭ активно включиться в работу конференции и подвергнуть деятельность журнала деловой и острой критике.

Редактор журнала доктор техн. наук, проф. Г. Н. Петров в своем докладе сообщил о выполненной журналом «Электричество» за последние 2½ года работе, об отдельных успехах журнала, достигнутых за этот период, и о тех недостатках, которые еще имеют место в журнале, но с которыми редакция борется и рассчитывает их ликвидировать, опираясь на критику и мнение широких кругов электротехнической общественности, авторов и читателей журнала «Электричество», которые периодически собираются с этой целью на читательские конференции в различных городах Советского Союза. Встреча с электротехнической общественностью Ленинграда несомненно принесет много полезного и для журнала и для организаций ВНИТОЭ, которые еще мало уделяют журналу внимание в своей повседневной работе, редко обсуждают опубликованные в журнале материалы, недостаточно выдвигают новые, интересные темы, апробированные общественностью, для помещения в журнале.

Оживленные прения по докладу продемонстрировали большой интерес читателей журнала «Электричество», собравшихся на Ленинградскую конференцию, к деятельности журнала. Выступавшие говорили о высоком значении журнала, об огромной помощи, оказываемой журналом для совершенствования квалификации читателей. С большой страстью в прениях отмечались неизжитые еще недостатки о работе журнала и вносились многочисленные предложения, направленные на улучшение журнала.

Доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич (ЛЭТИ), указав на растущее с каждым днем значение новых открытий в области физики для электротехники, подчеркнул важность всемерного сближения науки и практики, актуальность внедрения в электротехнику новых физических взглядов и современных методов, основанных на новейших физических представлениях. Опубликование в журнале серии статей по электронике несомненно встретит со стороны всех читателей полное одобрение. Читательский и авторский коллектив ЛЭТИ считает, что в журнале уделяется недостаточное место вопросам электрификации отдельных отраслей промышленности. Редакция правильно поступила, введя в журнал новый раздел «Из опыта работы». В журнале необходимо систематически помещать информацию по результатам проводимого сотрудничества работников науки и производства, с тем чтобы заинтересованные организации (с одной стороны, предприятия и, с другой стороны, научные и учебные заведения) своевременно узнавали об этих результатах и пользовались имеющимся в этом направлении опытом. Введенная в текущем году в разделе библиографии новая форма кратких рецензий (аннотаций) должна развиваться, если нужно будет, то за счет некоторого сокра-

щения места, отводимого для развернутых рецензий, так как критические аннотации на возможно большее число новых книг по физике и электротехнике поможет читателю быть всегда в курсе новинок, а большие (развернутые) рецензии, как правило, появляются с опозданием. С. А. Ринкевич обратил внимание редакции на необходимость более тщательной проверки поступающих в журнал статей и заключений по ним рецензентов, во избежание неосновательных возвратов статей авторам.

Кандидат техн. наук, доц. А. Г. Лурье (ЛПИ) предложил сохранить раздел авторефератов, так как бывают случаи, когда у автора статья в полном объеме еще не назрела, а с точки зрения приоритета и иных соображений предварительное сообщение было бы желательным опубликовать. А. Г. Лурье выразил свое отрицательное отношение к проведенному в журнале сокращению и редактированию текста рецензии на «Задачник по теоретическим основам электротехники» (Электричество, № 4, 1949), составленной им совместно с И. А. Зайцевым.

Доктор техн. наук, проф. Л. М. Пиотровский (ЛПИ) поднял вопрос о восстановлении в журнале серии критических рефератов из иностранных технических журналов, особенно имея в виду интересы периферийного читателя, часто не располагающего в достаточной мере первоисточниками. Журнал «Электричество» должен в большей степени освещать внутризаводскую деятельность электротехников, сообщать к сведению всех читателей о последних новинках, о параметрах новых изделий, деталей и материалов, о новых методах работы и т. п.

Кандидат техн. наук, доц. Б. Л. Айзенберг (ЛИЭИ) высказал сожаление по поводу отсутствия в тематическом плане журнала на 1949—1950 гг. актуальных вопросов, относящихся к городским электрическим сетям. Не нашли отражения в журнале материалы Первой всесоюзной научно-технической сессии по городским электрическим сетям. К этой области электротехники внимание редакции должно быть усилено.

Доктор техн. наук, проф. Л. Р. Нейман (ЛПИ) предложил, чтобы в новом разделе «Из опыта работы» освещались не только темы, возникшие на производстве, но и опыт работы научно-исследовательских организаций и разбирались взаимные запросы ученых и работников промышленности не только Москвы и Ленинграда. Коснувшись тематического плана журнала на 1949—1950 гг., и одобряя предусмотренные в первом разделе темы («Современные научные воззрения на электричество»), Л. Р. Нейман рекомендовал редакции уже теперь озаботиться заказом статей на эти темы, поскольку в скорейшем появлении в журнале таких статей заинтересованы поголовно все читатели, а известные трудности, связанные с подготовкой статей на эти темы, должны быть преодолены как можно скорее.

Инж. М. О. Каменецкий (трест «Севзапэлектромонтаж»), отметив некоторое увеличение за последние 2 года статей по разделу «Из истории русской электротехники», возражал против приурочивания их лишь к юбилейным датам и требовал большего числа статей по этому разделу. М. О. Каменецкий поднял также вопрос об ускорении издания сводного указателя, охватывающего все годы существования журнала «Электричество». Учитывая приближающееся в 1950 г. 70-летие журнала «Электричество», издание Указателя следовало бы форсировать и осуществить не позднее I квартала 1950 г.

Инж. Б. А. Кожевников (завод «Севкабель») отметил недостаточное число статей по вопросам теории и эксплуатации кабельных изделий; инж. Г. Б. Холявский (завод «Электроаппарат») предложил помещать в журнале небольшие статьи, специально освещающие инженерно-конструкторские расчеты и методы; инж. Ю. Б. Меркин (Управление электрификации Северо-западного округа ж. д.) приветствовал журнал от имени членов ВНИТОЭ, работающих на электротяге ж. д. и просил увеличить освещение на страницах журнала вопросов выбора систем электрической тяги, выбора новых типов электролокомотива и др.; кандидат техн. наук, доц. В. Е. Манойлов (ЛЭТИ) указал на то, что редакция продолжает помещать

статьи большого размера; не говоря уже о трудности чтения больших журнальных статей, это приводит к задержке опубликования других злободневных материалов; кандидат техн. наук, доц. В. Т. Ренне (ЛПИ) обратил внимание на отсутствие в плане журнала на 1949—1950 гг. тем, посвященных исследованиям полупроводников и магнитных материалов; им же было высказано пожелание о скорейшем восстановлении публикации рефератов из иностранных электротехнических журналов.

Кандидат техн. наук Е. Я. Казовский (завод «Электросила») остановился на недостатках журнала. Связь журнала с электропромышленностью недостаточная и это приводит в ряде случаев к сугубой теоретичности статей, к оторванности рассматриваемых в некоторых статьях вопросов электромашиностроения от действительных запросов производства. Современные практические методы расчета электрических машин, с которыми должны бы были ознакомиться многие читатели — инженеры электромашиностроительных предприятий СССР, почти не находят отражения в тех статьях по электрическим машинам, которые печатаются в журнале. Электротехническая общественность (ВНИТОЭ) и редакция журнала «Электричество» связаны друг с другом слабо и несистематично. Следует признать, что организации ВНИТОЭ (отделения и первичные низовые организации) не ведут постоянной работы по журналу. Можно напомнить о случае, когда редакция в ответ на присланную секцией ВНИТОЭ рецензию, сообщила, что рецензия на ту же книгу уже была заказана ранее другому специалисту и принята к печати. ВНИТОЭ должно было бы являться, наряду с Академией наук, МЭС и МЭП, соиздателем журнала «Электричество».

Доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский (ЛПИ) предложил редакции расширить авторский коллектив журнала, главным образом, за счет привлечения новых авторов из крупных электротехнических заводов и энергосистем Советского Союза; увеличить число заказных статей по темплану, с целью обеспечения реализации последнего; периодически публиковать в журнале статьи по экономическим вопросам электроэнергетики; увеличить число дискутируемых на страницах журнала статей на актуальные темы, так как преимущество такой формы всестороннего разъяснения читателям выбранных для дискуссии проблем очевидно; восстановить рефераты; возложить на членов редколлегии журнала окончательное, совместно с редактором журнала, решение по отзывам, поступающим от рецензентов на статьи.

Член-корр. АН СССР, проф. М. П. Костенко заметил, что многие лица, выступавшие на конференции с упреками на отсутствие или недостаточность статей по отдельным темам, как раз и виноваты в этом, ибо они не пишут этих статей, хотя редакция неоднократно призвала научных, педагогических работников, инженеров и др. деятелей электротехники Москвы, Ленинграда и др. городов СССР к более активному участию в журнале. Редакция выражает надежду, что темплан журнала, розданный всем присутствующим на конференции, и разосланный по многим другим каналам с приглашениями писать в журнал по этому темплану, найдет надлежащий отклик и авторский коллектив журнала «Электричество» начнет быстро расти. Ряд недостатков журнала связан с коренными недостатками, имеющимися в работе ВНИТОЭ; их можно будет ликвидировать при условии более тесной связи организаций ВНИТОЭ с жизнью журнала. Выступление А. Г. Лурье по поводу написанной им рецензии было неверным: рецензия нуждалась в серьезных исправлениях и они были осуществлены редакцией правильно, так как рецензии должны быть короткими с отдельными поучительными примерами, а не представлять собой нагромождение второстепенных и третьестепенных подробностей и частных, в которых тонет основная линия и мысль рецензии. Переходя к вопросу рецензирования статей, поступающих в редакцию, следует признать, что некоторые статьи носят весьма незрелый характер и производят впечатление, что автор их попросту спешил «печататься», вместо того чтобы досконально и глубоко доработать выбранную им тему, связать ее с жизнью, с нуждами производства и только тогда направить свою работу в такой почетный орган, каким является старей-

ший отечественный научно-технический журнал «Электричество». В заключение своего выступления М. П. Костенко внес предложение заказывать авторам защищенных диссертаций на соискание ученой степени авторефераты на те же темы для опубликования в журнале.

Доктор техн. наук, проф. А. Е. Алексеев (ЛИИЖТ) присоединился к высказываниям о недостаточной близости ВНИТОЭ к деятельности старейшего журнала «Электричество», зародившегося в свое время именно в составе Русского технического общества. Журнал «Электричество» должен реферировать и рецензировать ведомственные электротехнические журналы («Электрические станции», «Вестник электропромышленности», сборники «Ленэнерго», «Электросила» и др.), а также электротехнические журналы стран новой демократии.

Директор Госэнергоиздата Д. В. Калантаров, принявший участие в конференции, отвел имевшее место в прениях попытки представить дело так, будто удельный вес ленинградцев в авторском коллективе журнала мал. Исключительно мал в действительности удельный вес авторов многих других промышленных центров Советского Союза и увеличения числа авторов, работающих на заводах и в энергосистемах Донбасса, Урала, Сибири следует добиваться в первую очередь. Это, конечно, никак не должно и не может отразиться на авторской активности ленинградцев, к которым редакция постоянно обращается с предложением писать хорошие, но сжатые и доступные по форме изложения, статьи по самым актуальным, жизненным темам. После краткой информации присутствующих о работе Госэнергоиздата и, в частности, о мерах по улучшению издания журнала «Электричество» Д. В. Калантаров выразил удовлетворение работой конференции и участием крупнейших деятелей науки и электротехники Ленинграда, свидетельствующим о большой заинтересованности их в журнале «Электричество», об их желании всячески улучшить и поднять еще выше научный уровень этого близкого всем советским электротехникам журнала.

В заключительном слове проф. Г. Н. Петров, ввиду позднего времени, кратко ответил на некоторые замечания, высказанные в прениях, и поблагодарил читателей-ленинградцев, принявших участие в конференции, за деловую критику и внесенные предложения, которые редакция учтет в своей дальнейшей работе.

В резолюции, предложенной конференции ЛОНИТОЭ, отмечалось, в частности, что тематика журнала в основном отвечает потребностям восстановления и развития народного хозяйства СССР на более высоком техническом уровне, что заслуга журнала является правильное освещение истории электротехники, способствующее установлению приоритета русских ученых и изобретателей в ряде областей электротехники, что большая часть статей отличается содержательностью и помогает совершенствованию отечественного электромашиностроения и электропривода. Наряду с этим отмечалось, что журнал мало освещает вопросы техники высоких напряжений и высоковольтного аппаратостроения, в журнале печатается недостаточно материалов, имеющих непосредственную — для текущего времени — ценность, которыми уже сегодня мог бы воспользоваться конструктор, инженер-производитель. В дальнейшем необходимо статьи по основным, актуальным вопросам после их опубликования обсуждать в низовых организациях ВНИТОЭ и результаты помещать в журнале. При отборе статей редакция должна требовать от авторов сочетания практической направленности материала с глубиной трактовки вопроса, с соблюдением при том сжатой и доступной по изложению формы.

В помещении, в котором происходила конференция, ЛОНИТОЭ была организована выставка материалов журнала «Электричество» за весь период его издания, начиная с 1880 г. С большим интересом участники конференции рассматривали стэнды с пожелтевшими страницами журнала «Электричество» прошлого века, номера, в которых печатались оригинальные работы крупнейших электротехников нашей Родины. С устройством выставки ознакомился принимавший участие в конференции один из старейших русских электротехников и деятелей журнала «Электричество» член-корр. АН СССР, проф. Михаил Андреевич Шателен.

## Профессор В. К. Аркадьев

(к 65-летию со дня рождения)

Член-корреспондент АН СССР, проф. Владимир Константинович Аркадьев родился в 1884 г. в Москве. В. К. Аркадьев заведует в Московском государственном университете лабораторией электромагнетизма и кафедрой «Теоретические основы электротехники». Еще в начале текущего столетия, окончив физико-математический факультет Московского университета и работая у профессоров Н. А. Умова, А. П. Соколова и П. Н. Лебедева, Аркадьев выполнил два исследования с самыми короткими электрическими волнами; при этом он обнаружил, что железо, сталь и никель не могут перемагничиваться быстрее, чем двадцать тысяч миллионов раз в 1 сек, что соответствует длине волн около 1 см.

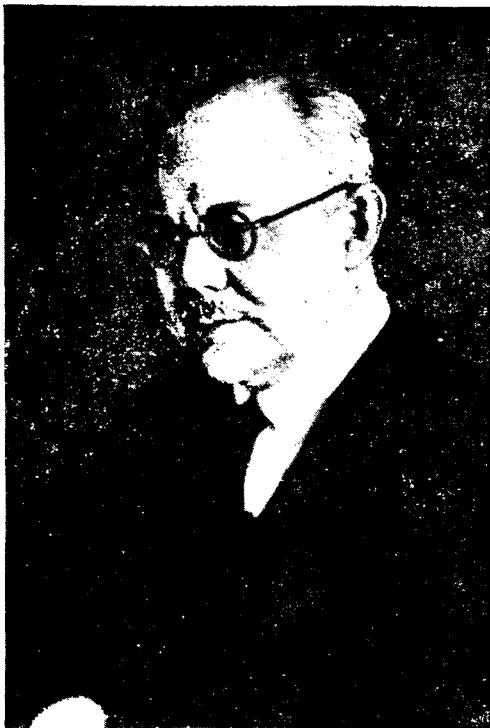
С 1908 г. В. К. Аркадьев преподавал физику на курсах им. Тихомирова и в Московском государственном университете им. Шанявского. В последнем он руководил также научными работами слушателей; среди этих работ можно отметить исследования по дифракции света студентов А. Г. Калашникова, А. С. Беркмана и Н. Н. Яковлева и позже работы студента Московского университета Б. А. Введенского по вихревым токам и магнетизму. К тому же времени относится изобретение «генератора молний» (студент Н. В. Баклин); этот генератор применяется в высоковольтных лабораториях для получения напряжений в миллионы вольт.

