

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

4

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

4
1953

АПРЕЛЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
И ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

СОДЕРЖАНИЕ

<i>За дальнейший мощный подъем сельской электрификации</i>	3
М. М. Белоусов —Расчет сталеалюминиевых проводов по их действительным характеристикам	7
В. Н. Кулешов и В. В. Соколов —Комплексная проводимость линий электросвязи и электропередачи	14
Н. К. Архипов —Расчет низковольтных сетей по отклонениям напряжения	17
К. Б. Карандеев и Б. И. Швецкий —К вопросу об уравнивании мостов переменного тока	23
А. А. Булгаков —К расчету переходных процессов в цепях с управляемыми выпрямителями	29
М. М. Четверикова —Автоколебания в высоковольтном вентиле	35
О. П. Ситников —Работа дугогасящих устройств с газовым автодутьем	38
Е. М. Цейров —О коэффициенте рекомбинации электронов	42
К. Н. Борисов —Применение дросселей насыщения в схемах регулирования электрических печей	44
М. Г. Чиликин и А. М. Корытин —Механические характеристики электрогидроприводов	47
М. З. Жиц —Исследование процесса самовозбуждения тяговых двигателей последовательного возбуждения при реостатном торможении	55
Э. В. Зелях —К теории симметричной многофазной системы	61
О. М. Богатырев —Элементарная методика расчета линейных электрических цепей	66
Г. С. Векслер —К осциллографическому методу измерения магнитных свойств ферромагнетика	72

ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

В. А. Спиридонов —Приближенные зависимости электропотребления шахтного электротранспорта	75
---	----

ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

В. А. Голубцова —Электрическая изоляция в работах П. Л. Шиллинга и Б. С. Якоби	80
---	----

ДИСКУССИИ

К статье А. А. Глазунова, А. А. Глазунова, Г. М. Розанова „Экономически целесообразное отношение сечений алюминия и стали в сталеалюминиевых проводах“ Н. Н. Крачковский, Р. А. Голубцов . Книга „Общая электротехника“ под редакцией С. А. Пресса. А. А. Межлумов . К определению ампера—четвертой основной единицы в абсолютной практической системе единиц М. Ф. Маликов, С. В. Горбацевич, А. А. Юматов, Ю. А. Бирзвалкс, К. М. Поливанов . К проекту правил устройства электротехнических установок. Проводки шинопроводами А. А. Юматов	84
--	----

ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ

Электроискровой способ восстановления деталей машин и упрочнения инструмента. Новое электрооборудование для автомобиля „Москвич“. Автومات для закатки корпусов автомобильных и тракторных фар. Разрядные напряжения больших промежутков при промышленной частоте и при импульсах. Ультразвуковые испытания керамических материалов. Индуктивное влияние линий электропередачи на железнодорожные линии связи. Положительный опыт применения сталеалюминиевого контактного провода.	90
--	----

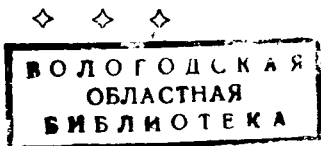
ХРОНИКА

Профессор Н. А. Карякин, В. К. Крапивин Совещание по электроавтомобилям.	94
--	----

БИБЛИОГРАФИЯ

Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96
--	----

Номограмма—Постоянная составляющая индукции $B_{\Sigma} = f(H_{\Sigma}; B_{\Sigma})$ кольцевого сердечника при одновременном намагничивании постоянным и переменным током частоты 400 гц. a —пермаллой 0,25 мм; b —сталь ЭЧА 0,35 мм (см. **И. Б. Негневицкий и др.** Кривые одновременного намагничивания постоянным и переменным полями. *Электричество*, № 3, стр. 63-64, 1953)



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

За дальнейший мощный подъем сельской электрификации

Благодаря заботам партии и правительства, заботам нашего вождя и учителя И. В. Сталина об укреплении колхозного строя наше сельское хозяйство в короткий срок залечило тяжелые раны, нанесенные ему войной и сильной засухой, имевшей место в 1946 г., и значительно превзошло довоенный уровень производства сельскохозяйственных продуктов. Посевные площади всех сельскохозяйственных культур в 1952 г. превысили довоенный уровень на 5,3 миллиона гектаров.

Зерновая проблема, считавшаяся наиболее острой и серьезной, решена окончательно и бесповоротно. Валовой урожай зерна в 1952 г. составил 8 млрд. пудов, а валовой урожай важнейшей продовольственной культуры — пшеницы — увеличился по сравнению с 1940 г. на 48 %.

В послевоенные годы имел место дальнейший быстрый рост посевных площадей технических, масличных и кормовых культур. В 1951 г. валовая продукция хлопка-сырца превысила довоенный уровень на 46 %, сахарной свеклы — на 31 %, а валовой урожай сочных кормов — на 25 %.

Наше современное земледелие стало качественно иным — более квалифицированным, более продуктивным, дающим все больше товарной продукции; оно коренным образом отличается от старого мало продуктивного, экстенсивного земледелия. В товарной продукции земледелия значительно вырос удельный вес технических культур, доля которых в настоящее время составляет 40 % общей стоимости товарной продукции полеводства.

Серьезные успехи достигнуты в области животноводства. Довоенная численность поголовья крупного рогатого скота была восстановлена еще в 1948 г., поголовья овец — в 1950 г., поголовья свиней — в 1952 г. Валовая и товарная продукция мяса, молока, масла, яиц, шерсти и кож в целом по СССР превзошла довоенный уровень.

Своими успехами сельское хозяйство обязано прежде всего колхозному строю, благодаря которому оно стало самым крупным в мире социалистическим сельским хозяйством, благодаря которому оно получило возможность применить достижения передовой агробиологической науки и современную технику. Без повседневной заботы партии и правительства о подведении под колхозы современной технической базы крупного производства, без оснащения их новой техникой было бы невозможно в столь короткие сроки решить задачу восстановления и дальнейшего развития сельского хозяйства.

В послевоенные годы машинно-тракторный парк нашего сельского хозяйства пополнился большим количеством новых, более совершенных гусеничных тракторов с дизельными двигателями, самоходными комбайнами, свеклокомбайнами, льнокомбайнами, хлопкоуборочными и другими высокопроизводительными машинами. Общая мощность тракторного парка в МТС и совхозах увеличилась по сравнению с довоенным уровнем на 59 % и комбайнов — на 51 %. Много новых машин получило сельское хозяйство для механизации трудоемких процессов в животноводстве. Значительно расширена сеть машинно-тракторных станций, организованы вновь лесозащитные, лугомелиоративные и машинно-животноводческие станции. Всего в послевоенные годы создано 1 546 машинно-тракторных, лесозащитных, лугомелиоративных и машинно-животноводческих станций.

Развитие механизации сельского хозяйства, оснащение его новой техникой в послевоенные годы имело одну очень важную особенность. Эта особенность состояла в резко возросшем применении в сельскохозяйственном производстве электрической энергии. За период с 1946 по 1951 г. количество колхозных электростанций и подстанций выросло более чем в 3 раза, а количество гидроэлектростанций — более чем в 4,5 раза. Общая мощность колхозных электростанций и подстанций за тот же период выросла в 4,25 раза. В четвертой пятилетке ежегодно вступало в строй от 3 до 4 тыс. колхозных электроустановок, а прирост их мощности за пятилетие составил около 1 млн. кВт.

В отличие от довоенного времени в послевоенные годы, особенно в последние годы четвертой пятилетки, было введено в действие значительное количество более крупных колхозных электростанций. В связи с этим средняя мощность колхозной электростанции за годы четвертой пятилетки выросла в 1,77 раза, а гидроэлектростанции — более чем в 2 раза. В настоящее время мы имеем такие колхозные гидроэлектростанции, как Кузьминская мощностью 1 тыс. кВт, Рассыпухинская — 2 тыс. кВт, Тирипони — гэс 3 тыс. кВт и др.

В послевоенные годы в ряде областей (Молотовской, Ленинградской и др.) начаты работы по объединению колхозных электростанций в сельские энергосистемы. Укрупнение колхозных электростанций и создание сельских энергосистем

должны сыграть большую роль в деле дальнейшего развития сельской электрификации, в деле повышения эффективности использования электричества в сельскохозяйственном производстве, повышения надежности электроснабжения и снижении себестоимости электроэнергии.

На основе роста числа колхозных электростанций и подстанций и их мощности в послевоенные годы значительно расширилось применение электроэнергии в сельскохозяйственном производстве. За период с 1946 по 1951 г. количество электродвигателей, работающих в сельском хозяйстве, увеличилось в 6,3 раза, а их мощность — в 4,3 раза. В настоящее время многие передовые колхозы, такие как колхоз «Красный Октябрь» в Кировской обл., колхоз им. Сталина в Ивановской обл., колхоз им. Ленина в Московской обл., колхоз «Заря» в Свердловской обл. и др., имеют по 20 и более электродвигателей и широко используют электроэнергию для молотыбы, очистки и сортировки зерна, полива огородов, водоснабжения животноводческих ферм, приготовления кормов, дойки коров, стрижки овец, в колхозных мастерских и предприятиях по первичной обработке сельскохозяйственной продукции.

О том, какое большое значение уже сейчас имеет применение электроэнергии для подъема общественного хозяйства колхозов, свидетельствуют следующие данные.

Помимо повышения общей культуры производства, облегчения труда, сокращения сроков производства, увеличения выхода продукции и других преимуществ, в среднем каждый использованный в колхозном производстве киловаттчас экономит 3,5 часа трудовых затрат, 1,1 коне-часа конной тяги, 0,18 кг жидкого топлива. В среднем по размерам колхозе зерно-животноводческого направления, насчитывающем 200 дворов, экономия затрат труда в результате электрификации перечисленных выше производственных процессов составит 14 тыс. чел.-дней, или около 20% всех затрат труда до электрификации, экономия конной тяги — 4,4 тыс. коне-дней, или 30% экономия горючего — 7,6 т.

В интересах коммунистического строительства в нашей стране, в интересах создания обилия продовольствия для народа и полного достатка сырья для быстро растущей легкой промышленности требуется дальнейший мощный подъем нашего социалистического сельского хозяйства. Поэтому в директивах XIX съезда партии по пятилетнему плану на 1951—1955 гг. сказано, что главной задачей в области сельского хозяйства впредь остаются повышение урожайности всех сельскохозяйственных культур, дальнейшее увеличение общественного поголовья скота при одновременном значительном росте его продуктивности, увеличение валовой и товарной продукции земледелия и животноводства путем дальнейшего укрепления и развития общественного хозяйства колхозов, улучшения работы совхозов и МТС на основе внедрения передовой техники и агрокультуры в сельское хозяйство.

В директивах XIX съезда партии предусматривается увеличение за пятилетие валового уро-

жая: зерна на 40—50%, в том числе пшеницы на 55—65%; хлопка-сырца на 55—65%; льноволокна на 40—50%; сахарной свеклы на 65—70%; подсолнечника на 50—60%; картофеля на 40—45% и рост производства кормовых культур примерно в 2—3 раза. Директивами предусматривается также увеличение за пятилетие поголовья крупного рогатого скота по всему сельскому хозяйству на 18—20%, а общественного поголовья в колхозах — на 36—38%; поголовья овец — всего на 60—62%, а в колхозах — на 75—80%; поголовья свиней — всего на 45—50%, а в колхозах — на 85—90%; поголовья лошадей — всего на 10—12%, а в колхозах — на 14—16%; поголовья домашней птицы в колхозах — в 3—3,5 раза. Производство мяса и сала в пятом пятилетии должно возрасти на 80—90%, молока — на 45—50%, шерсти — в 2—2,5 раза, яиц (в колхозах и совхозах) — в 6—7 раз.

Новый мощный подъем сельскохозяйственного производства невозможен без дальнейшего технического прогресса, без дальнейшего оснащения сельского хозяйства новой и новейшей техникой. «Мы все радуемся, — говорил товарищ Сталин, — колоссальному росту сельскохозяйственного производства нашей страны, росту зернового производства, производства хлопка, льна, свеклы и т. д. Где источник этого роста? Источник этого роста в современной технике, в многочисленных современных машинах, обслуживающих все эти отрасли производства. Дело тут не только в технике вообще, а в том, что техника не может стоять на одном месте, она должна все время совершенствоваться, что старая техника должна выводиться из строя и заменяться новой, а новая — новейшей. Без этого немыслим поступательный ход нашего социалистического земледелия, немыслимы ни большие урожаи, ни изобилие сельскохозяйственных продуктов».

Директивами XIX съезда партии предусматриваются завершение механизации основных полевых работ в колхозах и широкое развертывание механизации трудоемких работ по орошению засушливых земель, осушению заболоченных угодий, трудоемких работ в животноводстве и в других отраслях сельскохозяйственного производства, предусматривается завершение в основном комплексной механизации всех наиболее трудоемких работ в совхозах. Мощность тракторного парка в МТС будет увеличена в 1,5 раза, увеличится количество действующих в сельском хозяйстве автомобилей, стационарных двигателей и других механизмов. Сельское хозяйство получит большое количество новых, более совершенных сельскохозяйственных машин.

В соответствии с этой грандиозной программой механизации сельскохозяйственного производства XIX съезд партии постановил: «Считать одной из важнейших задач внедрение электротракторов и сельскохозяйственных машин, работающих на базе использования электроэнергии, особенно в районах крупных электростанций». Это решение съезда поднимает сельскую электрификацию на новую, более высокую ступень. Если до настоящего времени электроэнергия применя-

лась главным образом на стационарных сельскохозяйственных работах (молотья, очистка и сортировка зерна, водоснабжение и др.), то в текущем пятилетии электроэнергия должна найти применение на мобильных полевых работах (обработка почвы, уборка урожая и др.), являющихся наиболее трудоемкими и поглощающих около 40% всех затрат труда в колхозах.

Таким образом, в настоящее время речь идет о более широком применении электроэнергии в сельском хозяйстве, о комплексной электрификации сельскохозяйственного производства, открывающей новые возможности дальнейшего роста сельского хозяйства и улучшения условий труда и жизни многомиллионного колхозного крестьянства.

Большие возможности электрификации сельского хозяйства, внедрения электропахоты, применения электрокомбайнов и других сельскохозяйственных машин с электроприводом открываются в связи со строительством грандиозных гидроэлектростанций на Волге, Дону и Днепре. Только Куйбышевская и Сталинградская гидроэлектростанции будут ежегодно давать на нужды электрификации сельского хозяйства 3,5 млрд. кВтч.

Вместе с использованием энергии, которую сельское хозяйство будет получать от крупных государственных электростанций, должно быть еще шире развернуто строительство колхозных электростанций на базе местного топлива, энергии малых и средних рек, энергии ветра. В директивах XIX съезда партии говорится, что необходимо обеспечить направление капиталовложений колхозов, в первую очередь на развитие общественного хозяйства, в том числе на строительство колхозных электростанций.

В текущем пятилетии должен быть взят еще более решительный курс на укрупнение вновь строящихся колхозных электростанций, на создание сельских энергетических систем. Мелкие одиночные электростанции — для ряда районов уже пройденный этап в развитии сельской электрификации. На современном этапе, когда речь идет о широком применении электричества в сельскохозяйственном производстве, когда требуется расширить энергетическую базу сельского хозяйства и более эффективно использовать энергетические ресурсы, когда требуется более высокая надежность электроснабжения, мелкие одиночные электростанции уже не могут служить основной базой электрификации сельского хозяйства.

Успешное осуществление программы электрификации сельского хозяйства, вытекающей из решений XIX партсъезда, требует разрешения ряда неотложных технических проблем.

Вновь строящиеся колхозные электростанции и подстанции должны быть обеспечены в достаточном количестве совершенным, надежным и вместе с этим достаточно простым в обслуживании электрооборудованием. Сравнительно небольшие по мощности и выработке электроэнергии колхозные электростанции и созданные путем их объединения энергосистемы должны быть в ма-

ксимальной степени автоматизированы и телемеханизированы. Это даст возможность сократить до минимума численность обслуживающего персонала и повысить надежность их работы. Системы автоматики и телеуправления, применяемые на крупных государственных электростанциях, в крупных энергосистемах, не следует механически переносить на колхозные электростанции и сельские энергосистемы. Для последних потребуются системы не менее совершенные и надежные, но более простые в устройстве и обслуживании, а также достаточно дешевые. Огромное значение приобретают автоматизация и телемеханизация электрифицированных производственных процессов орошения (подъем воды, дренаж, полив и дождевание).

Широкая комплексная электрификация сельского хозяйства потребует создания густой электрической сети. Длина только сети высокого напряжения на территории орошаемых земель будет измеряться многими десятками тысяч километров, на каждый гектар этих земель в среднем будет приходиться 8—12 км сети высокого напряжения. В мировой практике такая густая сельскохозяйственная электросеть будет создана впервые. Это означает, что должны быть найдены новые, наиболее экономичные решения в отношении распределения электроэнергии.

Эксплуатация опытной партии электротракторов доказала эффективность широкого применения их на полевых и стационарных сельскохозяйственных работах. Внедрение электротракторов позволяет заменить дальнепривозное жидкое топливо местным или гидроэнергией, дает большую экономию рабочей силы, облегчает труд и делает его более квалифицированным, значительно улучшает качество полевых работ. Вместе с этим опытная эксплуатация показала ряд серьезных недостатков первой партии электротракторов, вскрыла ряд нерешенных проблем.

В процессе опытной эксплуатации выявилась острая необходимость в создании специального тракторного кабеля и в улучшении условий его работы, с тем чтобы в несколько раз увеличить срок службы кабеля. Кроме этого, требует исследования вопрос о применении для питания электротракторов однофазного или постоянного тока и троллейного провода, а также разборных полевых сетей облегченного типа.

Опытный электротрактор ЭТ-5 очень тяжел, его вес примерно на 30% больше веса теплового трактора. Необходимо разработать и осуществить меры по снижению веса электротрактора, с тем чтобы его вес вместе с весом кабеля не превышал веса теплового трактора. В связи с этим целесообразно изучить вопрос о повышении рабочего напряжения электротрактора.

Наряду с проведением работ по усовершенствованию первых опытных электротракторов необходимо ускорить создание новых типов электротракторов различного назначения и мощности, создание уборочных машин (электрокомбайнов), машин по обработке пропашных культур, сеноуборке и др. Должны быть коренным образом

усовершенствованы машины, применяемые на стационарных сельскохозяйственных работах и в животноводстве. На основе внедрения индивидуального и многомоторного электропривода в кратчайшее время должна быть создана целая система машин, позволяющая осуществить комплексную электрификацию производственных процессов сельского хозяйства.

Интересы успешного осуществления директив XIX съезда партии в части сельского хозяйства требуют, чтобы насущные технические проблемы сельской электрификации были решены в кратчайшие сроки. Однако следует признать, что темпы разработки этих проблем пока остаются неудовлетворительными. Это объясняется тем, что к делу электрификации сельского хозяйства еще не привлечены широкие круги наших ученых и инженеров-электриков; научные, проектные и другие учреждения системы Министерства сельского хозяйства и заготовок СССР пытаются решить эти проблемы только собственными силами.

Ученым и инженерам-электрикам, работающим в системе Министерства сельского хозяйства и заготовок СССР, надо понять, что только одних их усилий недостаточно для успешного и быстрого разрешения насущных технических проблем сельской электрификации, вытекающих из решений XIX съезда нашей партии; надо понять, что залог успеха лежит в привлечении в порядке содружества к этому важнейшему делу широких кругов наших электриков, их знаний, их опыта, в широком обсуждении принимаемых ре-

шений, в развертывании научной критики и внимательном отношении к ней.

В свою очередь научные работники энергетических и электротехнических научно-исследовательских институтов и лабораторий Академии наук СССР, Академий наук союзных республик, отраслевых электротехнических научно-исследовательских учреждений, электротехнических и энергетических вузов и факультетов должны прийти на помощь сельским электрификаторам в их сравнительно новом и важном деле. Этим они внесут свой большой вклад в осуществление исторических решений XIX съезда нашей партии.

К делу разработки насущных проблем сельской электрификации должны быть широко привлечены не только электротехники таких центров, как Москва и Ленинград, но и электротехники республиканских, областных и краевых центров Советского Союза. Это очень важно, если учесть большое разнообразие требований, которые предъявляют к электрификации различные районы, различные направления сельского хозяйства нашей необъятной Родины.

Не может быть никакого сомнения в том, что текущее пятилетие будет пятилетием нового, еще более мощного подъема сельской электрификации в нашей стране, подъема, который явится дальнейшим продвижением вперед по пути осуществления ленинской формулы «Коммунизм — это есть советская власть плюс электрификация всей страны», явится вкладом в осуществление заветов гениального продолжателя дела Ленина И. В. Сталина.



Расчет сталеалюминиевых проводов по их действительным характеристикам

Инж. М. М. БЕЛОУСОВ

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭС

Расчет сталеалюминиевых проводов, как и вообще расчет проводов линий электропередачи, принято вести без учета неупругих деформаций. „Правила устройства электротехнических установок“ рекомендуют принимать модуль упругости алюминия равным 6300 кг/мм^2 , модуль упругости стали —

20000 кг/мм^2 . На рис. 1 изображена механическая характеристика провода АС-120 при температуре -5° , вычисленная в соответствии с рекомендациями „Правил устройства“. Из этой характеристики видно, что расчетному напряжению в алюминии 8 кг/мм^2 соответствует напряжение в стали $21,0 \text{ кг/мм}^2$ и среднее напряжение по сечению провода $10,0 \text{ кг/мм}^2$. Последняя величина является исходной при расчете тяжений и стрел провеса провода в различных условиях.

Ряд исследований показал, что в действительности механическая характеристика сталеалюминиевого провода непрямолинейна и что распределение нагрузки между сталью и алюминием более благоприятно, чем это представлено на рис. 1. Первая значительная работа в области экспериментального изучения механических характеристик проводов, в частности проводов сталеалюминиевых, проведена в СССР Л. В. Торозяном в ЛЭФИ [Л. 1]. Результаты этой работы сводятся к следующему.

При растяжении витого провода имеет место явление вытяжки, состоящее в том, что отдельные проволоки взаимно перемещаются, причем скрутка провода уплотняется. За счет этого явления происходит неупругая деформация провода, в результате которой он получает некоторое остаточное удлинение. В сталеалюминиевом проводе явление вытяжки имеет место почти исключительно в алюминиевой части провода.

Далее, предел упругости алюминия лежит значительно ниже 8 кг/мм^2 ; при растяжении алюминиевого или сталеалюминиевого провода до напряжения, превышающего действительный предел упругости, также возникает остаточное удлинение. Растяжение сталеалюминиевого провода происходит не мгновенно; провод постепенно удлиняется вследствие текучести алюминия; этот

Приводятся результаты проведенных в ЦНИЭЛ МЭС опытов растяжения сталеалюминиевых проводов и отдельных алюминиевых и стальных проволок. Доказывается, что действительное поведение сталеалюминиевого провода при растяжении сильно отличается от принятых в настоящее время расчетных предположений. Предлагается механический расчет сталеалюминиевых проводов основывать не на характеристиках, вычисляемых на основании рекомендаций „Правил устройства“, а на действительных характеристиках. Дается метод расчета сталеалюминиевых проводов по их действительным характеристикам. Печатается в порядке обсуждения.

процесс заканчивается через несколько суток. Если разгрузить провод и затем снова нагрузить его, то повторное растяжение будет происходить с новым модулем упругости, более высоким, чем первоначальный. Исследования иностранных авторов дают аналогичные результаты [Л. 2 и 3].

В ЦНИЭЛ МЭС были произведены опыты растяжения сталеалюминиевых проводов и отдельных алюминиевых и стальных проволок.

На рис. 2 показаны типичные механические характеристики алюминиевой проволоки. Предел упругости алюминия равен $5,5 \dots 6 \text{ кг/мм}^2$; полное относительное удлинение при напряжении 8 кг/мм^2 составляет $(1,8 \dots 2) \cdot 10^{-3}$. Модуль упругости в начальной части характеристики в среднем равен 5000 кг/мм^2 . Необходимо заметить,

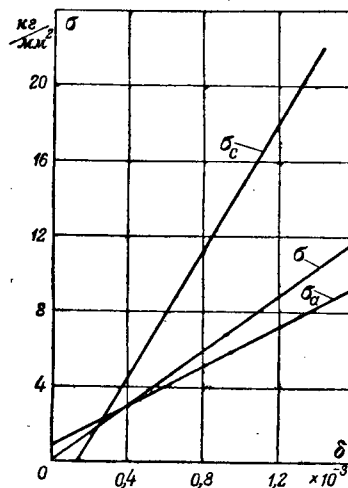


Рис. 1. Механическая характеристика провода АС-120 при $t = -5^\circ$.

что приведенные на рис. 2 величины удлинений алюминия получены в результате длительного воздействия растягивающих усилий. При напряжениях выше предела упругости процесс удлинения продолжался 2...4 суток, при напряжениях же ниже 5 кг/мм^2 этот процесс заканчи-

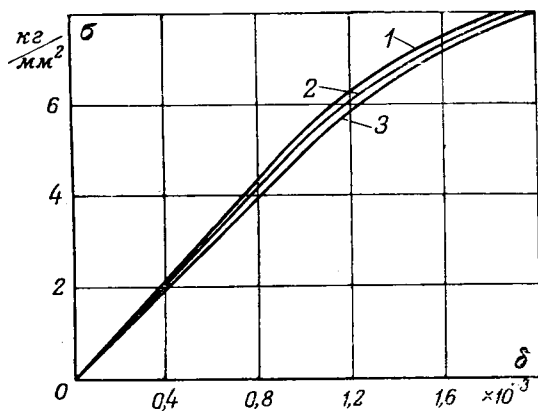


Рис. 2. Механические характеристики алюминиевой проволоки.

1— $d=2,31$ мм; 2— $d=2,35$ мм; 3— $d=3,35$ мм.

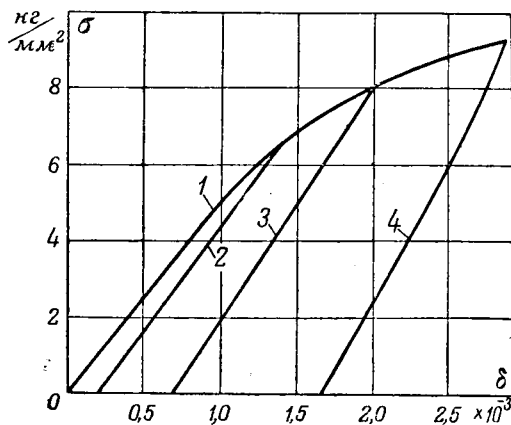


Рис. 4. Механическая характеристика алюминиевой проволоки при трехкратном растяжении.

1— $E=5\,000$ кг/мм²; 2— $E=5\,300$ кг/мм²; 3— $E=5\,900$ кг/мм²; 4— $E=6\,900$ кг/мм².

вался через 5...10 мин. На рис. 3 показан процесс удлинения образца алюминиевой проволоки при увеличении напряжения в алюминии с 6 до 8 кг/мм².

При разгрузке алюминиевой проволоки сокращение ее длины происходит с новым модулем упругости, значительно более высоким, чем начальный. При повторном растяжении длина проволоки изменяется по закону упругого удлинения с модулем упругости, который имел место при предшествующей разгрузке проволоки. Этот модуль мы будем называть установившимся модулем упругости.

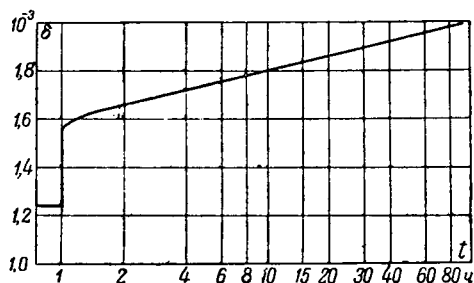


Рис. 3. Процесс удлинения образца алюминиевой проволоки при увеличении напряжения в алюминии от 6 до 8 кг/мм².

После того как напряжение снова достигнет наибольшей величины, имевшей место при первом растяжении, длина проволоки при дальнейшем повышении напряжения будет изменяться по пологой кривой, являющейся продолжением характеристики, полученной при первом растяжении. Если при некотором новом значении напряжения снова разгрузить проволоку, то повторится тот же процесс, что и при первой разгрузке, но уже с другим, несколько более высоким установившимся модулем упругости. На рис. 4 показана характеристика алюминиевой проволоки при трехкратном растяжении до все более высоких напряжений.

Таким образом, при растяжении за пределом упругости металл не только получает остаточное удлинение, но и приобретает новые устойчивые

свойства: более высокий модуль упругости и более высокий предел упругости.

Опыты растяжения сталеалюминиевых проводов производились на горизонтальном стенде. Образцы длиной 60 м растягивались при температуре от 1 до -5° с помощью червячного винта, а тяжелые провода—с помощью гидравлического устройства. Удлинения измерялись штангенциркулем. Нагрузка поднималась относительно быстро: на снятие каждой точки характеристики уходило 5...10 мин. Тяжение в алюминиевой части провода определялось как разность между тяжением провода в целом и тяжением стального сердечника. Последнее определялось по предварительно снятой диаграмме растяжения стального сердечника, взятого из того же провода. При этом вводилась поправка на внутренние напряжения, возникающие вследствие различия коэффициентов линейного расширения стали и алюминия.

Когда напряжение в алюминии достигало 8 кг/мм², провод оставлялся при достигнутой величине тяжения на сутки. Вследствие явления текучести алюминия удлинение провода продолжалось; при этом нагрузка стали возрастала, а нагрузка алюминия снижалась. Через сутки нагрузка увеличивалась и напряжение в алюминии снова доводилось до 8 кг/мм², после чего провод оставлялся в покое. Таким образом, нагрузка повышалась несколько раз до тех пор, пока процесс удлинения не заканчивался, что имело место через 5...7 суток от начала опыта. Затем провод разгружался.

На диаграмме рис. 5 сплошной жирной линией показана характеристика провода АС-120. Ступенчатый участок этой характеристики заменен прямой cd . Пологий участок oa кривой обусловлен явлением вытяжки провода; участок $oabc$ представляет собой характеристику растяжения провода в монтажных условиях, т. е. в условиях относительно быстрого растяжения, при котором провод не успевает достигнуть окончательного удлинения, соответствующего приложенному тяжению. Точка b соответствует кажущемуся пре-

делу упругости, получаемому при быстром растяжении; действительный предел упругости провода лежит несколько ниже (точка *g*).

Обратная ветвь характеристики *def* получена при разгрузке провода. Установившийся модуль упругости на участке *de* значительно выше начального модуля упругости (участок *ab*). На участке *ef* нагрузка алюминия практически равна нулю; все тяжение провода ложится на стальной сердечник. Это явление объясняется тем, что, как видно на диаграмме, остаточное удлинение алюминиевой части провода намного больше остаточного удлинения стали, которое при напряжениях в стали до $45...50 \text{ кг/мм}^2$ весьма мало. При повторном растяжении провод работает по характеристике *fed*.

Сплошная тонкая линия *gd* является предельной характеристикой первого растяжения провода. Она получается в том случае, если при каждой величине тяжения провод выдерживается длительно, до окончания процесса удлинения.

Пунктиром на рис. 5 показана упрощенная характеристика, удобная для пользования при практических расчетах (линия *obcdeh*). На участке *ob* она мало отклоняется от действительной характеристики, а на участке *eh*, сильно отклоняющемся от последней, провода линии электропередачи не работают.

На рис. 5 даны также диаграммы напряжений в стали и в алюминии.

Сравнивая между собой диаграммы рис. 1 и 5, мы видим, что действительное поведение сталеалюминиевого провода при растяжении сильно отличается от принятых в настоящее время расчетных предположений. Расчеты стрел провеса провода по характеристикам рис. 1 могут дать значительные ошибки, в особенности для 1-го района климатических условий. Следовательно, расчет проводов следует основывать не на характеристиках рис. 1, а на действительных механических характеристиках проводов.

Мы видели выше, что проволока, однажды растянутая до напряжения, превышающего предел упругости ее материала, при последующих растяжениях уже не возвращается в первоначальное состояние. То же самое можно сказать и о витом проводе. Его характеристика при повторных растяжениях в общем аналогична характеристике рис. 4. Кроме того, витой провод вследствие явления вытяжки не возвращается в первоначальное состояние даже в том случае, если напряжение в его материалах и не достигло предела упругости.

Уже при монтаже витой провод, вытягиваясь, получает некоторое остаточное удлинение и несколько более высокий модуль упругости, чем до монтажа. Поэтому находящийся в эксплуатации провод в каждый момент времени работает не по начальной монтажной характеристике и не по предельной характеристике первого растяжения (рис. 5), а по одной из бесчисленных обратных ветвей характеристики, аналогичной приведенной на рис. 4. Следовательно, рассчитать мгновенные значения тяжения и стрелы провеса

провода, находящегося в эксплуатации, можно только при условии, если известно наибольшее тяжение, которому провод подвергался ранее.