В 1913 г. В. К. Аркадьев опубликовал свою «Теорию электромагнитного поля в ферромагнитных металлах» и другие статьи о магнетизме, осветившие новую, обнаруженную им, сторону магнитных явлений, именно магнитные временные и пространственные характеристики железа и никеля. В частности им введено в теорию понятие комплексной магнитной проницаемости.

В 1915 г. В. К. Аркадьевым была организована физико-химическая лаборатория, впервые сформулировавшая научные основания борьбы с ядовитыми летучими средствами (см. 4-е издание его книги «Научно-технические основы газовой борьбы», Москва, 1917). В это же время Аркадьев редактировал сборник «Известия Физико-химической лаборатории». Аркадьев изобрел ряд приборов, применяющихся в газовом деле: анеометр, реометр для определения скорости газов в трубах, предупредители газовых атак и др.

В 1927 г. В. К. Аркадьев избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. С 1923 по 1931 гг. он заведывал магнитометрическим отделом ГЭИ (в дальнейшем ВЭИ).

В 1921 г. В. К. Аркадьев организовал в Москве научный физический кружок («Магнитный коллоквиум»), работавший под его руководством. Экспериментальная работа кружка велась в помещении Физического института Московского университета до 1933 г. Вначале эта организация имела название «Московская магнитная ла-



боратория». В 1932 г. лаборатория была переименована в «Лабораторию электромагнетизма» и в следующем году присоединена к МГУ. В 1939 г. на базе лаборатории В. К. Аркадьевым была организована кафедра теоретических основ электротехники. Работы лаборатории получили широкое признание в СССР и за его пределами. До 1949 г. лаборатория издала около 300 работ. В их числе получившие наибольшую известность: работа по ультрагерцевым волнам, полученным А. А. Глаголевой-Аркадьевой, и работа по магнитным спектрам, представляющим собой аномалии в намагничивании железа переменными полями определенных периодов; эта работа составляет содержание основанной Аркадьевым новой дисциплины — «магнитной спектроскопии». Основные результаты работ В. К. Аркадьева по электромагнетизму отражены в его сочинении «Электромагнитные процессы в металлах» (1935—1936 гг.). В 1934 г. В. К. Аркадьев разработал экспериментально-теоретические основы для получения на бумаге изображений при помощи электрических сантиметровых волн («стик-

тография»); в 1940 г. указал метод просвечивания при помощи сантиметровых волн изделий из изоляторов и полупроводников. В 1942—1943 гг. В. К. Аркадьев развил теорию поверхностного эффекта в различных телах, в частности, в кристаллических и в связи с этим указал основы устройства компрессора магнитного потока для получения сверхсильных магнитных полей. К 1944 г. относятся работы в области изучения равновесия намагниченных тел и их относительного периодического движения.

В последние годы В. К. Аркадьев занимался вопросом парения магнита над сверхпроводником и парением проводников в высокочастотном поле. Он предложил исключительно простой способ демонстрации идеи В. Ф. Миткевича, на которой основан флюксметр, а также занимался вопросом связи современных работ по ядерному магнитному резонансу с его открытием в 1912 г. магнитных спектров.

Среди учеников В. К. Аркадьева имеются члены академий наук и профессора вузов: Б. А. Введенский, В. А. Корчагин, Н. С. Акулов, Е. И. Кондорский, К. М. Поливанов и другие.

В. К. Аркадьевым было опубликовано около 100 научных работ и столько же статей и заметок.

Под редакцией В. К. Аркадьева в 1938—1946 гг. выходили сборники Отделения технических наук АН СССР: «Проблемы электротехнического металла», «Практические проблемы электромагнетизма», «Проблемы ферромагнетизма и магнитодинамики» и др.

В. К. Аркадьев награжден орденом Трудового Красного Знамени и медалями.

*Инж. С. Д. КЛЕМЕНТЬЕВ*



## СПРАВОЧНИК ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ.

Под редакцией Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева. 623 стр., ц. 42 руб. Госэнергоиздат, 1948.

«Справочник по электрической изоляции», издание которого организовано Всесоюзным бюро электрической изоляции, состоит из двадцати четырех разделов. Раздел I (Введение) составил Б. М. Тареев, II (Газообразные диэлектрики)—И. М. Гольдман, III (Жидкие диэлектрики)—Ф. А. Полторацкий, IV (Электроизоляционные смолы)—Б. М. Тареев, Н. С. Фалкина и И. А. Ярославский, V (Электроизоляционные лаки, эмали, пасты, клеи и компаунды)—Б. М. Тареев и Р. С. Холодовская, VI (Воскообразные диэлектрики)—Р. С. Холодовская, VII (Волокнистые материалы)—М. И. Мантров, VIII (Пропитанные волокнистые материалы)—В. Б. Березин, IX (Слоистые пластики)—Ю. В. Корицкий и И. А. Ярославский, X (Пластические массы)—С. Н. Устинов, XI (Эластомеры)—С. М. Брагин, XII (Слюдяная изоляция)—Е. К. Лашев, XIII (Разные минеральные диэлектрики)—Б. М. Тареев, XIV (Электроизоляционные стекла)—Б. М. Тареев, XV (Керамические электроизоляционные материалы)—Л. И. Федоров и Г. А. Лебедев, XVI (Радиокерамика)—Г. И. Сканави, XVII (Сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики)—А. С. Шейн, XVIII (Основные методы испытания электроизоляционных материалов)—Б. М. Тареев, XIX (Электрическая изоляция в кабельной технике)—В. А. Привезенцев, XX (Изоляция в электрических машинах)—В. И. Калитвянский, XXI (Изоляция в трансформаторах)—А. В. Панов и А. В. Сапожников, XXII (Электрическая изоляция в радиотехнике)—С. А. Яманов и С. А. Смирнов, XXIII (Электрические конденсаторы)—В. Т. Ренне и XXIV (Различные справочные сведения)—Б. М. Тареев. Общее редактирование справочника выполнено Ю. В. Корицким и Б. М. Тареевым.

Современные электроизоляционные материалы весьма многочисленны и разнообразны как по своему назначению, так и по происхождению. Совершенно правильно поступили редакторы, поручив составление каждого раздела справочника специалистам,—ведущим работникам в каждой отдельной отрасли электроизоляционной техники. Благодаря этому получилась ценная книга типа энциклопедии. Справочник охватывает почти все материалы и некоторые детали из них, которые могут интересовать электротехника. Вполне доступно для читателя—специалиста средней квалификации составлено «Введение» (раздел I справочника), освещающее основные понятия, необходимые для правильного подхода к оценке пригодности того или другого электроизоляционного материала—электрические сопротивления и емкость изоляции, диэлектрические потери, пробой изоляции, тепловые и другие физико-химические характеристики диэлектриков.

По каждому разделу в справочнике дана главнейшая литература, позволяющая читателю углубить сведения по интересующему его вопросу. Числовой табличный материал справочника в большинстве разделов основан на последних данных. Для наглядности приведены схематические диаграммы, достаточно хорошо иллюстрирующие соответствующие зависимости. Нельзя, однако, не остановиться на некоторых дефектах справочника.

В разделе I дана не совсем точная классификация диэлектриков по признаку расщепления на ионы. Согласно этой классификации дипольные диэлектрики безоговорочно относятся к группе «не расщепляющихся на ионы»; между тем диссоциация может иметь место также и тогда, когда диэлектрик содержит полярные молекулы.

В разделе II не приведены необходимые данные по пробою газов при высоких частотах, являющиеся в настоящее время очень важными в ряде отраслей электротехники. На фиг. 2,5 (стр. 38) кривые 1 и 2 не точны при очень малых давлениях.