Однако, если это наибольшее тяжение не превышало расчетного допускаемого, то обратная ветвь характеристики, на которой фактически работает провод, будет лежать всегда выше линии *def* (рис. 5) или совпадать с ней. Точки, соответствующие возможным состояниям провода, будут лежать в пределах площади *oabcdefo*.

Чтобы гарантировать соблюдение минимального вертикального расстояния от провода до поверхности земли при установленных нормах расчетных условиях, достаточно рассчитать тяжение и стрелу провеса по прямолинейной характеристике *dh* (рис. 5).

Механическая характеристика комбинированного провода зависит от температуры, так как на напряжения от тяжения провода накладываются внутренние напряжения, возникающие вследствие неравенства коэффициентов линейного расширения стали и алюминия. На рис. 6 изображены упрощенные механические характеристики провода АС-120, вычисленные для температур $+40$, -5 и -40° при условии, что максимальное напряжение во всех случаях равно $12,5 \text{ кг/мм}^2$.

Несовпадение обратных ветвей характеристик вызовет затруднения при расчете тяжений и стрел провеса. Однако этого несовпадения можно избежать путем надлежащего выбора исходных расчетных величин. Если принять, например, в соответствии с „Правилами устройства“, что в трех рассматриваемых случаях провод растягивается не до $\sigma = 12,5 \text{ кг/мм}^2$, а до $\sigma_a = 8 \text{ кг/мм}^2$, т. е. до наибольшего допускаемого напряжения в алюминии, то обратные ветви всех характеристик, построенных для различных температур, сольются в одну прямую линию.

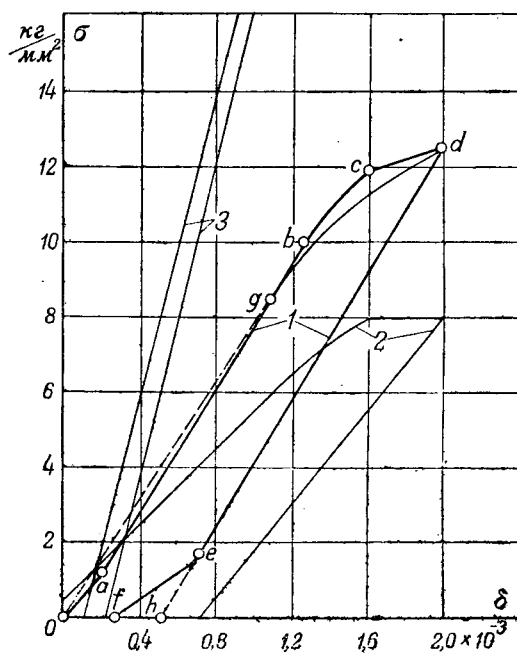


Рис. 5.

1 — механическая характеристика провода АС-120; 2 — диаграмма напряжений в алюминии; 3 — диаграмма напряжений в стали.

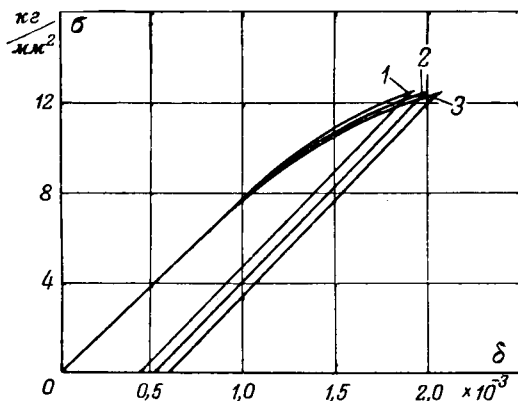


Рис. 6. Упрощенные механические характеристики провода АС-120.

1 — $t = +40^\circ$; 2 — $t = -5^\circ$; 3 — $t = -40^\circ$.

На рис. 7 линия ab представляет собой обратную ветвь характеристики сталеалюминиевого провода при температуре t_1 , а линии cd и ef — обратные ветви соответствующих характеристик стали и алюминия. Построим обратные ветви этих характеристик для температуры $t_2 > t_1$. При этом будем исходить из условия, что провод при температуре t_2 растягивался до того же напряжения в алюминии, что и при температуре t_1 .

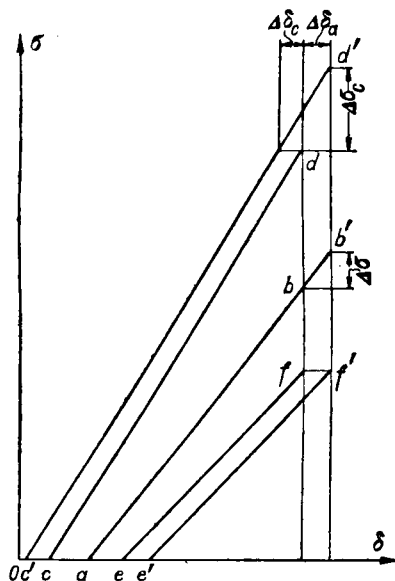


Рис. 7.

Характеристика алюминия для температуры t_2 сместится от линии ef (рис. 7) по горизонтали вправо на расстояние

$$\Delta\delta_a = (a_a - a)(t_2 - t_1), \quad (1)$$

а характеристика стали сместится от линии cd влево на расстояние

$$\Delta\delta_c = (a - a_c)(t_2 - t_1). \quad (2)$$

В выражениях (1) и (2) a_a , a_c и a — коэффициенты линейного расширения соответственно алюминия, стали и провода в целом.

Новые характеристики стали и алюминия $c'd'$ и $e'f'$ будут соответственно параллельны характеристикам cd и ef , так как установившиеся модули упругости стального сердечника и алюминиевой проволоки не изменятся с ростом тяжения. Этого изменения не произойдет потому, что предел упругости стали при переходе от температуры t_1 к температуре t_2 не будет превышен, а напряжение в алюминии при температуре t_2 принято равным напряжению при температуре t_1 .

Повышение напряжения в стали изобразится отрезком

$$\Delta\sigma_c = (\Delta\delta_a + \Delta\delta_c) E_c.$$

Среднее напряжение по сечению провода

$$\sigma = \frac{\sigma_c}{1+a} + \frac{a\sigma_a}{1+a},$$

откуда

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma_c}{1+a} = \frac{(\Delta\delta_a + \Delta\delta_c) E_c}{1+a}. \quad (3)$$

В формулах (3) $\Delta\delta_a$ и $\Delta\delta_c$ заменим их выражениями (1) и (2), а в формуле (1) коэффициент a — его выражением [Л. 4]:

$$a = \frac{a_a E_a + a_c E_c}{a E_a + E_c}.$$

Разделив (3) на (1), после преобразований получим:

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\delta_a} = \frac{E_c + a E_a}{1+a} = E, \quad (4)$$

т. е. отрезок bb' является продолжением линии ab , что и требовалось доказать. При $t_2 < t_1$ ход рассуждения не меняется.

На рис. 8 показаны упрощенные характеристики провода АС-120 при температурах -40 , -5 и $+40^\circ$. Во всех трех случаях провод растягивался до напряжения в алюминии 8 кг/мм^2 . (Температура изготовления провода принята равной 15°).

Совпадение обратных ветвей характеристик провода не означает полного совпадения состояний провода при заданном значении напряжения

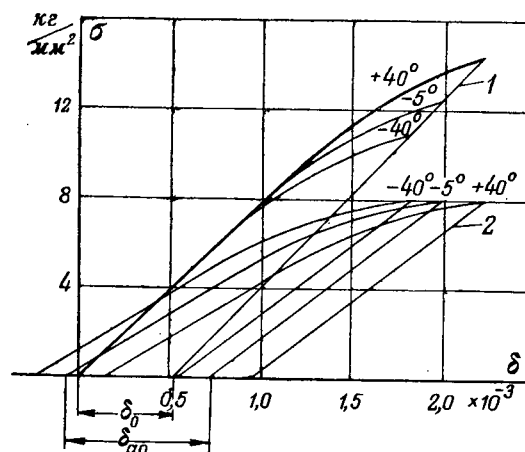


Рис. 8. Упрощенные механические характеристики провода АС-120 при температурах $+40$, -5 и -40° . 1 — характеристики провода; 2 — диаграммы напряжений в алюминии.

или относительного удлинения, так как характеристики алюминиевой части провода не совпадают. Распределение усилий между сталью и алюминием зависит от того, при какой температуре имело место предшествующее максимальное тяжение. Из диаграммы рис. 8 видно, что если максимальное тяжение имело место при температуре -5° , то в дальнейшем при меньших тяжениях провода напряжение в алюминии будет заметно меньше, чем если бы максимальное тяжение провода имело место при -40°C .

Критический пролет комбинированного провода согласно [Л. 4] определяется по формуле

$$l_{кр} = \sqrt{\frac{24\alpha_a(\vartheta_m - \vartheta_n)}{\frac{g_m^2}{\sigma_m^2} - \frac{g_n^2}{\sigma_n^2}}}, \quad (5)$$

которая выведена при условии равенства напряжений в алюминии и без учета неупругих деформаций. Покажем, что формула (5) не изменится, если в расчет будут введены неупругие деформации провода.

При нагрузке g_m длина провода в пролете с учетом остаточного удлинения

$$L_m = L_0(1 + \alpha\vartheta_m) \left(1 + \frac{\sigma_m}{E} + \delta_0\right) = l + \frac{lg_m^2}{24\sigma_m^2},$$

где E — установившийся модуль упругости, δ_0 — остаточное удлинение (рис. 8). Приняв $L_0 = l$ и пренебрегая весьма малыми членами $\left(\alpha\vartheta_m \frac{\sigma_m}{E}$ и $\alpha\vartheta_m\delta_0\right)$, получим:

$$\frac{lg_m^2}{24\sigma_m^2} = \alpha\vartheta_m + \delta_0 + \frac{\sigma_m}{E}. \quad (6)$$

Мы видели, что если при различных температурах провод растягивается до одного и того же напряжения в алюминии, то остаточные модули упругости и остаточные удлинения провода остаются неизменными (рис. 8). Поэтому для какой-либо другой температуры мы можем написать

$$\frac{lg_n^2}{24\sigma_n^2} = \alpha\vartheta_n + \delta_0 + \frac{\sigma_n}{E}. \quad (7)$$

После вычитания (7) из (8) получим

$$\frac{l}{24} \left(\frac{g_m^2}{\sigma_m^2} - \frac{g_n^2}{\sigma_n^2} \right) = \alpha(\vartheta_m - \vartheta_n) + \frac{\sigma_m - \sigma_n}{E}. \quad (8)$$

Из рассмотрения рис. 8 и формулы (1) вытекают следующие выражения для напряжений в проводе:

$$\sigma_m = E \left[\frac{\sigma_{am}}{E_a} + \delta_{a0} + (\alpha_a - \alpha)\vartheta_m - \delta_0 \right], \quad (9)$$

$$\sigma_n = E \left[\frac{\sigma_{an}}{E_a} + \delta_{a0} + (\alpha_a - \alpha)\vartheta_n - \delta_0 \right], \quad (10)$$

где δ_{a0} — остаточное удлинение алюминия (рис. 8); E_a — установившийся модуль упругости алюминия.

В критическом пролете

$$\sigma_{am} = \sigma_{an},$$

поэтому после вычитания (10) из (9) получим:

$$\sigma_m - \sigma_n = E(\alpha_a - \alpha)(\vartheta_m - \vartheta_n). \quad (11)$$

Подставив выражение (11) в формулу (8) и преобразовав некоторые преобразования, мы получим формулу (5).

Пользование криволинейными характеристиками, не имеющими аналитического выражения, лишь незначительно усложняет расчет провода. Покажем, каким образом ведется расчет по действительным характеристикам.

Определив критический пролет и выбрав, таким образом, расчетные условия, по диаграмме рис. 8 находим наибольшее допустимое напряжение при расчетных условиях. Пользуясь обычным уравнением состояния провода, определяем тяжения и стрелы провеса при гололеде и при максимальной температуре. В уравнение состояния провода подставляем установившийся модуль упругости и коэффициент линейного расширения, вычисленный по установившимся модулям упругости стали и алюминия.

Таким образом, мы определяем тяжения и стрелы провеса, которые будут иметь место после первого растяжения провода до расчетной нагрузки. Именно эти стрелы провеса нужно знать для определения высоты опоры. До того как провод подвергнется расчетной нагрузке, стрелы провеса будут несколько меньше. Как видно, эта часть расчета не сложнее аналогичной части расчета, принятого в настоящее время.

Для монтажных условий используем известную формулу:

$$\frac{g_2^2 l^2}{24\sigma_2^2} - \frac{g_1^2 l^2}{24\sigma_1^2} = \epsilon, \quad (12)$$

где ϵ — сумма деформаций провода при переходе от состояния 1 к состоянию 2.

На рис. 9 линия I — монтажная характеристика, линия II — установившаяся характеристика

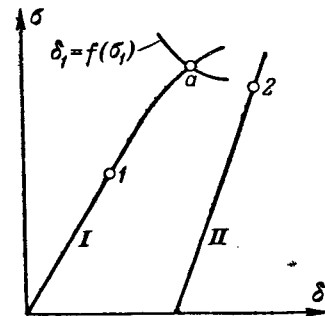


Рис. 9.

после растяжения. Когда точка 1 лежит на прямом участке линии I ниже кажущегося предела упругости (точка b на рис. 5).

$$\epsilon = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\sigma_1}{E_n} + \delta_0 + \alpha(t_2 - t_1), \quad (13)$$

где E_n — начальный модуль упругости. Подста-

вив выражение (13) в уравнение (12), после преобразований получим:

$$\sigma_1 - \frac{g_1^2 l^2 E_n}{24\sigma_1^2} = E_n \left[\frac{\sigma_2}{E} - \frac{g_2^2 l^2}{24\sigma_2^2} + \delta_0 + \alpha (t_2 - t_1) \right], \quad (14)$$

т. е. обычное кубическое уравнение. Решив уравнение (14), получим значение σ_1 , соответствующее условиям монтажа, и вычислим стрелу провеса.

Если монтаж ведется при низких температурах, то напряжение σ_1 может оказаться выше кажущегося предела упругости; точка, соответствующая этому напряжению, расположится на криволинейной части монтажной характеристики (точка a на рис. 9). В этом случае напряжение σ_1 может быть найдено графоаналитическим способом.

Уравнение (14) для этого случая примет вид:

$$\delta_1 = \frac{g_1^2 l^2}{24\sigma_1^2} + \left[\frac{\sigma_2}{E} - \frac{g_2^2 l^2}{24\sigma_2^2} + \delta_0 + \alpha (t_2 - t_1) \right], \quad (15)$$

где δ_1 — относительное удлинение провода при монтаже (абсцисса точки a на рис. 9). Построив на основании уравнения (15) график $\delta_1 = f(\sigma_1)$, найдем точку пересечения этого графика с монтажной характеристикой; это и будет искомая точка a .

Криволинейная часть монтажной характеристики провода неодинакова при различных температурах. Поэтому для расчета необходимо иметь монтажные характеристики провода для различных температур. На рис. 10 приведены монтажные характеристики провода АС-120 для температур от -5 до -40° .

График $\delta_1 = f(\sigma_1)$ на участке, пересекающем монтажные характеристики, весьма близок к прямой линии. Поэтому достаточно иметь только две точки этого графика. Одна из них получается по уравнению (14) и лежит на прямой, являющейся продолжением прямолинейного участка монтажной характеристики. Вторую точку вычисляем, задавшись значением σ_1 , заведомо ле-

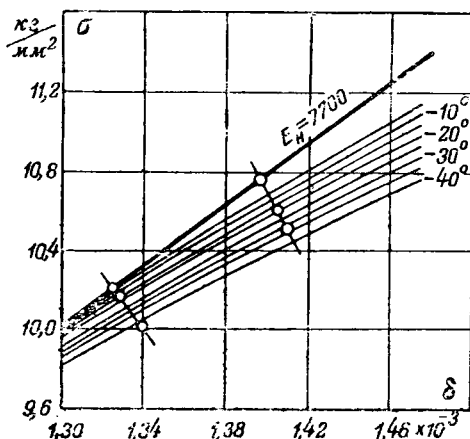


Рис. 10. Монтажные характеристики провода АС-120 для температур от -5 до -40° .

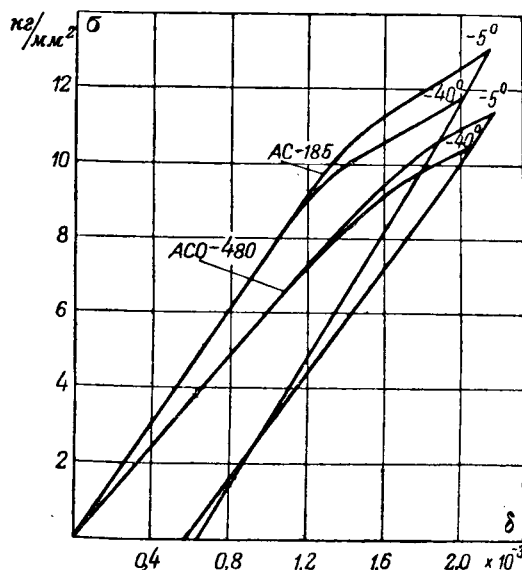


Рис. 11. Упрощенные механические характеристики проводов АС-185 и АСО-480.

жащим немного ниже искомого значения. Такой прием может быть применен не только при составлении монтажной таблицы, но и при решении других задач, сводящихся к отысканию точки на монтажной характеристике или на предельной характеристике первого растяжения.

На рис. 11 даны упрощенные характеристики проводов АС-185 и АСО-480.

Процесс растяжения алюминия, как мы видели, длится несколько суток; в течение этого времени происходит перераспределение нагрузки между сталью и алюминием. Мы принимаем в расчет лишь окончательное распределение, имеющее место по окончании процесса растяжения. Возникает вопрос, не перегрузится ли сильно алюминий при быстром росте нагрузки еще до того, как он успеет удлиниться и передать часть нагрузки на сталь.

Скорость нарастания гололеда обычно не превышает 100 г/м в час.

Нами произведен расчет для следующих условий: провод АС-120 в пролете длиной 165 м , еще ни разу не подвергавшийся расчетным нагрузкам, достиг установившегося состояния при температуре -5° ; затем на нем в течение 20 час образовался гололед толщиной 2 см (скорость нарастания 100 г/м в час). Расчет ввиду его громоздкости не приводим. Результат расчета: к концу 20-го часа напряжение в алюминии достигало $8,3 \text{ кг/мм}^2$, а затем постепенно снижалось. Через 2 часа оно упало до $8,12 \text{ кг/мм}^2$, асимптотически приближаясь к 8 кг/мм^2 . Такая незначительная и кратковременная перегрузка алюминия может быть допущена, тем более что она будет иметь место только раз за весь срок службы линии; при повторных растяжениях ее не будет.

Автор считает своим долгом выразить благодарность своему руководителю проф. В. В. Бурдору за ряд ценных указаний, а также проф. А. А. Глазунову за важные критические замечания, которые способствовали выяснению ряда вопросов.

Приложение. Примерный расчет провода. Условия расчета: провод АС-120, длина пролета 235 м, II район климатических условий. Нагрузки: $g_1 = 0,0035$ кг/м·мм²; $g_3 = 0,0086$ кг/м·мм²; $g_7 = 0,0088$ кг/м·мм². Коэффициент линейного расширения провода $\alpha = 19 \cdot 10^{-6}$.

По диаграмме рис. 8 находим:
допускаемое напряжение при -5°

$$\sigma_m = 12,5 \text{ кг/мм}^2;$$

допускаемое напряжение при -40°

$$\sigma_n = 11,0 \text{ кг/мм}^2;$$

установившийся модуль упругости $E = 8500$ кг/мм²;

начальный модуль упругости $E_n = 7700$ кг/мм²;

остаточное удлинение $\delta_0 = 0,52 \cdot 10^{-3}$.

Критический пролет определим по формуле (5):

$$l_{кр} = \sqrt{\frac{24\alpha_a(\vartheta_m - \vartheta_n)}{\frac{g_m^2}{\sigma_m^2} - \frac{g_n^2}{\sigma_n^2}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{24 \cdot 23 \cdot 10^{-6} [(-5) - (-40)]}{\frac{0,0088^2}{12,5^2} - \frac{0,0035^2}{11,0^2}}} = 220 \text{ м.}$$

Расчетный пролет больше критического, поэтому за расчетную принимаем нагрузку гололедом и ветром при температуре -5° .

Напряжение в проводе при гололеде и температуре -5° при отсутствии ветра определится из уравнения состояния провода:

$$\sigma_3 - \frac{g_3 l^2 E}{24 \sigma_3^2} = \sigma_m - \frac{g_7 l^2 E}{24 \sigma_m^2};$$

$$\sigma_3 - \frac{0,0086^2 \cdot 235^2 \cdot 8500}{24 \cdot \sigma_3^2} = 12,5 - \frac{0,0088^2 \cdot 235^2 \cdot 8500}{24 \cdot 12,5^2};$$

$$\sigma_3 = 12,39 \text{ кг/мм}^2;$$

$$f_3 = \frac{g_3 l^2}{8 \sigma_3} = \frac{0,0086 \cdot 235^2}{8 \cdot 12,39} = 4,79 \text{ м.}$$

При температуре $+40^\circ$

$$\sigma_1 - \frac{0,0035^2 \cdot 235^2 \cdot 8500}{24 \cdot \sigma_1^2} = 12,5 - \frac{0,0088^2 \cdot 235^2 \cdot 8500}{24 \cdot 12,5^2} -$$

$$- 19 \cdot 10^{-6} \cdot 8500 \cdot [40 - (-5)]; \quad \sigma_1 = 5,07 \text{ кг/мм}^2;$$

$$f_1 = \frac{0,0035 \cdot 235^2}{8 \cdot 5,07} = 4,77 \text{ м.}$$

Максимальная стрела провеса

$$f_{\max} = f_3 = 4,79 \text{ м.}$$

Для составления монтажной таблицы пользуемся уравнением (14)

$$\sigma_1 - \frac{g_1^2 l^2 E_n}{24 \sigma_1^2} = E_n \left[\frac{\sigma_2}{E} - \frac{g_2^2 l^2}{24 \sigma_2^2} + \delta_0 + \alpha (t_2 - t_1) \right].$$

Например, для температуры $+10^\circ$

$$\sigma_{10} - \frac{0,0035^2 \cdot 235^2 \cdot 7700}{24 \cdot \sigma_{10}^2} = 7700 \left[\frac{12,5}{8500} - \frac{0,0088^2 \cdot 235^2}{24 \cdot 12,5^2} + \right.$$

$$\left. + 0,52 \cdot 10^{-3} + 19 \cdot 10^{-6} (-5 - 10) \right]; \quad \sigma_{10} = 7,96 \text{ кг/мм}^2;$$

$$f_{10} = \frac{0,0035^2 \cdot 235^2}{8 \cdot 7,96} = 3,04 \text{ м.}$$

Для температур -15 и -20° из уравнения (14) получаем $\sigma_{-15} = 10,21$ кг/мм² и $\sigma_{-20} = 10,75$ кг/мм², эти значения превышают кажущиеся пределы упругости при соответствующих температурах. Поэтому воспользуемся графоаналитическим способом. Из уравнения (15) при -15° находим:

$$\delta_1 = \frac{g_1 l^2}{24 \sigma_1^2} + \frac{\sigma_2}{E} - \frac{g_2^2 l^2}{24 \sigma_2^2} + \delta_0 + \alpha (t_2 - t_1) = \frac{0,0035^2 \cdot 235^2}{24 \cdot \sigma_1^2} +$$

$$+ \frac{12,5}{8500} - \frac{0,0088^2 \cdot 235^2}{24 \cdot 12,5^2} + 0,52 \cdot 10^{-3} + 19 \cdot 10^{-6} \cdot 10 =$$

$$= \frac{0,0282}{\sigma_1^2} + 1,059 \cdot 10^{-3}.$$

Примем $\sigma_1 = 10,0$; тогда $\delta_1 = \frac{0,0282}{10^2} + 1,059 \cdot 10^{-3} = 1,341 \cdot 10^{-3}$.

На диаграмме рис. 10 через точку $\sigma = 10,21$ на прямой $E_n = 7700$ и точку $\delta = 1,341 \cdot 10^{-3}$, $\sigma = 10$ проводим прямую. Точка пересечения этой прямой с монтажной характеристикой провода при -15° дает истинное значение σ_{-15} :

$$\sigma_{-15} = 10,16 \text{ кг/мм}^2.$$

Аналогичным расчетом и построением определяем:

$$\sigma_{-20} = 10,6 \text{ кг/мм}^2.$$

Ниже приводится монтажная таблица.

$t, ^\circ\text{C}$	40	35	30	25	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20
$\sigma, \text{кг/мм}^2$	6,05	6,30	6,56	6,85	7,2	7,57	7,96	8,37	8,80	9,24	9,70	10,16	10,60
$f, \text{м}$	3,99	3,84	3,68	3,52	3,36	3,20	3,04	2,89	2,75	2,62	2,49	2,38	2,28

Литература

1. Л. В. Торосян. Исследование механических свойств проводов. Труды пленума Всесоюзной электротехнической ассоциации, т. II, 1934.
2. Stickley. Stress-strain studies of transmission line conductors. Tr. AIEE, Dec. № 4, 1932.

3. E. W. W. Double. Distribution of tensile load in relation to temperature and sag of steel cored aluminium conductors. J. I. E. E., vol. 92, p. II, 1945.

4. А. А. Глазунов. Сети электрических систем. Госэнергоиздат. 1947.

[17. 11. 1952]



Комплексная проводимость линий электросвязи и электропередачи

Кандидат техн. наук В. Н. КУЛЕШОВ и кандидат техн. наук В. В. СОКОЛОВ

Москва

Комплексное продольное сопротивление линий электросвязи и электропередачи принято определять на основе решения основных уравнений электромагнитного поля (уравнений Максвелла), в то время как величина комплексной поперечной проводимости обычно определяется на основе выводов общей электротехники; электрическая емкость линий рассматривается как емкость конденсатора, а проводимость изоляции — как проводимость потерь. Это нарушает стройность и последовательность изложения при выводе формул электрических параметров линий.

Дается вывод величины комплексной поперечной проводимости линий электросвязи и электропередачи на основе решения уравнений электромагнитного поля (уравнений Максвелла).

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума

$$\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}; \quad (4)$$

ϵ_r — относительная электрическая проницаемость среды (безразмерная величина).

Магнитная проницаемость в практической системе единиц определяется следующим выражением:

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (5)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума $\left(\frac{2\pi}{\text{м}}\right)$:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}; \quad (6)$$

μ_r — относительная магнитная проницаемость среды (безразмерная величина).

Кроме того, мы рассматриваем лишь гармонические процессы (установившийся режим), в которых напряженности \vec{E} и \vec{H} электромагнитного поля изменяются со временем по закону $e^{j\omega t}$.

Так как проводники линии имеют цилиндрическую форму, то задачу будем решать в системе цилиндрических координат, располагая ось z так, чтобы она совпадала с осью проводника.

Мы допускаем, что электрический ток в цилиндрических проводниках протекает только в направлении оси z . Следовательно, внутри проводника вектора напряженностей электрического поля и магнитного поля имеют лишь по одной составляющей E_z и H_φ , а вне проводника в окружающем пространстве вектор напряженности электрического поля имеет две составляющие E_z и E_r , а вектор напряженности магнитного поля — одну H_φ . При определении комплексной поперечной проводимости будем рассматривать лишь составляющие векторов напряженностей электромагнитного поля вне проводника. В первом приближении будем считать, что проводники цепи находятся на достаточном расстоянии друг от друга; следовательно, с их взаимным влиянием можно не считаться. При таком условии ввиду кругового сечения проводников напряженности электрического и магнитного полей не будут зависеть от координаты φ , т. е. их производные по φ будут равны нулю.

Даваемый в настоящей статье вывод выражений комплексной поперечной проводимости и комплексного продольного сопротивления линий основан на общих положениях теории поля. Это позволяет привести определение всех электрических параметров линий к стройной системе и рекомендовать один метод их расчета.

После получения комплексного сопротивления и комплексной проводимости линии изучение электрических цепей ведется обычным методом: волновое сопротивление линии рассматривается как квадратный корень из отношения комплексного сопротивления линии к комплексной проводимости, а постоянная распространения — как квадратный корень из произведения этих величин.

Как известно [Л. 1], основные уравнения электромагнитного поля в дифференциальной форме записываются в следующем виде:

$$\text{rot } \vec{H} = \frac{1}{\rho} \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (2)$$

где \vec{H} — вектор напряженности магнитного поля;
 \vec{E} — вектор напряженности электрического поля;

ρ — удельное сопротивление среды;

ϵ — диэлектрическая проницаемость среды;

μ — магнитная проницаемость среды;

t — время.

Мы придерживаемся практической системы единиц МКСМ, в которой диэлектрическая проницаемость

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r, \quad (3)$$

Таким образом, электромагнитное поле линий электросвязи и электропередачи вне цилиндрических проводов полностью определяется следующими тремя уравнениями:

$$\frac{\partial H_\varphi}{\partial r} + \frac{H_\varphi}{r} = \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right) E_z; \quad (7)$$

$$-\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right) E_r; \quad (8)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -j\omega\mu H_\varphi. \quad (9)$$

В уравнениях (7) — (9) напряженности поля E и H зависят только от координат r и z .

Под комплексной проводимостью цепи понимается отношение полного тока утечки I_r , протекающего через диэлектрик от прямого проводника цепи к обратному, к напряжению между проводами U_r , т. е.

$$Y = G + j\omega C = \frac{I_r}{U_r}, \quad (10)$$

где G — проводимость изоляции цепи на единицу длины;

C — электрическая рабочая емкость цепи на единицу длины.

Из теории длинных линий известно, что напряженности электромагнитного поля в начале линии связаны с напряженностями поля в любой точке длиной линии следующими уравнениями:

$$E_r(r; z) = E_r(r; 0)e^{-\gamma z}; \quad (11)$$

$$H_\varphi(r; z) = H_\varphi(r; 0)e^{-\gamma z}, \quad (12)$$

где γ — постоянная распространения.

Подставив выражения E_r и $\frac{\partial H_\varphi}{\partial z}$ в уравнение (8), получим:

$$\begin{aligned} E_r(r; z) \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right) &= \\ &= \gamma H_\varphi(r; 0)e^{-\gamma z} = \gamma H_\varphi(r; z). \end{aligned} \quad (13)$$

Левая часть уравнения (13) представляет собой плотность тока утечки через диэлектрик:

$$E_r \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right) = i_r = \frac{I_r}{2\pi r}. \quad (14)$$

Правую часть уравнения (13) на основании закона полного тока можно представить через ток I_z , протекающий по проводникам:

$$\gamma H_\varphi = \frac{\gamma I_z}{2\pi r}. \quad (15)$$

Таким образом, ток утечки I_r и ток I_z связаны соотношением

$$I_r = \gamma I_z. \quad (16)$$

Рассмотрим двухпроводную линию, показанную на рис. 1. Магнитное поле между проводниками создается токами, протекающими по обоим проводникам. Напряженность магнитного поля, создаваемого током, протекающим в первом проводнике, на основании закона полного тока определяется выражением

$$H_{\varphi 1} = \frac{I_{z1}}{2\pi r}. \quad (17)$$

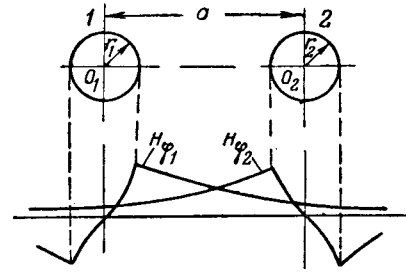


Рис. 1. Двухпроводная линия.

Напряженность же магнитного поля, создаваемого током, протекающим во втором (обратном) проводнике, в той же точке поля определяется выражением

$$H_{\varphi 2} = \frac{-I_{z2}}{2\pi(a-r)}, \quad (18)$$

где a — расстояние между центрами проводников.

Ввиду того что $I_{z1} = I_{z2}$, общая напряженность магнитного поля в данной точке, лежащей на линии, соединяющей центры проводов, определяется как сумма напряженностей $H_{\varphi 1}$ и $H_{\varphi 2}$, т. е.

$$H_{(\varphi 1=0)} = \frac{I_z}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a-r} \right). \quad (19)$$

Следовательно, уравнение (13) можно представить в другом виде:

$$E_{r(\varphi 1=0)} \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right) = \gamma \frac{I_z}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a-r} \right). \quad (20)$$

Напряжение между проводами линии представляет собой интеграл $E_r dr$, взятый по линии O_1-O_2 . Для определения этого напряжения найдем величину E_r из уравнения (20), умножим ее на dr и проинтегрируем:

$$\begin{aligned} U_r &= \frac{\gamma I_z}{2\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right)} \int_{r_1}^{a-r_2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a-r} \right) dr = \\ &= \frac{\gamma I_z}{2\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right)} \left(\ln \frac{a-r_2}{r_1} - \ln \frac{r_1}{a-r_2} \right), \end{aligned} \quad (21)$$

где r_1 и r_2 — радиусы проводников.