В разделе III приведен состав трансформаторных масел менее сложный, чем в действительности. В табл. 3,1 (стр. 41) помещены данные анализа одного из заводов при наличии данных ГОСТ. Вряд ли полезно приводить в справочнике подробные правила отбора проб трансфор-

маторного масла (сухая, чистая, белого стекла посуда и пр.). Если автор считал полезным привести термины «пурификация» и «кларификация» масла, то следовало бы, по крайней мере, расшифровать эти термины, легко заменяемые обычными русскими—очищение, осветление. Сомнительно утверждение, что введение в масло веществ, тормозящих его окисление, является «удобным и нетрудоемким мероприятием» (стр. 45).

По разделу IV следует отметить схематичность изложения, вытекающую, очевидно, из намерения авторов дать возможно больше материала на сравнительно небольшом числе страниц. Получается чрезвычайно большое количество наименований без выделения материалов, наиболее применимых или имеющих значение в отношении ближайшего будущего. Такое же замечание необходимо сделать и в отношении разделов V и VI. Читателю трудно составить себе отчетливое представление о компаундах, изложение особенностей которых занимает всего одну страницу (стр. 110) справочника. В параграфе 5,6—Клеи—подробно описан только карбинольный клей и не упомянуты другие клеи.

В разделе VI характеристики воскообразных диэлектриков недостаточно систематизированы; не всегда указаны частота тока и температура. Фиг. 6,3 требует пояснения и вряд ли типична для парафина.

Раздел VII содержит чрезвычайно большой материал. Вместе с тем в этом разделе не везде приведены необходимые электрические характеристики волокнистых материалов—диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость, электропроводность в зависимости от температуры и влажности.

В разделе IX дана классификация пластиков, вызывающая некоторые сомнения в отношении материалов с малыми диэлектрическими потерями при высокой частоте. Материалы этого типа имеют  $\text{tg} \delta$  при высокой частоте весьма значительный— $0,04 \div 0,10$  (стр. 189). Для пластических масс (раздел X) было бы интересно привести классификацию их по основным электрическим свойствам, распределив в связи с этим рассматриваемый материал. В табл. 10,4 нет  $\text{tg} \delta$  при высокой частоте для плексигласа. Табл. 10,4 и 10,5, ввиду совпадения ряда цифр, можно было бы объединить.

В разделе XVI не приведена классификация керамических материалов, принятая в проекте союзного стандарта на радиокерамику, и не даны характеристики некоторых широко применяемых материалов.

В разделе XVIII не описаны некоторые приборы для измерения свойств диэлектриков при высоких частотах—ИП-2, ГБЕ и др.

В разделе XXIII приведено описание ряда конструкций керамических конденсаторов (стр. 574), в большинстве случаев не применяемых в нашей промышленности. Отсутствуют сведения о герметизированных керамических конденсаторах.

В итоге, после просмотра «Справочника по электрической изоляции» под редакцией Ю. В. Корицкого и Б. М. Тареева следует прийти к выводу о ценности книги в целом. Такая книга, несомненно, позволит читателю достаточно полно ознакомиться с комплексом современных достижений в области электрической изоляции во всех ее разделах и одновременно укажет дальнейшие пути более глубокого и конкретного ознакомления с подробностями, которые окажутся необходимыми читателю.

Первый опыт подобного справочника, посвященного бурно растущей электроизоляционной технике, можно признать достаточно удачным; следует выразить надежду, что в последующем издании справочника все отмеченные недостатки будут выправлены.

Доктор техн. наук, проф. Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ

Ленинградский электротехнический институт  
им. Ульянова (Ленина).

## Ф. Е. ТЕМНИКОВ и Р. Р. ХАРЧЕНКО. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.

348 стр., ц. 17 руб. 50 коп. Госэнергиздат, 1948.

Электрические измерения неэлектрических величин получили в настоящее время широкое распространение в технике и науке. Поэтому выход книги Ф. Е. Темникова и Р. Р. Харченко «Электрические измерения неэлектрических величин» следует признать весьма своевременным. Авторы собрали большой материал, разбросанный, главным образом, в периодической литературе, обработали и классифицировали его. Книга разбивается на две части: первую «Узлы измерительных устройств», написанную Р. Р. Харченко, и вторую «Измерительные устройства», написанную Ф. Е. Темниковым.

Раньше, чем рассматривать книгу в целом, необходимо отметить, что эти части плохо согласованы между собой. При чтении книги создается впечатление, что авторы невнимательно читали друг друга, а редактор — их обоих. Так, у Темникова на стр. 257—258 («Потенциометрический метод») излагается то же, что у Харченко на стр. 47—52 («Электрохимические датчики»). У Темникова (стр. 217—220) тензометры называются магнито-стрикционными, тогда как у Харченко (стр. 38—41) такие же датчики называются магнитоупругими, а рис. 185 и 23 повторяют друг друга. Одно и то же обозначение

чувствительности  $S$  имеет у Темникова значение  $\frac{\Delta \mu}{\mu} : \frac{\Delta L}{L}$

(стр. 218), а у Харченко  $\frac{\Delta Z}{\Delta P}$  (стр. 40).

В предисловии авторы сетуют на недостаточный объем книги, а в то же время занимают место ненужными и малосущественными повторениями.

Таким образом, рецензируемую книгу следует рассматривать не как одно целое, а как две отдельные книги, различные по содержанию и характеру изложения и мало связанные между собой.

Глава I посвящена электрическим датчикам. Здесь изложены общие принципы и свойства датчиков различного вида, однако во многих случаях отсутствуют даже основные технические параметры. Например, в разделе «Термоэлементы» не указаны предельные температуры даже для наиболее употребительных термоэлектродных материалов. В тексте раздела «Фотоэлементы» нет никаких данных о чувствительности фотоэлементов различного вида, а на рис. 15 приведены характеристики двух иностранных фотоэлементов, тогда как имеются отечественные фотоэлементы значительно большей чувствительности. В разделе «Электрохимические датчики» не приведены числовые значения коэффициентов, в результате чего нельзя установить, с какого порядка потенциалами приходится иметь дело при потенциометрии и какие проводимости имеют место при кондуктометрии. В разделе «Датчики механических величин» также не указывается чувствительность проволоочных, угольных и других датчиков. Проволоочные датчики наклеиваются не на деталь (стр. 61), а на бумагу, которая уже наклеивается на деталь.

Классификацию датчиков также нельзя признать удачной. «Индуктивные  $L$ - и  $M$ -датчики» принципиально не отличаются между собой и могут быть преобразованы один в другой простым переключением. «Контактные» датчики являются одновременно « $R$ -датчиками», но лишь с импульсным изменением  $R$ . Смешано деление по принципу действия и по назначению. Например, разве магнитоупругие и пьезоэлектрические датчики не являются датчиками механических величин? Почему в разделе «Датчики механических величин», если уж эта глава должна дать представление о всех методах преобразования механических величин в электрические, ничего не сказано об электролитическом, болометрическом, электронном (лампа с подвижным электродом) методах измерения перемещения, о методе экранирования катушки в схеме лампового генератора? Последний раздел главы «Болометрические датчики», который должен был бы относиться к разделу « $R$ -датчики», также не содержит никаких технических данных и в нем даже не упоминаются получающие сейчас широкое распространение полупроводниковые болометры.

В главе II хорошо изложен ряд разработанных автором вопросов теории схем, однако, рассмотрены только такие самобалансирующиеся мосты и автоматические потенциометры, которые являясь сами по себе регуляторами, обладающими астатической характеристикой регулирования. В настоящее время получают применение схемы со статической характеристикой. Тем не менее эти схемы даже не упоминаются не только здесь, но и во второй части книги (глава XIV «Универсальные измерительные устройства»).