При $r_1 = r_2 = r_0$ выражение (21) примет вид:

$$U_r = \frac{\gamma I_z}{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right)} \ln \frac{a-r_0}{r_0}. \quad (22)$$

Заменив согласно уравнению (16) выражение γI_z величиной I_r , получим значение комплексной поперечной проводимости двухпроводной линии:

$$Y = \frac{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\varepsilon \right)}{\ln \frac{a-r_0}{r_0}}. \quad (23)$$

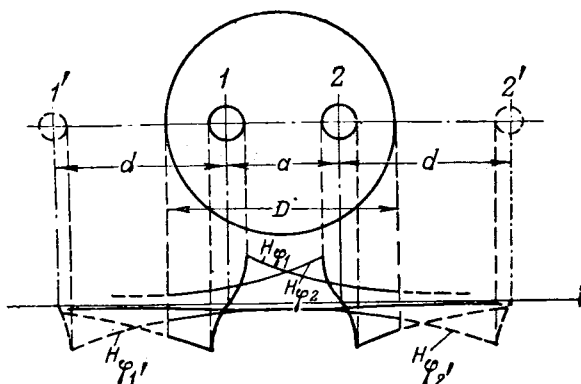


Рис. 2. Двухпроводная кабельная линия.

Вследствие того что диэлектрики, применяемые в технике, имеют потери, диэлектрическая проницаемость является комплексной величиной [Л. 3]:

$$\epsilon' = \epsilon(1 - j \operatorname{tg} \delta), \quad (24)$$

где δ — угол диэлектрических потерь.

Подставив значение ϵ' в формулу (23) вместо ϵ , получим:

$$Y = \pi \frac{\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon + \omega\epsilon \operatorname{tg} \delta}{\ln \frac{a-r_0}{r_0}}. \quad (25)$$

Отделив действительную часть выражения (25) от мнимой, определим электрическую (рабочую) емкость двухпроводной линии $\left(\frac{\phi}{\text{м}}\right)$:

$$C = \frac{\pi\epsilon}{\ln \frac{a-r_0}{r_0}} = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-9}}{36 \ln \frac{a-r_0}{r_0}}, \quad (26)$$

а также проводимость изоляции линии $\left(\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}\right)$:

$$G = \frac{\pi}{\rho \ln \frac{a-r_0}{r_0}} + \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (27)$$

Первый член правой части выражения (27) определяет проводимость изоляции линии при постоянном токе, а второй — увеличение проводимости изоляции при переменном токе за счет потерь в диэлектрике. Как известно, второй член во много раз больше первого, поэтому при практических расчетах первым членом пренебрегают. Тогда

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (28)$$

У однопроводных воздушных линий вторым проводом служит земля, им принято считать отображение провода в земле, расположенное от поверхности земли на таком же расстоянии, на каком подвешен от земли провод однопроводной линии.

Если обозначить высоту подвеса провода над землей через h , то при определении напряжения U , в качестве верхнего предела интегрирования следует взять величину $2h - r_0$, а результат от инте-

грирования умножить на два. Тогда электрическая емкость однопроводной линии $\left(\frac{\phi}{\text{м}}\right)$

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-9}}{18 \ln \frac{2h-r_0}{r_0}}, \quad (29)$$

а проводимость изоляции $\left(\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}\right)$

$$G = \frac{2\pi}{\rho \ln \frac{2h-r_0}{r_0}} + \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (30)$$

Следует заметить, что для воздуха $\rho = \infty$, $\operatorname{tg} \delta = 0$. Поэтому проводимость изоляции воздушной линии определяется проводимостью ее изоляторов, величина которой определяется по другим формулам.

В двухпроводном кабеле, показанном на рис. 2, магнитное поле между проводниками 1 и 2 создается токами, протекающими по этим проводникам, и токами, как бы протекающими по воображаемым проводам 1' и 2', являющимся зеркальными отображениями проводов 1 и 2.

Расстояние между проводом 1 и его отображением 1', а также между проводом 2 и его отображением 2' определяется формулой

$$d = \frac{1}{2} \left(\frac{D^2}{a} - a \right). \quad (31)$$

Подставляя результирующую напряженность магнитного поля, действующую в точках, расположенных по прямой между центрами проводов 1 и 2, в уравнение (13) и интегрируя $E \cdot dr$ в пределах от r_0 до $a - r_0$, получим комплексную поперечную проводимость изоляции:

$$Y = \frac{\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon \right)}{\ln \frac{(a-r_0)(D^2 - a^2 + 2r_0a)}{r_0(D^2 + a^2 - 2r_0a)}}. \quad (32)$$

Емкость двухпроводного кабеля $\left(\frac{\phi}{\text{м}}\right)$

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-9}}{36 \ln \frac{(a-r_0)(D^2 - a^2 + 2r_0a)}{r_0(D^2 + a^2 - 2r_0a)}}. \quad (33)$$

Проводимость изоляции двухпроводного кабеля с учетом потерь $\left(\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}\right)$

$$G = \frac{\pi}{\rho \ln \frac{(a-r_0)(D^2 - a^2 + 2r_0a)}{r_0(D^2 + a^2 - 2r_0a)}} + \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (34)$$

У однопроводных кабелей (рис. 3) обратным проводником служит среда, в которой проложен кабель и которая в силу конструкции кабельной жилы расположена концентрически вокруг диэлектрика. Следовательно, магнитное поле в диэлектрике кабеля создается только током, протекающим во внутреннем проводнике кабеля. Поэтому для определения комплексной проводимости изоляции однопроводной кабельной линии воспользуемся уравнением (14).

Проинтегрировав выражение E, dr в пределах от r_1 до r_2 и воспользовавшись уравнением (10), получим:

$$Y = \frac{2\pi \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon \right)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (35)$$

Электрическая емкость однопроводного кабеля (ϕ/m)

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot 10^{-9}}{18 \ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (36)$$

Проводимость изоляции ($\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}$)

$$G = \frac{2\pi}{\rho \ln \frac{r_2}{r_1}} + \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (37)$$

Как видно из рис. 4, магнитное поле в диэлектрике коаксиального кабеля создается, так же как и в диэлектрике однопроводного кабеля, током, протекающим во внутреннем проводнике. Следовательно, комплексная проводимость коаксиаль-

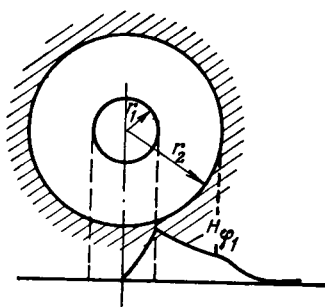


Рис. 3. Однопроводная кабельная линия.

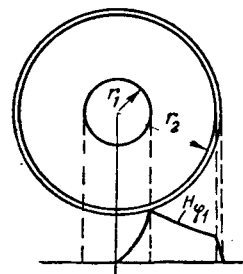


Рис. 4. Коаксиальная линия.

ного кабеля, а также ее составляющие определяются по формулам (35), (36) и (37), выведенным для однопроводного кабеля.

Литература

1. К. А. Круг. Основы электротехники. Госэнергоиздат, 1946.
2. В. Н. Кулешов. Теория кабелей связи. Связьиздат, 1950.
3. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, 1951.

[25. 3. 1952]



Расчет низковольтных сетей по отклонениям напряжения

Инж. Н. К. АРХИПОВ

Гипрокоммунэнерго

Линии низкого напряжения в городских и промышленных сетях рассчитываются или проверяются по потере напряжения, величина которой обычно выбирается вне зависимости от режима напря-

жения центра питания и потери напряжения в предыдущих звеньях цепи. При таком методе расчета могут наблюдаться значительные расхождения между отклонениями напряжения на зажимах приемников электроэнергии, расположенных в разных пунктах сети, даже в том случае, когда потери напряжения в низковольтных линиях будут одинаковы.

Действующими правилами и нормами предписываются определенные отклонения напряжения. Например, согласно [Л. 1] отклонения напряжения в промышленных сетях устанавливаются в пределах $\pm 5\%$ для электродвигателей и $-2,5\%$ для наиболее удаленных светильников. Такую же величину нижнего предела отклонения напряжения для светильников устанавливает ГОСТ 3825-47. Верхний предел отклонения напряжения для светильников устанавливается равным $+3\%$ [Л. 2]. В проекте ГОСТ на номинальные напряжения отклонение напряжения у

Обращается внимание на необходимость производить расчет низковольтных сетей по допустимым отклонениям напряжения и предлагается способ такого расчета. Исследуются условия, которые позволяют обеспечить заданные отклонения напряжения при двухлучевой схеме городской электросети. Дается применение предложенного метода расчета к выбору регулирующих устройств в низковольтных сетях.

Печатается в порядке обсуждения.

потребителей ограничивается пределами $\pm 5\%$.

Расчетное значение потери напряжения в низковольтной сети, удовлетворяющее требованиям правил и норм, следует выбирать в зависимости

от заданного отклонения напряжения на зажимах приемников, потери напряжения в предыдущих звеньях цепи и режима напряжения центра питания. Задача сводится к определению такого наибольшего значения потери напряжения в низковольтной сети, при котором еще соблюдаются заданные пределы отклонения напряжения у потребителей. Ниже излагается способ расчета низковольтных сетей по отклонениям напряжения.

Здесь следует отметить, что теоретические основы расчета сетей по отклонениям напряжения содержатся в работах А. А. Глазунова. Им же предложен и сам термин "отклонение напряжения" [Л. 3]. Методика составления уравнений для расчета сетей по отклонениям напряжения с учетом режима напряжения источника питания и параметров цепи впервые разработана В. Г. Холмским [Л. 4]. Нами была предпринята попытка уточнения и дальнейшего развития этой методики [Л. 5].

Введем следующие обозначения:

$\delta U_{от}^{(B)}$, $\delta U_{от}^{(H)}$ — соответственно верхний (обычно положительный) и нижний (обычно отрицательный) допустимые пределы отклонения напряжения на зажимах приемников;

δU_2 — отклонение напряжения на вторичных зажимах сетевого трансформатора;

$\Delta U_{нб}$ — предельное (наибольшее) значение потери напряжения на участке низковольтной сети от вторичных зажимов сетевого трансформатора до зажимов самого удаленного приемника электроэнергии;

$\Delta U_{нм}$ — значение потери напряжения на участке рассматриваемой сети от какой-либо точки до ближайшего к ней приемника (наименьшее значение потери напряжения).

Величины, относящиеся к режиму минимальных нагрузок, имеют обозначения с одним штрихом, а величины, относящиеся к режиму максимальных нагрузок, — с двумя штрихами.

Все величины отклонений и потерь напряжения будем выражать в относительных единицах или в процентах от номинального напряжения сети.

В случае, когда приемник присоединен непосредственно ко вторичным шинам трансформатора, отклонение напряжения на этих шинах

$$\delta U_2'' \leq \delta U_{от}^{(B)}. \quad (1)$$

Если условие (1) не соблюдается, необходимо выбрать другое ответвление или иными средствами: уменьшить значение $\delta U_2''$. При соблюдении же условия (1) наибольшая потеря напряжения в низковольтной сети

$$\Delta U_{нб} \leq \delta U_2'' - \delta U_{от}^{(H)} \leq \delta U_{от}^{(B)} - \delta U_{от}^{(H)*}. \quad (2)$$

В случае, когда ближайший приемник удален от шин сетевой трансформаторной подстанции (ТП) и потеря напряжения до него в режиме максимальных нагрузок составляет $\Delta U_{нм}''$, допустимо повышенное по сравнению с предыдущим случаем значение отклонения напряжения на шинах, а именно:

$$\delta U_2'' \leq \delta U_{от}^{(B)} + \Delta U_{нм}''. \quad (3)$$

В этом случае наибольшая потеря напряжения в низковольтной сети

$$\Delta U_{нб} \leq \delta U_2'' - \delta U_{от}^{(H)} \leq \delta U_{от}^{(B)} - \delta U_{от}^{(H)} + \delta U_{нм}''*. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что при допустимом отклонении напряжения на зажимах приемника $\pm 5\%$ (в частности, для электродвигателей промышленных предприятий) и при расположении приемника в непосредственной близости от ТП ($\Delta U_{нм} = 0$)

$$\Delta U_{нб} \leq 5 - (-5) \leq 10\%.$$

Для осветительных установок промышленных предприятий при $\Delta U_{нм} = 0$

$$\Delta U_{нб} \leq 3 - (-2,5) \leq 5,5\%.$$

* Крайние справа части неравенств (2) и (4) относятся к случаю, когда $\delta U_2''$ достигает максимально допустимого значения.

Полученные цифровые значения наибольшей потери напряжения в низковольтной сети являются предельными и ни при каких режимах источника питания не могут быть повышены без нарушения заданных пределов отклонения напряжения. Но и эти значения применимы лишь к сетям, питающимся от таких ТП, вторичные напряжения которых в момент максимума нагрузок достигают предельных допустимых значений, определяемых условиями питания ближайших потребителей. Если же в период максимальных нагрузок из-за потери напряжения в предыдущих звеньях цепи величина $\delta U_2''$ равна, например, 1% , то для осветительных установок промышленных предприятий при $\Delta U_{нм}'' = 0$ предельное значение потери напряжения в низковольтной сети согласно выражению (4)

$$\Delta U_{нб} \leq 1 - (-2,5) \leq 3,5\%.$$

При заданной величине отклонения напряжения предельная величина потери напряжения $\Delta U_{нб}$ вполне определяется значением $\delta U_2''$, которое в свою очередь зависит от отклонения напряжения на первичных зажимах трансформатора δU_1 , от выбранного ответвления трансформатора и от потери напряжения в нем ΔU_T .

Отклонение напряжения на первичных зажимах трансформатора

$$\delta U_1 = \delta U_n - \Delta U_g, \quad (5)$$

где δU_n — отклонение напряжения на шинах центра питания;

ΔU_g — потеря напряжения в высоковольтной сети (от центра питания до данного ТП).

В уравнении (5) величины δU_1 и δU_n выражаются в относительных единицах или в процентах номинального первичного напряжения трансформатора. Потеря напряжения в трансформаторе ΔU_T обычно выражается в процентах от номинального вторичного напряжения холостого хода трансформатора $U_{2х}$ и определяется по известной формуле, рекомендуемой ГОСТ, или по упрощенной формуле [Л.3].

Расчеты показывают, что величина ΔU_T резко возрастает при относительно небольшом ухудшении коэффициента мощности. Поэтому при определении ΔU_T и при выборе сечения проводов низковольтных линий по потере напряжения не следует пренебрегать влиянием коэффициента мощности даже в тех случаях, когда величина его близка к единице.

Мы не касаемся здесь вопроса о выборе величины ΔU_g , считая ее заданной. Это может иметь место в тех случаях, когда трансформатор проектируемой сети присоединяется к существующей сети высокого напряжения или сечение проектируемой линии высокого напряжения определяется не потерей напряжения, а другими условиями (токами короткого замыкания, экономической плотностью тока, условиями резервирования).

Зная отклонение напряжения источника питания εU_n и потерю напряжения в высоковольтной сети ΔU_s , находим величину отклонения напряжения на первичных зажимах трансформатора εU_1 , после чего легко определить отклонение на вторичных зажимах последнего εU_2 , пользуясь следующей формулой [Л. 5].

$$\varepsilon U_2 = \left(\frac{\varepsilon U_1}{100} + 1 \right) \left(\frac{\varepsilon U_T}{100} + 1 \right) (100 - \Delta U_T) - 100, \quad (6)$$

где εU_T — отклонение напряжения на вторичных зажимах ненагруженного трансформатора, когда к его первичной обмотке подведено номинальное напряжение (надбавка трансформатора). Величина этого отклонения выражается в процентах номинального вторичного напряжения и может быть определена по следующей формуле:

$$\varepsilon U_T = \frac{U_{2x} U_{1n}}{U_{2n} U_{отв}} 100 - 100.$$

Вычисленные по этой формуле значения εU_T приведены в таблице.