Глава III посвящена схемам с выпрямителями. Эта глава содержит систематизацию принципов построения и некоторые основы расчета этого рода схем. Особенно ценным в этой главе является, по нашему мнению, разбор управляемых схем с выпрямителями (фазочувствительные выпрямительные схемы). В измерительных схемах вопрос стабильности является одним из самых важных, поэтому приходится сожалеть, что автор не нашел места для рассмотрения «большого» для купроксных схем вопроса о температурных погрешностях.

Глава IV «Стабилизаторы тока и напряжения» оставляет в целом благоприятное впечатление. Особенно удачно выполнено рассмотрение нелинейного четырехполосника в качестве стабилизатора; дано в самом общем виде выражение для коэффициента стабилизации, весьма удобное для расчетов. К сожалению, это выражение неприменимо для схем стабилизаторов, где производная выходного напряжения по входному в точке стабилизации равна нулю. В этом случае оценка качества стабилизации может вестись по коэффициенту, который в книге неудачно назван «интегральным коэффициентом стабилизации» и который лучше было бы назвать «коэффициентом стабилизации в конечных приращениях». Весьма неудачно и название раздела 26 «Оригинальные схемы стабилизаторов», где речь идет просто о мостовых и дифференциальных схемах.

Глава V «Электронные усилители» содержит крайне элементарное изложение основных сведений об электронных усилителях, которые можно найти в любом учебнике из этой области.

Вторая часть книги «Измерительные устройства», написанная Ф. Е. Темниковым, посвящена описанию конкретных устройств для электрического измерения неэлектрических величин. Такой обзор в литературе появляется впервые. Он содержит ряд ценных материалов. Однако, подбор примеров здесь случаен. При отмечаемом самим автором отсутствии описания ряда типичных устройств 26 страниц уделено отрывочным сведениям об устройствах специальной техники: локаторах, компасах и радиотелеизмерительных системах. В ряде случаев приводятся детальные описания устройств, имеющих сомнительный практический интерес. Описания часто перегружены маловажными техническими деталями.

Главы VI и VII посвящены электрическим тензо-метрам и микрометрам. Отделение принципов, применяемых для тензометров (глава VI) от принципов, применяемых для микрометров (глава VII) искусственно. Более правильным было бы деление на методы, где используется зависимость электрических, магнитных и прочих свойств материала от механических напряжений в них, и на методы, где выходная электрическая величина датчика зависит от взаимного перемещения его деталей.

В разделе «Проволоочные тензометры сопротивления» списаны конструкции и схемы измерения. Однако, теория проволоочных тензометров опущена. С другой стороны, автор зачем-то подробно описывает расположение всех ручек на панели «измерителя деформаций» типа SR-4 американской фирмы Фоксборо (стр. 210).

Вряд ли можно оправдать то, что в главе VI пять страниц занято детальным описанием биметаллической следящей системы в качестве тензометра. Этот, сам по себе интересный, принцип сомнителен в отношении надежности и точности. Поэтому, вместо перечисления сечения проводов, всех размеров и пр., следовало бы оценить эксплуатационную надежность и возможную погрешность прибора. К слову сказать, в книге, посвящен-

ной методам измерений, исследование измерительных погрешностей почти совершенно отсутствует. Это следует отнести к ее серьезным пробелам.

В разделе, посвященном индуктивным микрометрам, автор определяет чувствительность микрометра как «отношение относительного изменения индуктивности к относительной величине перемещения:  $S = \frac{\Delta L}{L} : \frac{\Delta l}{l}$ » (стр. 227).

Однако, это определение не имеет общего смысла для датчиков, в которых осуществляется взаимное перемещение частей, так как величина  $l$  для разных конструкций различна.

В этом же разделе приведена дифференциальная схема индуктивного микрометра (рис. 196), про которую говорится, что она не требует стабилизации напряжения питания. Это неверно. Приведенная схема, взятая из книги П. М. Пфлиер «Электрические измерения механических величин», является обычной дифференциальной, небалансной схемой, выходная величина которой, конечно, изменяется с изменением напряжения питания. В действительности назначение схемы состоит в том, чтобы подобрать наиболее выгодный режим катодных выпрямителей и иметь на выходе прибор с нулем посередине, показывающий не только величину, но и направление перемещения.

Глава IX содержит описание электрических анализаторов жидкостей. Некоторые места этой главы повторяют сказанное в первой части книги. Однако, и здесь мы не можем, например, найти ответа на простой вопрос: какую разность потенциалов дает каломельный полужелезный элемент и сколько милливольт на единицу pH дают различные виды рабочих электродов? В то же время в главе описывается автоматический регулятор pH в сахарной промышленности (стр. 259), не имеющий прямого отношения к вопросам измерения.

В разделе «Кондуктометрический метод» автор утверждает, что «современными схемами для определения электропроводности растворов являются потенциометр и мост» (стр. 249). Очевидно, упоминание потенциометра здесь можно воспринимать только как досадную небрежность. Такая же небрежность допущена на стр. 251, где указано, что сердечник логометра для кондуктометрических измерений перемещается на угол, пропорциональный температуре жидкости, тогда как несколькими строками выше отмечается наличие температурной компенсации, что в действительности и имеет место.

Глава X «Электрические газоанализаторы» полностью посвящена масс-спектрометру. Признавая, что масс-спектрометр заслуживает серьезного внимания и помещению подробного описания его в книге является весьма ценным, мы считаем, что было бы необходимо привести в книге хотя бы основные схемы и краткие технические характеристики «обычных» типов электрических газоанализаторов.

Мы уже указывали выше, что глава XII «Электрические компасы» и глава XIII «Электрические локаторы» являются, по нашему мнению, лишними в книге. Стремление «объять необъятное» приводит к тому, что, например, трудно что-либо понять в описании на од-

ной странице сложного процесса в индукционном контурном компасе. Отдельным видам других компасов посвящается всего несколько фраз. Также вряд ли уместно в книге описание радиоальтиметра и пр.

Нам кажется, что следовало бы, по крайней мере, для данного объема книги ограничиться электрическими измерениями в промышленности и научных экспериментах, отбросив специальные области.

Глава XIV «Универсальные измерительные устройства» имеет большое значение. Непонятно, почему автор считает, что «к универсальным измерительным устройствам относятся... радиотелензимерительные установки» (стр. 307) и занимает 9 страниц описанием одной из них, тогда как ряд современных автопотенциометров совсем не описан. Приведенные описания мостов и потенциометров чрезмерно кратки и имеют ряд пробелов. В описании автопотенциометра Браун (стр. 310) не указано, например, даже, что подход к положению равновесия осуществляется прогрессивно уменьшающимися шагами. Очень жаль, что не описаны быстродействующие электронные автопотенциометры, а именно современная отечественная модель. В числе автопотенциометров со статической компенсацией совершенно не приведены распространенные фотоэлектрические потенциометры и весьма перспективные потенциометры с магнитными усилителями в качестве нуль-индикаторов. Те описания, которые помещены в книге, далеко не исчерпывают сведений, имеющихся в других руководствах и журнальных статьях по этим приборам.

Большая часть главы (15 страниц из 20) посвящена приборам, построенным на принципе динамической компенсации. Нисколько не умаляя значения этого интересного и многообещающего принципа, мы считаем, что следовало бы несколько сжать эту часть для того, чтобы предоставить больше места наиболее распространенным приборам со статической компенсацией. Например, в разделе «Координатные самописцы» не описано ни одного прибора со статической компенсацией.

Приведем несколько общих замечаний по рецензируемой книге.

1. В книге описываются иностранные приборы с излишней детализацией, тогда как многие отечественные приборы и их технические характеристики не приводятся. Неуместными также являются с нашей точки зрения такие формулировки, как «приборостроительные фирмы рекомендуют» (стр. 33) или «фирмы разрабатывают...» (стр. 23).

2. В книге приведена богатая и ценная библиография. Однако, в ней отсутствует целый ряд отечественных книг, посвященных контрольно-измерительным приборам в отдельных областях промышленности и содержащих описание некоторых приборов для электрического измерения неэлектрических величин, как, например, в металлургии (Львов, 1944; Топерверх, 1943; Лисовский, 1938), на электростанциях (Львов и Шендлер, 1945), в бурении (Федоров, 1941).

Несмотря на отмеченные выше недостатки, рецензируемая книга в целом является полезным пособием для работающих в данной области измерительной техники.

**Кандидат техн. наук С. А. ГЕНЗБУРГ**  
Москва



## А. И. ЛУРЬЕ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В СЕТЯХ СИЛЬНОГО ТОКА.

384 стр., ц. 24 руб. 30 коп. Госэнергоиздат, 1948.

Советские специалисты—работники высших учебных заведений, научно-исследовательских институтов и энергетических систем—сделали большой вклад в технику измерений в электрических сетях, предложив ряд оригинальных методов измерений и разработав для них аппаратуру. В наших энергетических системах очень хорошо поставлено дело профилактических и иных испытаний сетевых устройств. Тем более досадным являлось отсутствие в нашей литературе достаточно полного руководства по электрическим измерениям в сетях сильного тока.

Рецензируемая книга призвана заполнить этот пробел. Она написана на основе опыта лабораторий электрических сетей Ленинградского политехнического института и Ленэнерго и содержит систематизированное изложение методов измерения сопротивлений, испытания изоляции сетей высокого и низкого напряжения, способов нахождения места повреждения в кабельных сетях, испытания заземляющих устройств, а также и способов контроля за блуждающими токами. Даны описания применяемых для этих целей приборов.



Раздел книги, посвященный испытанию изоляции высоковольтных элементов сети, написан доктором техн. наук, проф. М. М. Михайловым — автором выпущенного в 1932 г. первого на русском языке краткого курса сетевых и кабельных измерений.

Разбираемый труд представляет собой ценное руководство не только для студентов, но и для инженеров и техников, и будет несомненно способствовать еще более широкому распространению высокой культуры сетевых измерений.

Автором проделана очень большая работа, в результате которой в книге впервые дается систематическое и подробное изложение основного комплекса электрических измерений в сетях сильного тока. Аналогичных пособий нет и в иностранной литературе. Книга написана с большим знанием дела. Автору удалось ясно и детально и всесторонне осветить все разбираемые вопросы. В ряде случаев приведены конкретные числовые примеры, еще более облегчающие усвоение материала.

Хорошо продуманы и выполнены рисунки; они вышли четкими, несмотря на то, что книга напечатана на бумаге не особенно высокого качества. Особое внимание в изложении уделено описанию типов приборов, разработанных советскими инженерами и выпускаемых нашими заводами. Весьма тщательно автор отнесся к терминологии и буквенным обозначениям. Автор проявил также полезную инициативу, предложив в ряде случаев назвать тот или иной метод сетевых измерений по существу его, взамен применявшихся до сего времени названий по имени того, кем данный метод был предложен. Так, например, способ, именовавшийся до сего времени способом Пику и Фриша, он называет «способом измерения сопротивления изоляции при помощи вольтметра»; способ Фрелиха назван «измерение сопротивления изоляции при помощи вольтметра и шунта»; способ Лартинга, Русселя и Крофта получил название «измерение сопротивления изоляции при помощи вольтметра и амперметра» и т. п. Названия, предлагаемые А. И. Лурье, надо считать удачными. Они получались несколько более длинными, но зато достаточно ясно выражают сущность обозначаемого ими метода измерения.

Книга заканчивается перечнем литературы к отдельным главам. В приложении помещена инструкция по профилактическим испытаниям изоляции электрооборудования сетей, подстанций и станций, разработанная А. В. Калантаровым и А. П. Щегловым в 1946 г. и применяе-

мая в Ленэнерго. Эта инструкция может быть полезной персоналу электрических установок, не подведомственных Министерству электростанций, так как этот персонал далеко не всегда бывает должным образом проинструктированным.

При всех крупных достоинствах рецензируемого труда, необходимо указать и на имеющиеся в нем недостатки. Так, в первой главе чрезмерно подробно рассмотрена теория моста Уитстона, особенно вопросы, связанные с его чувствительностью. В § 9 нет описания новейших мегомметров, выпускаемых с 1946 г. заводом «Энергоприбор».

Во второй главе слишком детально разобран вопрос об измерении изоляции низковольтных сетей, находящихся под напряжением (§ 12). В настоящее время изложенные методы измерения применяются относительно редко. Нет схем и описания устройств для непрерывного контроля за состоянием изоляции сетей. На стр. 72 дана ссылка на Правила 1939 г., в то время как имеются аналогичные Правила 1947 г.

В третьей главе менее подробно, чем другие методы, освещен индукционный метод нахождения места повреждения в подземных кабелях, который все шире и шире внедряется в практику. Слишком подробно описаны (§ 19) кабельные ящики, в настоящее время у нас не изготавливаемые.

В четвертой главе описания выпускаемых с 1946 — 1947 гг. испытателей заземления типа МС-7 завода «Энергоприбор» и типа ИЗ-4 Центральной электротехнической лаборатории Мосэнерго.

Имеются ссылки на устаревшие Правила и нормы. Есть невыправленные печатки.

Необходимо указать на то, что отсутствие описания некоторых новейших приборов и ссылки на устаревшие Правила и нормы связаны с тем, что, как указано в предисловии, книга была подготовлена к печати еще до войны. В 1941 г. она была набрана и даже сверстана. Однако, обстоятельства военного времени не позволили тогда выпустить книгу в свет.

Перечисленные недостатки книги не должны оказать существенного влияния на оценку книги и могут быть легко устранены при ее переиздании, которого она, несомненно, заслуживает.

**Проф. В. П. ХАЩИНСКИЙ**  
Ленинград



### **Б. Л. АЙЗЕНБЕРГ. ЗАМКНУТАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ БЕЗ СЕТЕВЫХ АВТОМАТОВ.** 132 стр., ц. 6 руб. 25 коп. Госэнергоиздат, 1948.

В последние годы наблюдается большой интерес к модернизации схем электрических сетей в направлении повышения надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей. Так, например, Ленинградская кабельная сеть широко применяет схему полужамкнутой сети низкого напряжения. Московская кабельная сеть разработала схему автоматического подключения резервных линий среднего напряжения. В то же время многие организации, проектирующие новые и восстанавливаемые городские электрические сети, продолжают проектировать «по-старинке», применяя радиальную схему сети низкого напряжения и петлевую схему сети среднего напряжения.

Это положение объясняется в значительной степени недостаточным знакомством проектировщиков с возможностями и технико-экономическими характеристиками более совершенных — замкнутых — электрических сетей. Такая картина подтвердилась на Всесоюзной сессии по городским электрическим сетям, созванной ВНИТОЭ в мае прошлого года в Ленинграде. Рецензируемая книга представляет ценность прежде всего потому, что она ясно и систематически излагает принципы построения современной замкнутой сети с защитой предохранителями и показывает реальные возможности применения такой сети в наших условиях как для больших и малых городов, так

и для отдельных районов, имеющих всего несколько трансформаторных пунктов.

Идея создания замкнутой сети с защитой предохранителями была выдвинута Б. Л. Айзенбергом еще в 1937 г. После этого им были разработаны система селективно работающих плавких предохранителей и теоретические основы построения замкнутой сети с предохранителями. Ленинградскими организациями (Ленпроект, Ленинградская кабельная сеть, Севзапэлектромонтаж) был выполнен ряд проектов замкнутой сети и проведены испытания опытного участка. Рецензируемая книга подводит итоги этих работ и намечает пути дальнейшего развития вопроса и, таким образом, имеет практический интерес.

Книга включает следующие разделы:

1. Выбор схемы городской сети низкого напряжения.
2. Замкнутая сеть без сетевых автоматов обратной мощности.
3. Защита замкнутой сети плавкими предохранителями.
4. Проектирование сети.
5. Примеры проектирования, взятые из ленинградской практики.
6. Экономические показатели замкнутой сети.
7. Соображения о применении замкнутой схемы в сетях промышленных потребителей.