Ответвление трансформатора, %	Значение εU_T (%) при напряжении холостого хода трансформатора	
	230 в	400 в
+5	-0,43	0,26
0	4,54	5,26
-5	10,05	10,80

При холостом ходе трансформатора ($\Delta U_T = 0$)

$$\varepsilon U_2 = \varepsilon U_1 + \varepsilon U_T + \frac{\varepsilon U_1 \varepsilon U_T}{100}. \quad (7)$$

Если к первичным зажимам трансформатора подведено номинальное напряжение, то $\varepsilon U_1 = 0$. Тогда

$$\varepsilon U_2 = \varepsilon U_T - \Delta U_T - \frac{\varepsilon U_T \Delta U_T}{100}. \quad (8)$$

Если же, кроме того, трансформатор работает холостую, то

$$\varepsilon U_2 = \varepsilon U_T. \quad (9)$$

Выражение (6) может быть приведено к виду:

$$\varepsilon U_2 = \varepsilon U_1 + \varepsilon U_T - \Delta U_T - \frac{\Delta U_T (\varepsilon U_1 + \varepsilon U_T)}{100} + \frac{\varepsilon U_1 \varepsilon U_T}{100} - \frac{\varepsilon U_1 \Delta U_T \Delta U_T}{100^2}. \quad (10)$$

Следовательно, приближенно величину отклонения вторичного напряжения εU_2 можно подсчитывать по следующей формуле:

$$\varepsilon U_2 = \varepsilon U_1 + \varepsilon U_T - \Delta U_T. \quad (11)$$

Определенное по формуле (11) значение εU_2 отличается от вычисленного по точной формуле (10) не более чем на 0,25...0,75% в зависимости от ответвления трансформаторов.

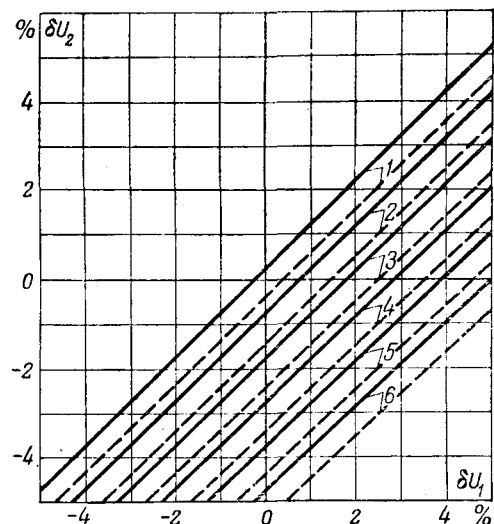


Рис. 1. Зависимость отклонения напряжения на вторичных зажимах трансформатора от отклонения напряжения на его первичных зажимах при потере напряжения в трансформаторе. 1—0%; 2—1%; 3—2%; 4—3%; 5—4%; 6—5%. Ответвление +5%, вторичное напряжение холостого хода трансформатора $U_{2x}=400$ в (сплошные линии), $U_{2x}=230$ в (пунктирные линии).

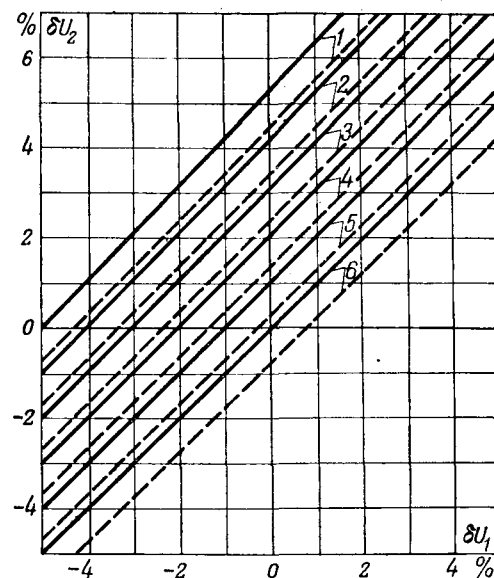


Рис. 2. Зависимость отклонения напряжения на вторичных зажимах трансформатора от отклонения напряжения на его первичных зажимах при потере напряжения в трансформаторе. 1—0%; 2—1%; 3—2%; 4—3%; 5—4%; 6—5%. Ответвление 0%, вторичное напряжение холостого хода $U_{2x}=400$ в (сплошные линии), $U_{2x}=230$ в (пунктирные линии).

С помощью выражения (6) можно построить удобные для практических расчетов графики $\varepsilon U_2 = f(\varepsilon U_1)$. На рис. 1, 2 и 3 приведены три таких графика для трансформаторов с ответвлениями +5, 0 и -5% при $U_{2x}=400$ в и $U_{2x}=230$ в (пунктирные линии). Пользуясь этими графиками, можно легко и с достаточной для практических целей точностью выбрать наиболее целесообразное ответвление трансформатора и определить величину εU_2 .

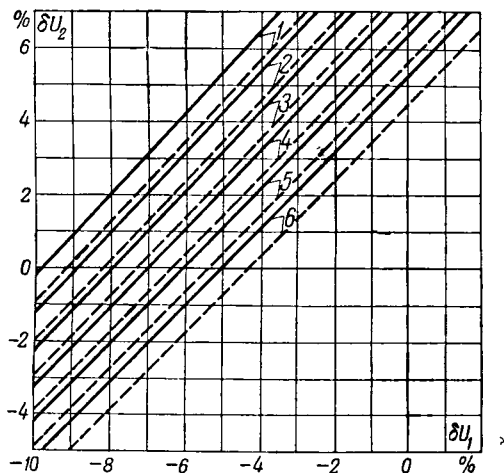


Рис. 3. Зависимость отклонения напряжения на вторичных зажимах трансформатора от отклонения напряжения на его первичных зажимах при потерях напряжения в трансформаторе.

1—0%; 2—1%; 3—2%; 4—3%; 5—4%; 6—5%. Ответвление—5%, вторичное напряжение холостого хода $U_{2x}=400$ в (сплошные линии), $U_{2x}=230$ в (пунктирные линии).

Пример. Требуется выбрать наиболее целесообразное ответвление трансформатора и определить предельное значение потери напряжения в низковольтной сети. Сеть питается от понизительного трансформатора ТМ 100/6, номинальное вторичное напряжение холостого хода которого $U_{2x}=400$ в. Напряжение центра питания поддерживается неизменным на уровне +5%: $\Delta U_T'=3\%$; $\Delta U_T''=1\%$; $\Delta U_g''=3,5\%$; $\Delta U_g'=1\%$; $\delta U_{om}^{(B)}=5\%$; $\delta U_{om}^{(H)}=-5\%$.

Определим отклонение напряжения на первичных зажимах трансформатора при режимах максимальных и минимальных нагрузок:

$$\delta U_1''=5-3,5=1,5\%; \quad \delta U_1'=5-1=4\%.$$

Из рассмотрения графиков (рис. 1, 2 и 3) следует, что по условиям режима максимальных нагрузок ответвление -5% не подходит, так как величина δU_2 при этом ответвлении выходит далеко за допустимые пределы. Ответвление 0% неприемлемо по условиям режима минимальных нагрузок, вследствие того что при $\delta U_1'=4\%$ и $\Delta U_T'=1\%$ значение $\delta U_2'$ недопустимо высоко. Таким образом, в рассматриваемом случае следует выбрать ответвление +5%, которое приемлемо по условиям режима максимальных и режима минимальных нагрузок.

Для $\delta U_1''=1,5\%$ и $\Delta U_T''=3\%$ по графику (рис. 1) находим, что $\delta U_2''=-1,3\%$. Следовательно,

$$\Delta U_{нб} \leq \delta U_2'' - \delta U_{om}^{(H)} \leq -1,3 - (-5) \leq 3,7\%.$$

При наличии на питающем центре встречного регулирования напряжения в соответствии с графиком рассматриваемой группы потребителей (в пределах от +5% в максимум до 0% в минимум нагрузки) следовало бы выбрать ответвление 0%, так как в этом случае режим минимальных нагрузок не препятствует этому. Действительно, при $\delta U_1'=0$ величина $\delta U_2'$ даже при $\Delta U_T'=0\%$ лишь незначительно превышает +5% (график рис. 2).

При встречном регулировании напряжения центра питания для $\delta U_1''=1,5$ и $\Delta U_T''=3\%$

$$\Delta U_{нб} = 3,5 - (-5) = 8,5\%.$$

что более чем в 2 раза превышает значение $\Delta U_{нб}$ при $U_n'=U_n''=+5\%$.

Даже вполне надежную схему электросети нельзя признать удовлетворительной, если она не обеспечивает надлежащего качества электроэнергии. Поэтому большой интерес представляет анализ условий обеспечения заданных отклонений напряжения в двухлучевой схеме, описанной в статье Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского [Л.6].

Рассмотрим три следующих варианта режима напряжения центра питания: 1) режим встречного регулирования, при котором напряжение изменяется от $U_n'=0$ до $U_n''=5\%$; 2) режим, при котором $U_n'=U_n''=5\%$; 3) режим, при котором $U_n'=5\%$, $U_n''=2,5\%$. При этом будем исходить из следующих данных: допустимое отклонение напряжения на зажимах приемников $\pm 5\%$; наименьшая величина потери напряжения $\Delta U_{нм}=0$; потеря напряжения в трансформаторе $\Delta U_T'=2\%$, $\Delta U_T''=1\%$; номинальное вторичное напряжение холостого хода трансформатора $U_{2x}=230$ в.

При встречном регулировании напряжения (вариант 1) по условиям режима минимальных нагрузок можно выбрать ответвление 0% для любой величины потери напряжения в высоковольтной сети, так как даже при холостом ходе трансформатора величина $\delta U_2'$ не превышает 5%. По условиям же режима максимальных нагрузок это ответвление допустимо лишь для трансформаторов с отклонениями напряжения на первичных зажимах $\delta U_1 \leq 2,5\%$ или при потере напряжения в высоковольтной сети $\Delta U_g'' \geq 2,5\%$. Если $\Delta U_g'' \leq 2,5\%$ или $\delta U_1 \geq 2,5\%$, то следует выбрать ответвление +5%.

При варианте 2 режима напряжения на питающем центре по условиям режима максимальных нагрузок можно выбрать ответвление 0% для всех трансформаторов, которые расположены таким образом, что $\Delta U_g'' \geq 2,5\%$. Однако по условиям режима минимальных нагрузок это ответвление оказывается применимым лишь при $\delta U_1' \leq 1,5\%$ или при $\Delta U_g' \geq 5-1,5=3,5\%$. Следовательно, при $\delta U_n'=\delta U_n''=5\%$ практически для всех трансформаторов следует принять ответвление +5%.

При варианте 3 режима напряжения на питающем центре выбор ответвлений, как в предыдущем случае, определяется режимом минимальных нагрузок. Поэтому и для этого случая следует выбрать ответвление +5%.

После выбора ответвлений определим величину отклонения напряжения на вторичных зажимах трансформатора $\delta U_2''$ и величину наибольшей потери напряжения в низковольтной сети, затем построим графики $\Delta U_{нб}=f(\delta U_1)$ или $\Delta U_{нб}=f(\Delta U_g')$. Последний график для варианта встречного регулирования дан на рис. 4, а для двух других вариантов—на рис. 5.

Таким образом, при встречном регулировании напряжения на питающем центре в соответствии с графиком нагрузок данной группы потребителей при всех имеющих практический интерес значениях потери напряжения в высоковольтной сети величина $\Delta U_{нб}$ превышает 5%. Для значений $\Delta U_g''$ от 2,5 до 5% она в среднем равна 8,75%, а для значений $\Delta U_g''$ от 0 до 2,5% — около 6,25% (рис. 4).

При варианте 2 режима напряжений питающего центра среднее значение $\Delta U_{нб}$ в диапазоне величин $\Delta U_g''$ от 0 до 2,5% остается таким же, т. е. равно 6,25%. В диапазоне же величин $\Delta U_g''$ от 2,5 до 5% оно снижается до 3,75% вместо 8,75% в предыдущем случае (рис. 5).

При варианте 3 режима напряжения на питающем центре средняя величина $\Delta U_{нб}$ в диапазоне значений $\Delta U_g''$ от 0 до 2,5% равна 3,75, а в диапазоне значений $\Delta U_g''$ от 2,5 до 5% — всего лишь 1,25% (рис. 5).

На рис. 6 дано распределение напряжения вдоль луча 10 кВ при расстояниях от питающего центра до ближайшего к нему трансформатора b , равных 0; 0,5; 1; 2; 3; 4 км. К лучу присоединены 6 ТП. От каждой из этих ТП питается квартал города. Точкам присоединения ТП на рис. 6 соответствуют вертикальные пунктирные линии. Расстояние от одной ТП до другой принято равным 200 м. Нагрузки (ТП) и условия их питания приблизительно соответствуют данным [Л.6].

У всех лучей с расстоянием от питающего центра до ближайшего ТП $b \leq 4$ км величина $\Delta U_g'' \leq 2,5\%$ (рис. 6). Следовательно, для всех трансформаторов, присоединенных к этим лучам, при встречном регулировании и при варианте 2 режима напряжения на питающем центре должно быть выбрано ответвление +5%. Величина $\Delta U_{нб}$ при этом составляет больше 5%, доходя при $\Delta U_g'' = 0$ до 7,5% (рис. 4 и 5). При варианте 3 режима напряжения на питающем центре и при тех же пределах величины $\Delta U_g''$ значение $\Delta U_{нб}$ не превышает 5%, а при $\Delta U_g'' = 2,5\%$ — снижается до 2,5% (рис. 5).

В статье Э. С. Иохвидова и Г. В. Сербиновского [Л.6] потери напряжения в кабельном силовом вводе от ТП до середины здания принимаются равными или меньшими 5%, а в осветительном вводе — 3%. Сопоставляя эти величины с приведенными выше расчетными значениями $\Delta U_{нб}$, приходим к выводу, что при одних режимах напряжения центра питания принятые авторами [Л.6] значения потерь напряжения могут быть увеличены без нарушения заданных пределов отклонения напряжения, а при других режимах принятие этих значений потерь приводят к тому, что отклонения напряжения выходят за пределы заданных.

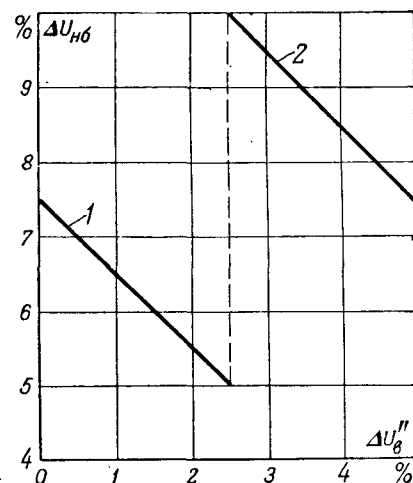


Рис. 4. Зависимость предельного значения потери напряжения в низковольтной сети от потери напряжения в высоковольтной сети при встречном регулировании напряжения на питающем центре при ответвлении на сетевых трансформаторах.

1 — +5%, 2 — 0%. Вторичное напряжение холостого хода трансформаторов $U_{2х} = 230$ в, потеря напряжения в трансформаторах $\Delta U_T'' = 2\%$.

Действительно, при встречном регулировании и при варианте 2 режима напряжения на питающем центре наибольшая потеря напряжения в низковольтной сети $\Delta U_{нб}$ в диапазоне величин $\Delta U_g''$ от 0 до 2,5% колеблется в пределах от 5 до 7,5%, т. е. заметно выше принятого авторами [Л.6] значения для осветительной сети (3%). Следовательно, в этом случае можно было бы повысить расчетное значение потери напряжения. При варианте же 3 режима напряжения на питающем центре и принятых авторами величинах потери напряжения отклонения напряжения выйдут за пределы $\pm 5\%$, так как уже при $\Delta U_g'' = 0$ потеря напряжения составляет 5%, в то время как авторы только в силовом кабельном вводе принимают потерю напряжения равной 5%. Приемники осветительной сети будут находиться в несколько лучшем положении, но и для них

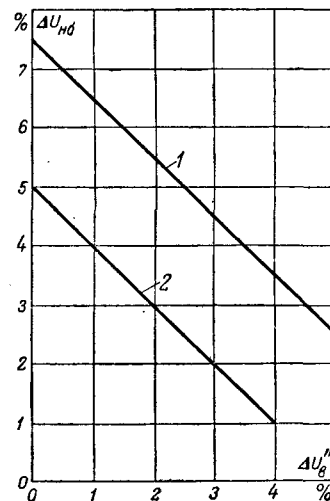


Рис. 5. Зависимость предельного значения потери напряжения в низковольтной сети от потери напряжения в высоковольтной сети. Вторичное напряжение холостого хода трансформатора $U_{2х} = 230$ в, потеря напряжения в них $\Delta U_T'' = 2\%$, ответвление +5%.

1 — напряжение на питающем центре поддерживается неизменным на уровне +5%; 2 — напряжение на питающем центре изменяется в пределах от $U_n' = 5\%$ до $U_n'' = 2,5\%$.