### 8. Особенности эксплуатации замкнутой сети.

В первом разделе даются общие сведения и описываются различные варианты выполнения сети низкого напряжения, возможные к применению в городских сетях.

Второй раздел посвящен изложению принципов построения замкнутой сети без сетевых автоматов и техническому сопоставлению ее с другими схемами. Этот раздел представляет интерес как для лиц, не знакомых с замкнутыми сетями, так и для инженеров, ведущих практическую работу в этой области. Нельзя, однако, согласиться с автором, подчеркивающим лучшую селективность схемы «четырёхугольника» по сравнению с «треугольником» (стр. 39) и не отмечающим необходимости иметь в первом случае 4 линии в сети среднего напряжения. Точно также нельзя безоговорочно утверждать, что при наличии замкнутой сети низкого напряжения можно отказаться от защиты трансформатора со стороны среднего напряжения (стр. 37), так как, например, в условиях летнего режима, когда часть трансформаторов может быть выключена, авария с одним из действующих трансформаторов может привести к отключению значительного числа потребителей.

В третьем разделе даны краткие основы теории работы плавких предохранителей и изложены принципы устройства селективной системы плавких вставок, предложенной автором. Следует отметить, что несмотря на несомненные достоинства этих предохранителей, подтвержденные на практике их применения в ленинградской кабельной сети, они не нашли еще широкого применения в других городах. Можно надеяться, что выход данной книги даст толчок и в этом направлении.

Общим вопросам и примерам проектирования посвящены два раздела—пятый и шестой. Автор приводит новую формулу для выбора оптимальной мощности трансформаторов для замкнутой сети, когда сечение кабелей определяется не потерей напряжения, а плотностью тока в аварийном режиме (выход из строя одного из трансформаторов). Однако, нельзя согласиться с автором, что эта формула пригодна для всех случаев замкнутой сети при напряжении 380/220 в. При малых плотностях нагрузки и большой протяженности сети при малоэтажной застройке опыт проектирования показал, что выбор сечений кабелей по аварийному току дает заниженные сечения, и их приходится повышать по расчету на потерю напряжения при нормальном режиме. Поэтому предлагаемая формула пригодна в основном для районов многоэтажного строительства, а в остальных случаях целесообразно пользоваться формулой, ранее предложенной автором для случаев расчета сети на потерю напряжения.

Экономические показатели замкнутой сети приводятся в шестом разделе. Они представляют известный интерес, но не дают полного технико-экономического анализа замкнутой сети по сравнению с полумамкну-

той или радиальной, так как данные для последних типов сетей не приводятся. Было бы весьма желательно привести подробные технико-экономические сопоставления различных схем сетей для одних и тех же объектов. Такое сопоставление, например, для города на 40 000 жителей, проект электроснабжения которого описан в книге, было недавно выполнено Ленпроектом. Сравнивался вариант замкнутой схемы с вариантом радиальной схемы со стороны низкого напряжения при петлевом построении сети среднего напряжения. Оказалось, что первый вариант требует перерасхода кабеля по длине на 4%, но дает экономию по весу меди на 38%. Несколько меньшая разница была получена при аналогичных сравнениях для некоторых жилищных массивов. Однако, во всех случаях было показано, что применение замкнутой сети не приводит к перерасходу средств и меди.

Отсутствие в книге таких сопоставлений не позволяет рассеять у читателя сомнение в экономичности замкнутой сети.

Приведенные показатели вариантов замкнутой и радиальной сети промышленного предприятия (раздел седьмой) дают более полную картину, но выводы, сделанные автором в отношении сетей промышленных предприятий, нуждаются еще в дальнейшей проработке, так как опыт проектирования таких сетей пока недостаточен.

Точно также последний, восьмой раздел книги, посвященный эксплуатации замкнутых сетей, дает лишь предварительный материал, так как в эксплуатации пока имеется только один участок замкнутой сети. В 1949—1950 гг., когда войдет в строй еще несколько районов замкнутой сети,—на основе опыта их эксплуатации можно будет более подробно сформулировать эксплуатационные требования.

Книга Б. Л. Айзенберга, являясь результатом многолетней работы автора по замкнутым сетям, подтверждает передовой характер советской техники и в этой области: по простоте и надежности предложенное автором решение превосходит ранее выдвигавшиеся в иностранной литературе схемы. Б. Л. Айзенберг не только изложил теорию построения замкнутых сетей без сетевых автоматов, но и показал реальную возможность выполнения таких сетей в условиях сегодняшнего дня как для больших, так и для малых городов. Надо надеяться, что выход книги послужит толчком для проектных организаций для внедрения замкнутой сети при восстановлении и реконструкции сетей в городах Советского Союза. Было бы весьма желательно, чтобы с той же целью в периодической литературе получил более подробное освещение опыт последних проектных и монтажных работ по выполнению замкнутых сетей.

**Кандидат техн. наук Н. В. ВОЛОЦКОЙ**  
Начальник электротехнического отдела треста  
«Ленпроект»

### ОТ РЕДАКЦИИ

*В книге кандидата техн. наук Б. Л. Айзенберга выбор сечения кабелей предлагается вести по условиям допускаемого нагрева при аварийном режиме. Инж. Н. В. Волоцкой указывает на необходимость в ряде случаев производить выбор сечения кабелей по потере напряжения. Редакция считает, что основным критерием для выбора сечения кабелей является экономическая плотность тока.*

*Выбор по другим параметрам должен производиться только в тех случаях, когда сечение кабеля, найденное по экономической плотности тока, не удовлетворяет по условиям нагрева или допускаемым потерям напряжения. Доказательство того, что кабели, выбранные по экономической плотности тока, не удовлетворяют другим расчетным параметрам, в книге Б. Л. Айзенберга не приведено, и потому рекомендуемая им формула для выбора мощности трансформаторов требует дополнительной проверки.*





# Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(Издация 1949 г.)

**АДАМСКИЙ В. К., КЕРШАКОВ А. В. ПРИЕМНЫЕ ЛЮБИТЕЛЬСКИЕ АНТЕННЫ.** (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 16). 50 стр., ц. 1 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

\* **АТАБЕКОВ Г. И. РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ.** 424 стр., ц. 20 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.  
**ГИНЗБУРГ В. Л. ТЕОРИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В ИОНОСФЕРЕ.** 358 стр., ц. 14 руб. 65 коп. Гостехиздат.

Эта монография посвящена теоретическому рассмотрению проблемы влияния верхних ионизированных слоев атмосферы на распространение радиоволн. Не углубляясь в вопросы физики самой ионосферы, не разбирая по существу практические вопросы радиосвязи, обходя сложные математические методы, автор раскрывает перед студентами и аспирантами физических и радиотехнических факультетов, для которых данная работа, в основном, предназначена, важнейшие и принципиальные стороны теории распространения радиоволн в ионосфере. Книга содержит сведения: об атмосфере, ионосфере, о свойствах ионизированного газа, о люксембург-горьковском эффекте, о молекулярном поглощении и рефракции радиоволн в атмосфере, о распространении волн в неоднородной изотропной среде, об отражении радиоволн от ионосферных слоев, о влиянии земного магнитного поля, о радиоизлучении Солнца и Галактики. Автор книги — известный советский физик, научный работник физического института им. Лебедева Академии наук СССР.

**ДАХНОВ В. Н. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КАРТОТАЖНЫХ ДИАГРАММ.** Допущено в качестве учебного пособия для нефтяных вузов. 391 стр., ц. 15 руб. Гостоптехиздат (1948).

В книге проф. В. Н. Дахнова изложена методика интерпретации данных электрических, магнитных и тепловых методов исследования скважин, которые проводятся с целью бесквернового изучения геологического разреза скважин, выявления полезных ископаемых и т. п. Приведены основные положения по теории геофизических методов исследования горных пород (распределение электрического поля постоянного тока в трехмерном пространстве и др.). Основным направлением книги является изучение глубоких нефтяных, газовых и угольных скважин. Приводится большое число примеров, иллюстрирующих способы обработки картотажных диаграмм.

**ДРОЗДОВ К. И. РАДИОЛАМПЫ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА.** Краткие справочные сведения по электровакуумным приборам широкого применения. (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 14). 26 стр., ц. 75 коп. Госэнергоиздат.

\* **КЕСЕЛЬРИНГ Ф. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ.** Перевод под редакцией А. М. Мелькумова. 152 стр., ц. 6 руб. Госэнергоиздат.

**КОПТЕВ И. В., КУРБАТОВ Н. Д., КУЛШОВ В. Н. ЛИНЕЙНО-КАБЕЛЬНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ СВЯЗИ.** Допущено в качестве учебника для техникумов связи. 399 стр., ц. 11 руб. 50 коп. Связьиздат.

**ЛАБУТИН В. К. НАГЛЯДНЫЕ ПОСОБИЯ ПО РАДИОТЕХНИКЕ.** (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 25). 24 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

**МАЛИНИН Р. М. САМОДЕЛЬНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА.** (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 20). 50 стр., ц. 1 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

**ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИИ.** Конспект лекций. (Всесоюзный заочный энергетический институт). Ч. I, 144 стр., бесплатно. Изд-во «Советское радио».

**ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.** (Министерство электростанций СССР). Распределительные устройства и подстанции. Проводки цепей управления и измерения. Статические конденсаторы. Аккумуляторные батареи. Электромашинные залы. Электродвигатели и относящиеся к ним аппараты. 72 стр., ц. 4 руб. Госэнергоиздат.

\* **РЫКИН А. А. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КРАНЫ.** 360 стр. вкл. экз., ц. 19 руб. 65 коп. Госэнергоиздат.

**СПИЖЕВСКИЙ И. И. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ БАТАРЕИ И АККУМУЛЯТОРЫ.** (Массовая радиобиблиотека под общей редакцией А. И. Берга. Выпуск 17). 72 стр., ц. 2 руб. 25 коп. Госэнергоиздат.

\* **ТЯГУНОВ Г. А. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ.** Допущено в качестве учебника для техникумов. 340 стр., ц. 11 руб. 50 коп. Госэнергоиздат.

**ФЛОРИНСКАЯ О. Н. ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ ЯБЛОЧКОВ.** Библиографический указатель. Под редакцией В. В. Данилевского. 172 стр., ц. 15 руб. Государственная публичная библиотека.

Книга представляет собой первый выпуск издаваемой Ленинградской Государственной публичной библиотекой им. Салтыкова-

Шедрина серии библиографических указателей, посвященных выдающимся русским деятелям в области техники и технических наук (в дальнейшем в первую очередь намечается выпуск указателей, посвященных Н. Г. Славяннову, Н. Н. Бенардосу и К. Д. Чернову). Книга содержит аннотированные библиографические данные о печатных работах самого П. Н. Яблочкова и русских и иностранных работ о П. Н. Яблочкове и его изобретениях — всего 827 работ, не считая патентов П. Н. Яблочкова, а также предметный и алфавитный указатель и составленный проф. В. В. Данилевским библиографический очерк «Памяти Павла Николаевича Яблочкова». Книга отпечатана на хорошей бумаге и снабжена удачно подобранными иллюстрациями. Издание рецензируемого указателя и всей серии — весьма ценное начинание. Следует согласиться со словами редактора книги в предисловии к ней «Подобные указатели — одно из важных средств для той борьбы, которую мы ведем против заблуждений и низкопоклонства перед иностранщиной. Печатные источники, представляющие произведения непосредственно самих русских техников — новаторов, а также их привилегии, статьи и известия об их творчестве, помогут исследователям устанавливать права на первенство СССР в важных открытиях и изобретениях... Одновременно на деле развиваются все еще распространенное неверное представление о том, что якобы литература по вопросам истории техники крайне ограничена».

**ЮМ-РОЗЕРИ В. ЭЛЕКТРОНЫ И МЕТАЛЛЫ.** Перевод Б. Я. Любова под редакцией Б. Н. Финкельштейна. 364 стр., ц. 20 руб. Металлургиздат.

В книге в диалогической форме популярно изложены основы современной теории атома применительно к изучению природы металлов и сплавов. В сорока четырех беседах, происходящих между молодым учеником, получившим современное высшее физическое образование, и пожилым металлургом-практиком, окончившим высшую техническую школу еще в 20-х годах текущего столетия, автор в доступной форме осветил основные понятия современной электронной теории металлов и выводы из последней, используемые в учении о сплавах. Беседы разбиты на четыре части: природа атомов; природа металлов; природа сплавов; атомное ядро. Первая часть, в которой объясняется природа атомов, и особенно 7-я беседа, названная автором «Соотношения неточностей», раскрывает идеалистическую трактовку автором принципиальных вопросов квантовой теории в духе кантаианских вывертов буржуазного физика Гейзенберга. Эти недостатки книги остались и в русском переводе, о чем, впрочем, предупреждает читателей в предисловии редактор перевода. Следует отметить малочисленность ссылок редактора на работы в области металловедения отечественных ученых: примечания к тексту бесед случайны и редки. Можно сожалеть о том, что переводу книги Юм-Розери издательство не предпослало достаточно обстоятельное введение, в котором получили бы необходимое отражение исследования в этой области таких выдающихся отечественных ученых, как А. А. Байков, Н. С. Курнаков, И. П. Бардин, А. Ф. Иоффе, С. Т. Конобеевский, Г. В. Курдюмов и другие.

**ЧЕРВОНЕНКИС Я. М. ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ.** 138 стр., ц. 6 руб. Изд-во Академии наук СССР (1948).

Книга дает популярное всестороннее освещение современного состояния проблемы передачи электрической энергии на дальние расстояния постоянным (выпрямленным) током. Изложение ведется с весьма ограниченным использованием математического аппарата. Книга доступна широкому кругу читателей, но систематический и широкий охват проблемы и высококвалифицированная ее трактовка вызывает к ней большой интерес также лиц, работающих в данной области. Во вводной главе дан краткий исторический очерк развития систем электропередачи; отмечена выдающаяся роль русских и советских ученых в развитии техники высоковольтных линий электропередачи. Указаны факторы, которые исключают возможность сверхдальних передач больших мощностей трехфазным током. Рассмотрены явления устойчивости и понятие о натуральной мощности. Описаны основные схемные решения магистральных передач выпрямленным током. Изложены физические процессы в высоковольтных ртутных и дуговых выпрямителях. Описаны многофазные каскадные схемы выпрямления, главным образом, перспективные мостовые с последовательно соединенным вентилем в плече и каскадно-мостовые схемы. Затронут вопрос о мешающем влиянии на линии связи. Дано изложение теории инвентирования, коммутации и принципов регулирования преобразователей. Описаны измерительные устройства в сетях постоянного тока с использованием магнитных усилителей. Дано сравнение воздушных и кабельных линий. Изложена современная теория короны постоянного тока. Проведено сопоставление технико-экономических особенностей электропередач постоянного и переменного тока и разграничены их области применения. В заключительной главе рассмотрены перспективы использования систем постоянного тока в СССР с его колоссальными гидроэнергетическими ресурсами.

---

## **Дополнение к Правилам для авторов журнала „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“**

В дополнение к Правилам для авторов журнала „Электричество“, опубликованным в № 4, 1949 г., редакция журнала просит авторов вместе со статьей, направляемой в журнал, сообщать следующие сведения:

1. Является ли статья законченной работой автора или же она представляет часть выполненной им или при его участии научно-исследовательской работы (указать тему последней).
  2. Какое практическое значение имеет статья и в какой области получили или могут получить применение выводы, изложенные в статье.
  3. Обсуждались ли где-либо статья или содержащиеся в ней материалы и какая оценка была дана.
-