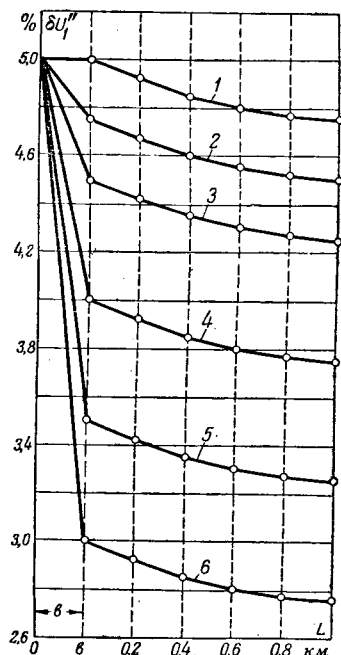


Рис. 6. Распределение напряжения вдоль луча 10 кв при следующих расстояниях от питающего центра до ближайшего к нему трансформатора.

1— $b=0$ км; 2— $b=0,5$ км; 3— $b=1$ км;
4— $b=2$ км; 5— $b=3$ км; 6— $b=4$ км.

принятые авторами значения потери напряжения не во всех случаях приемлемы.

Для обеспечения заданных отклонений напряжения при варианте 3 режима напряжения на питающем центре необходимо либо понизить значение расчетной потери напряжения до величины, соответствующей заданным отклонениям напряжения, либо применить регулирующие устройства, улучшающие режим напряжения в начале луча или у отдельных трансформаторов. Выбор того или иного способа обеспечения заданных отклонений напряжения определяется технико-экономическими расчетами.

В практике встречаются отдельные центры питания, режим напряжения которых еще более неблагоприятен, чем режим, при котором $U'_n = 5\%$, $U''_n = 2,5\%$ (вариант 3). В таких случаях без применения регулирующих устройств либо вообще не представляется возможным обеспечить требуемые пределы отклонения напряжения, либо для их обеспечения придется допустить большой перерасход металла проводов.

С помощью графиков рис. 1, 2 и 3 можно определить пределы регулирования напряжения в низковольтных сетях. Рассмотрим, например, условия применения и выбор нерегулируемого низковольтного вольтодобавочного трансформатора. Допустимость применения нерегулируемых вольтодобавочных трансформаторов, создающих неизменное по величине добавочное напряжение $\delta U_{вн}$, определяется условиями режима минимальных нагрузок, так как эти трансформаторы устанавливаются

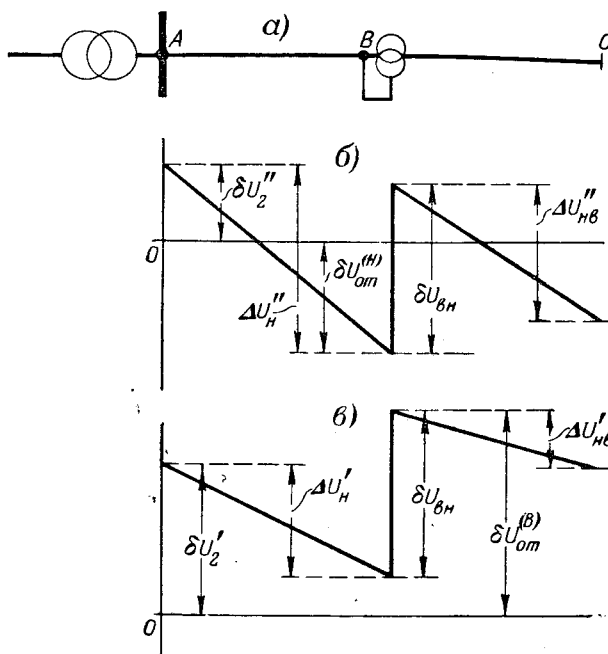


Рис. 7. К выбору вольтодобавочного трансформатора.

а — схема включения вольтодобавочного трансформатора; б — диаграмма напряжений для режима максимальных нагрузок; в — диаграмма напряжений для режима минимальных нагрузок.

вливаются в точках с наименьшим допустимым напряжением. По условиям режима максимальных нагрузок установка нерегулируемого вольтодобавочного трансформатора с добавкой до 10% (при допустимом отклонении напряжения $\pm 5\%$) всегда возможна.

По режиму максимальных нагрузок выбираем место установки вольтодобавочного трансформатора (рис. 7, а и б). Затем для режима минимальных нагрузок по графикам рис. 1, 2 и 3 определяем величины $\delta U'_2$ и $\Delta U'_n$ (рис. 7, в).

Максимально возможное значение величины добавочного напряжения $\delta U_{вн}$ определяется по следующему выражению:

$$\delta U_{вн} = \delta U_{от}^{(B)} - \delta U'_2 + \Delta U'_n \quad (12)$$

Выражение (12) непосредственно следует из диаграммы (рис. 7, в).

Если непосредственно за нерегулируемым вольтодобавочным трансформатором приемники электроэнергии отсутствуют и до ближайшего из них в режиме минимальных нагрузок потеря напряжения составляет $\Delta U'_{н.м.}$, то отклонение напряжения на вторичных зажимах вольтодобавочного трансформатора может быть повышено до величины $\delta U_{от}^{(B)} + \Delta U'_{н.м.}$

В рассматриваемом случае величина добавочного напряжения $\delta U_{вн}$ определяется по выражению

$$\delta U_{вн} = \delta U_{от}^{(B)} - \delta U'_2 + \Delta U'_n + \Delta U'_{н.м.} \quad (13)$$

Литература

1. Правила устройства электротехнических установок. Госэнергоиздат, 1949.
2. И. Р. Аркус. Уровни и отклонения напряжения у приемников промышленных предприятий. Материалы Всесоюзной научно-технической сессии по электроснабжению промышленных предприятий. Госстройиздат, 1950.
3. А. А. Глазун. Сети электрических систем. Госэнергоиздат, 1947.
4. В. Г. Холмский. Расчет городских электрических сетей при регулировании напряжения с помощью трансформаторов. 1-я Всесоюзная научно-техническая сессия по городским электрическим сетям, вып. II, Ленинград, 1948.
5. Н. К. Архипов. О потерях и регулировании напряжения в городских электрических сетях. Электричество, № 6, 1952.
6. Э. С. Иохвидов и Г. В. Сербиновский. О схемах городских электросетей в связи с многоэтажным строительством. Электричество, № 12, 1951.

[19. 5. 1952]



К вопросу об уравнивании мостов переменного тока

Профессор К. Б. КАРАНДЕЕВ и инж. Б. И. ШВЕЦКИЙ

Львовский политехнический институт

Мостовые схемы переменного тока получили ныне достаточно широкое распространение в измерительной практике. Однако их применение во многих случаях затрудняется довольно сложным и длительным процессом уравнивания, значи-

тельно более сложным, чем для мостов постоянного тока. В связи с этим представляется актуальным рассмотрение внутренних процессов уравнивания мостов переменного тока, и установление путей упрощения этих процессов, ведущих к ускорению измерений.

Подобные вопросы прямо или косвенно рассматриваются в ряде работ [Л. 1], однако должной ясности все еще нет. В некоторых из этих работ содержатся неверные выводы, и в большинстве отсутствует единая система понятий и терминологии. Так, например, встречающиеся определения „независимое регулирование“, „раздельный баланс“, „раздельное регулирование“, „раздельное уравнивание“ и т. п. разными авторами применяются совершенно произвольно, в результате чего одни и те же процессы называются по-разному, или, наоборот, одни и те же термины прилагаются к разным процессам. Попытка определения (физического и терминологического) основных понятий, характеризующих процесс уравнивания моста переменного тока, равно как и путей улучшения этого процесса, и является предметом настоящей работы.

Как известно, равновесие моста переменного тока описывается комплексным уравнением или системой двух уравнений (действительных и мнимых составляющих), благодаря чему уравнивание схемы требует одновременного регулирования не менее чем двух параметров. Для общего случая моста с четырьмя комплексными плечами выбор двух переменных возможен из шести составляющих трех известных плеч, что дает в итоге пятнадцать попарных сочетаний регулируемых параметров. На первый взгляд кажется, что любая из этих пар может быть принята для уравнивания, и поныне можно найти указания, что „достаточно отрегулировать во время измерения всего две величины (активную и реактивную составляющие) из шести“ [Л. 2, стр. 667]. Это утверждение справедливо с точки зрения формального удовлетворения конечного условия равно-

Даны формулировки основных понятий, связанных с уравниванием мостов переменного тока, а именно — сходимости, раздельного отсчета и раздельного уравнивания. Уточнены условия получения раздельного отсчета. Установлены новые условия получения раздельного уравнивания. Указаны пути построения указателей для раздельного уравнивания, которые, в частности, дают возможность решить вопрос об автоматически уравнивающихся мостах переменного тока для измерения комплексных сопротивлений.

весия. Однако выбор регулируемой пары параметров решающим образом влияет как на характер физического процесса достижения равновесия, так и на удобство получения результата измерения, т. е. на отсчет измеряемой величины; не

говоря уже о том, что в некоторых частных, практически очень важных, случаях мостовых схем имеются пары переменных параметров с помощью которых вообще нельзя уравновесить мост.

Рассмотрение этого влияния является существенной (но не единственной) составной частью изучения общей проблемы уравнивания мостов переменного тока. Как будет показано ниже, характер процесса уравнивания в сильной степени зависит от свойств указателя. Рассмотрение этих свойств и целесообразный выбор типа указателя является второй частью упомянутой проблемы.

Как нам кажется, общее изучение процесса уравнивания мостовых схем переменного тока и методики получения результата (отсчета) целесообразно разделить на три частных вопроса, определяемых понятиями „сходимость“, „раздельный отсчет“ и „раздельное уравнивание“. Совокупность этих трех понятий исчерпывающе описывают все стороны физического процесса уравнивания мостовой схемы, начиная с первой операции регулирования и кончая получением численного значения измеряемой величины. В соответствии с этим приступим теперь к поочередному рассмотрению этих трех понятий и определяемых ими процессов.

Сходимость мостов переменного тока. Процесс уравнивания моста переменного тока проще всего представить себе с помощью топографической диаграммы. На рис. 1 представлена в качестве примера схема индуктивного моста, а на рис. 2 его топографическая диаграмма, построенная для случая, когда входное сопротивление указателя бесконечно велико.

При построении диаграммы мы исходили из того, что измеряемое комплексное сопротивление находится в плече ac (R_1, L_1), а переменные параметры могут быть выбраны любые из оставшихся — R_2, R_3, R_4 и L_4 . Точки a, b, c и d на топографи-

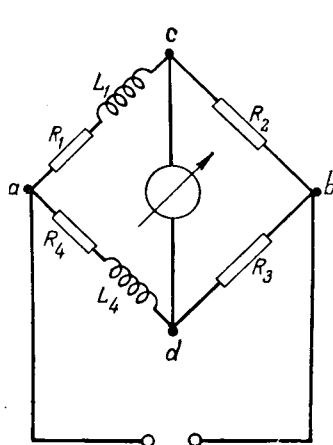


Рис. 1

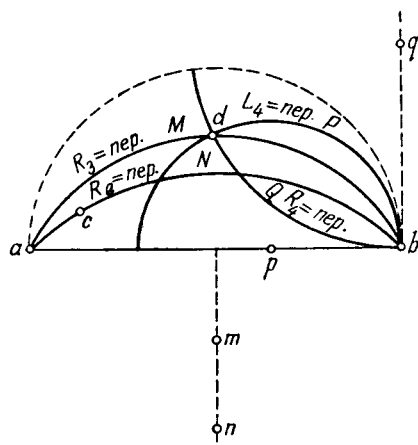


Рис. 2

ческой диаграмме представляют потенциалы¹ одноименных вершин моста. Линии M, N, P и Q — траектории потенциальных точек d и c при изменении соответствующих параметров (L_4 для траектории P, R_3 для M и т. п.).

Для четырехплечих мостов, включая и общий случай, когда все плечи являются комплексными сопротивлениями, как известно, траекториями потенциальных точек на топографической диаграмме являются окружности. Представленные на рис. 2 линии M, N, P и Q являются частями окружности, а точки t, n, p и q — соответствующие им центры.

На рис. 3 с помощью топографических диаграмм представлен процесс уравнивания при обычном нулевом указателе с бесконечно большим входным сопротивлением и разных парах переменных параметров.

Ознакомление с процессом уравнивания моста с помощью обычного нулевого указателя, включаемого в измерительную диагональ, позволяет сделать следующие заключения:

а) Процесс уравнивания моста переменного тока связан с поочередным регулированием двух переменных параметров, и вообще физически возможен только при выборе такой пары этих параметров, линии уравнивания которых пересекаются еще в одной, кроме a или b , точке. Так, например, уравновесить мост (рис. 1) путем изменения параметров R_2 и R_3 вообще невозможно.

б) Процесс приведения мостовой схемы к состоянию равновесия зависит от выбора переменных параметров и может быть охарактеризован некоторым понятием „сходимости“, под которым мы будем подразумевать способность схемы приближаться к равновесию.

в) Количество поочередных регулировок тем меньше, чем больше угол пересечения касательных к окружностям уравнивания (ср. рис. 3, а с рис. 3, б) — „угол сходимости“, являющийся численной характеристикой свойства „сходимости“ схемы.

¹ Термин „потенциал“ применен здесь в расширенном толковании, охватывающем также и гармонически изменяющиеся напряжения (см. К. А. Круг, Основы электротехники, т. II, стр. 183, 1946).

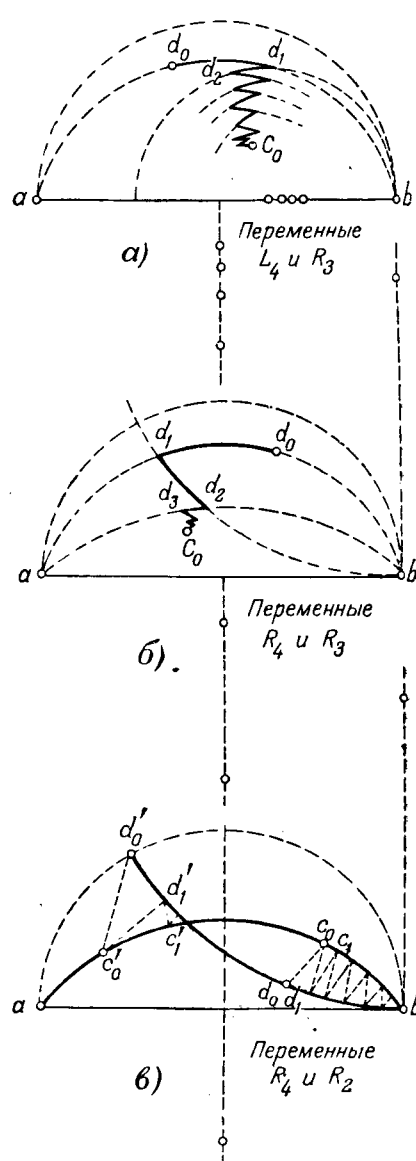


Рис. 3

Угол пересечения касательных к окружностям в процессе уравнивания не остается постоянным, увеличиваясь или уменьшаясь в известных пределах по мере приближения к точке равновесия. В связи с этим под „углом сходимости“ следует для определенности понимать угол пересечения касательных к окружностям уравнивания в точке равновесия.

г) В случае, когда переменные параметры расположены в разных ветвях моста (acb и adb), процесс уравнивания может привести к точкам ложного равновесия a или b . Для исключения этого необходимо перед началом уравнивания установить переменные параметры в определенные предельные положения (рис. 3, в).

Раздельный отсчет. После окончания процесса уравнивания моста производится отсчет

² Методику вычисления угла сходимости см. в приложении.

переменных параметров, а затем, пользуясь известным условием

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

разбивающимся в свою очередь на два уравнения — действительных и мнимых составляющих комплексных величин, определяем интересующие нас параметры измеряемого комплексного сопротивления Z_1 .

Таким образом, результаты измерений могут быть получены в каждом отдельном случае лишь после вычислений, часто достаточно громоздких.

Целесообразно выяснить возможности получения таких условий работы моста, при которых возможно определение интересующих нас параметров из отсчета по шкалам переменных параметров моста, т. е. получения условий раздельного отсчета.

Таковыми интересующими нас параметрами чаще всего являются любая пара из следующих трех величин: R_1 , X_1 и некоторой функции фазового угла сдвига ($\operatorname{tg} \varphi_1$, $\operatorname{tg} \delta_1$, $\cos \varphi_1$).

Рассмотрим, каким условиям должна удовлетворять схема моста с раздельным отсчетом. Для этого представим выражение для искомого Z_1 в виде:

$$R_1 + jX_1 = \frac{(R_2 + jX_2)(R_4 + jX_4)}{R_3 + jX_3},$$

иначе

$$R_1 + jX_1 = A + jB$$

или же ³

$$g_1 - jb_1 = A_1 + jB_1. \quad (1)$$

Из выражений (1) можно сделать следующее заключение об условиях получения раздельного отсчета: раздельный отсчет в мостовой схеме будет получен тогда, когда члены (1) A и B будут содержать хотя бы по одному различному параметру, который сможет быть сделан переменным и проградуирован в единицах R_1 и X_1 . Что касается φ_1 , то раздельный отсчет этой величины (либо $\operatorname{tg} \varphi$, $\operatorname{tg} \delta_1$ и т. п.) может быть получен при условии, если выражение $\frac{B}{A} = \operatorname{tg} \varphi$ содержит хотя бы один параметр, не входящий либо в A , либо в B .

Как показали проведенные нами преобразования для различных схем мостов при различных сопротивлениях плеч (при последовательном и параллельном включении составляющих комплексных величин), условиям раздельного отсчета по двум параметрам не удовлетворяют мосты с четырьмя ⁴ и тремя комплексными плечами; раздельный отсчет по двум параметрам может быть получен лишь в схемах мостов с двумя комплексными плечами, у которых расположение и характер этих комплексных сопротивлений должны быть следующими:

а) При расположении комплексных сопротивлений в смежных плечах оба они по своей схеме должны быть одного и того же характера, т. е. оба должны состоять либо из последовательно соединенных, либо из параллельно соединенных составляющих. Таким образом, если представить, что измеряемое комплексное сопротивление состоит из параллельно соединенных сопротивлений, то необходимо и в смежном плече соединить таким же образом составляющие комплексного сопротивления.

б) При расположении комплексных сопротивлений в противолежащих плечах оба они должны быть разного характера, т. е. составляющие комплексного сопротивления должны быть в одном плече последовательно соединенные, а в другом, — параллельно соединенные.

Изложенные здесь условия получения раздельного отсчета не совпадают в общем с выводами, полученными Фергюсоном [Л. 3]. В работе Фергюсона доказывается, что для получения раздельного отсчета достаточно только иметь в мосте два комплексных плеча или два плеча, отношение или произведение которых есть действительное или мнимое число. Легко, однако, показать, что мост, имеющий два некомплексных плеча, у которого не выполнены сформулированные нами выше условия, не отвечает возможности получения раздельного отсчета. То-есть, в общем случае, наличие двух некомплексных плеч является условием, недостаточным для обеспечения раздельного отсчета.

Отметим попутно, что предполагаемое при этом [Л. 3] нахождение переменных параметров в одном плече также не является обязательным.

Нет необходимости доказывать важность и удобство раздельного отсчета — об этом свидетельствует, в частности, тот факт, что почти все применяющиеся на практике мосты представляют собой схемы именно с таким отсчетом.

Заслуживает внимания также вопрос о выборе переменных параметров. В мостах с раздельным отсчетом таковыми могут быть активная и реактивная составляющие плеча сравнения и в этом случае могут быть непосредственно определены активная (R_1) и реактивная (L_1 или C_1) составляющие измеряемого комплексного сопротивления. Однако наличие реактивного сопротивления в качестве переменного представляет собой известное неудобство с чисто технической стороны⁵, в связи с чем весьма часто в качестве второго переменного выбирается активное сопротивление другого плеча.

В этом случае непосредственному отсчету поддаются R_1 или X_1 (L_1 , C_1) и соотношение между ними (добротность катушки $Q_1 = \frac{\omega L_1}{R_1} = \operatorname{tg} \varphi_1$, или угол потерь конденсатора $\operatorname{tg} \delta_1 = \omega C_1 R_1 = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_1}$), откуда весьма просто, при же-

³ В ряде случаев нас могут интересовать g_1 и b_1 .

⁴ За исключением случаев, когда произведение двух противолежащих или отношение двух смежных плеч является действительным числом, что делает эти схемы равноценными мостам с двумя комплексными плечами.

⁵ Хотя с точки зрения сходимости это наиболее удачный вариант, поскольку угол пересечения линий уравновешивания в этом случае равен 90° .

лании, может быть определена недостающая составляющая измеряемого комплексного сопротивления.

Раздельное уравнивание мостов переменного тока. Как уже было показано, уравнивание моста переменного тока с помощью нулевого указателя производится путем поочередной регулировки переменных параметров. Этот процесс является зачастую весьма длительным и утомительным, требующим при этом от оператора достаточной квалификации и опыта. В ряде случаев при плохой сходимости или возможности привести схему к точке ложного равновесия малоопытный измеритель вообще не сможет добиться равновесия моста.

Возникает вопрос, нельзя ли как-нибудь упорядочить процесс уравнивания, ускорить его, устанавливая переменные параметры в положения, соответствующие равновесию моста при помощи одной регулировки для каждого из них. Иначе говоря, нельзя ли получить так называемое „раздельное уравнивание“.

Существующие до настоящего времени представления о раздельном уравнивании, судя по опубликованным работам, в общем неверны. Так, под раздельным уравниванием понимается независимое приведение к нулю действительной и мнимой составляющих напряжения неравновесия [Л. 4] или независимое уравнивание действительной и мнимой составляющих определителя ⁶ моста и т. п., что является принципиально неверным. В этом нетрудно убедиться, если обратиться к любой топографической диаграмме, где представлен процесс уравнивания. В самом деле, при регулировании любого переменного параметра напряжение неравновесия U_{cd} меняет в общем свою величину и направление. Следовательно, нельзя этот вектор или связанный с ним вектор определителя моста отнести к какой-нибудь системе ортогональных осей так, чтобы регулирование одного переменного влияло бы только на величину одной составляющей (скажем, активной), а второй параметр влиял бы только на реактивную составляющую напряжения неравновесия.

Иная картина имеет место в комплексных компенсаторах переменного тока, где измерение вектора напряжения осуществляется путем создания в специальных цепях компенсирующего вектора, составленного из двух ортогональных составляющих [Л. 6]. Весьма возможно, что причиной указанной выше путаницы в вопросе раздельного уравнивания и является механическое перенесение совершенно правильной методики из области компенсаторов в область мостовых схем.

Исходя из неправильных отправных точек зрения, авторы упомянутых работ пришли, естественно, к неправильным выводам и об условиях получения раздельного уравнивания. В каче-

стве необходимых для этого условий ими принимается наличие того или иного количества некомплексных плеч и, в частности, „доказывается“, что общий случай моста с четырьмя комплексными плечами принципиально не может быть уравновешен раздельно.

В принципе же решение вопроса раздельного уравнивания вытекает из рассмотрения топографической диаграммы, где проведены окружности уравнивания (рис. 4).

В самом деле, если бы мы располагали специальным указателем, с помощью которого можно было бы при регулировании R_3 отметить момент прихода точки d_0 в точку d' , а не d_1 , как это получается при обычном нулевом указателе, то при переходе на регулирование вторым переменным параметром R_4 точка d' будет приведена по окружности N_1 непосредственно в точку c_0 — точку равновесия моста, что и представлено на рис. 4. В рассмотренном случае уравнивание будет произведено по двум основным окружностям уравнивания M_1 и N_1 , проходящим через начальные положения точек d_0 и c_0 .

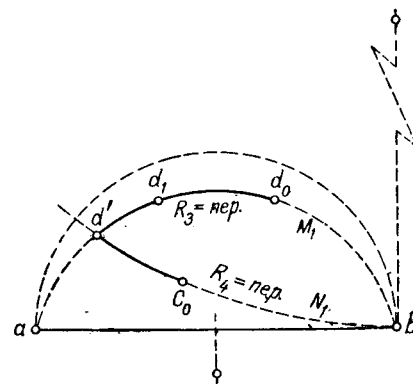


Рис. 4

Легко показать, что и в случае, когда переменные параметры находятся в разных ветвях моста, т. е. когда для уравнивания необходимо точки d_0 и c_0 привести к общей точке, описанный здесь принцип получения раздельного уравнивания остается действительным.

Таким образом, единственным условием получения раздельного уравнивания является наличие специального указателя, определяющего точку пересечения основных окружностей уравнивания, а не то или иное число некомплексных плеч в схеме моста.

Раздельному уравниванию поддается также и общий случай мостовой схемы, имеющей четыре комплексных плеча; так, характер линий уравнивания остается тем же, что и в частном случае, представленном на рис. 4. Проведенная авторами экспериментальная проверка полностью подтвердила это.

На основании изложенного можно сформулировать понятие раздельного уравнивания моста переменного тока более строго в следующей форме.

Раздельным называется такое уравнивание, при котором равновесие моста достигается

⁶ Под термином „опредетель моста“ понимается выражение $Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4 = H$.

вполне определенного характера. Более того, при выполнении этих операций известно также необходимое направление регулирования переменных параметров.

2. В силу простоты выполнения этих операций не требуется особой квалификации от оператора.

3. Принцип раздельного уравнивания может быть положен в основу автоматически уравнивающих мостов переменного тока.

Приложение. Методика вычисления угла сходимости. „Угол сходимости“ можно определить графически, непосредственно из топографических диаграмм или аналитически. Приведем один из простейших примеров аналитического метода.

Напряжение неравновесия в измерительной диагонали может быть выражено, как известно, следующим образом:

$$U_{cd} = U_{ab} \frac{Z_1 Z_3 - Z_2 Z_4}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} = U_{ab} \frac{H}{D},$$

где U_{ab} — подведенное к мосту напряжение питания;

$Z_1 \dots Z_4$ — сопротивления плеч моста (в общем случае — комплексные).

Рассмотрим, в качестве исходного, положение равновесия моста, при котором $H=0$ и $U_{cd}=0$. При изменении переменных параметров моста (обозначим их через m и n), потенциальные точки c и d будут перемещаться по окружностям и появится напряжение неравновесия U_{cd} . Производные $\frac{\partial U_{cd}}{\partial m}$ и $\frac{\partial U_{cd}}{\partial n}$ определяют направление касательных к окружностям уравнивания параметров m и n в точке равновесия моста, а разность углов наклона этих касательных будет равна искомому „углу сходимости“.

Таким образом:

$$\frac{\partial U_{cd}}{\partial m} = \frac{U_{ab}}{D^2} \left(D \frac{\partial H}{\partial m} - H \frac{\partial D}{\partial m} \right).$$

Поскольку нас интересует значение производной в точке равновесия моста, где $H=0$, то

$$\left. \frac{\partial U_{cd}}{\partial m} \right|_{H=0} = \frac{U_{ab}}{D} \cdot \frac{\partial H}{\partial m}.$$

Аналогично, при изменении n

$$\left. \frac{\partial U_{cd}}{\partial n} \right|_{H=0} = \frac{U_{ab}}{D} \cdot \frac{\partial H}{\partial n}.$$

Угол сходимости равен разности углов векторов

$$\left. \frac{\partial U_{cd}}{\partial m} \right|_{H=0} \text{ и } \left. \frac{\partial U_{cd}}{\partial n} \right|_{H=0}$$

и при исключении общего и неизменного угла вектора $\frac{U_{ab}}{D}$ может быть выражен:

$$\gamma = \text{углу вектора } \frac{\partial H}{\partial m} - \text{углу вектора } \frac{\partial H}{\partial n}.$$

Вычисление „угла сходимости“ на основании приведенного выражения сводится, таким образом, к определению величин $Z_1 \dots Z_4$ при $H=0$ и определению векторов $\frac{\partial H}{\partial m}$ и $\frac{\partial H}{\partial n}$ для определенных малых приращений переменных параметров Δm и Δn .

Литература

1. К. Б. Карандеев. Методы электрических измерений. Госэнергоиздат, 1952.
2. Г. Г. Гинкин. Справочник по радиотехнике. Госэнергоиздат, 1948.
3. J. Ferguson. Classification of Bridge Methods of Measuring Impedances. Bell System Techn. Journal, v. 12, 1933.
4. H. W. Lamson. An Electronic Null Defector for Impedance Bridges. The Review of Scientific Instruments, v. 9, № 9, стр. 272, 1938.
5. G. B. Hoadly. The Science of Balancing an Impedance Bridge J. Fr. I., v. 228, 1939.
6. Л. Ф. Куликовский. Потенциометр переменного тока комплексного типа с ферродинамическим нуль-индикатором. Электричество, № 6, 1947.

[6. 6. 1950]



К расчету переходных процессов в цепях с управляемыми выпрямителями

А. А. БУЛГАКОВ

Институт автоматики и телемеханики АН СССР

Введение. В современных системах с автоматическим управлением и регулированием широко применяются в качестве преобразователей и усилителей мощности управляемые вентили — тиратроны, ртутные выпрямители с сеткой и игнитроны.

В связи с проблемами великих строек коммунизма открываются новые перспективы применения управляемых выпрямителей в качестве быстродействующих возбuditелей или подвозбудителей мощных генераторов электрических станций.

Для проектирования и исследования систем с управляемыми выпрямителями необходимо иметь достаточно простые и удобные методы расчета переходных процессов. Этому вопросу был посвящен ряд работ [Л. 1... 7]. Излагаемые в них методы расчета имеют свои особенности и свои области целесообразного применения.

Здесь мы даем вывод уравнений, описывающих поведение выпрямителя вместе с фазоуправляющим устройством при переходных процессах, вызванных произвольным изменением входного сигнала управления.

Такие характеристики необходимы, в частности, для расчета замкнутых систем автоматического управления и регулирования, так как в этом случае вид зависимости управляющего сигнала от времени не может быть задан, а определяется только при расчете замкнутой цепи в целом.

Рассматривается общий случай работы выпрямителя на комплексную нагрузку, состоящую из противо-э. д. с., которая может изменяться во времени по любому закону, и линейной цепи из сопротивлений, индуктивностей и емкостей. Анализ ограничивается режимом непрерывного тока и переходными процессами, длительность которых достаточно велика по сравнению с периодом сети.

Приняты следующие упрощающие допущения: не учитываются сопротивления на стороне переменного тока и перекрытие анодов, падение напряжения в дуге принимается постоянным; время ионизации и деионизации не учитывается. Эти упрощения сохраняют точность результатов, достаточную для решения практических задач в интересующей нас области применений.

Рассматривается управление мостным выпрямителем в единой системе с фазоуправляющим устройством при любом законе изменения сигнала на входе системы и при комплексной нагрузке на выходе выпрямителя, работающего в области непрерывного тока. Дается вывод простых аналитических выражений для практических расчетов переходных процессов в сложных, в частности, замкнутых цепях с управляемыми выпрямителями. Приводятся эквивалентные схемы замещения выпрямителя с фазоуправляющим устройством, облегчающие расчеты и структурный анализ сложных цепей управления.

1. О фазовом управлении выпрямителями.

В теории управляемых выпрямителей рассматривается зависимость выпрямленного напряжения от угла зажигания, т.е. статическая регулировочная характеристика выпрямителя. В действительности угол зажигания является

внутренним параметром единой системы, состоящей из собственно выпрямителя и того или иного устройства для фазового управления зажиганием. Непосредственно угол зажигания зависит от значения управляющего сигнала на входе устройства фазового управления: угловой координаты ротора индукционного фазорегулятора, тока подмагничивающей обмотки индуктивного мостикового фазорегулятора или пик-трансформаторов, напряжения смещения постоянного или переменного тока и т. д.

Поэтому для решения нашей задачи необходимо сначала рассмотреть зависимости угла зажигания от управляющего сигнала при любом законе его изменения во времени, т.е. динамические характеристики фазоуправляющих устройств.

В процессе управления выпрямителем управляющий сигнал изменяется непрерывно, но зажигание происходит один раз в каждый положительный полупериод анодного напряжения. Следовательно, угол зажигания является дискретной функцией управляющего сигнала, а фазоуправляющее устройство — импульсной цепью [Л. 8].

Зависимость угла зажигания от управляющего сигнала определяется физическими и конструктивными свойствами каждого устройства управления зажиганием. Кроме этого, угол зажигания зависит от условий работы самого выпрямителя — его анодного напряжения, частоты, температуры и пр. — и от его нагрузки, главным образом от величины противо-э. д. с. Побочные влияния, снижающие четкость зажигания, стремятся ослабить или исключить путем увеличения крутизны зажигающего фронта сетевого напряжения. Если эти условия соблюдены, что мы будем полагать в дальнейшем, то обратным влиянием режима работы выпрямителя на угол зажигания можно пренебречь и рассматривать цепь фазоуправляющее устройство — выпрямитель как два звена с направленной передачей воздействий: управляющий сигнал — угол зажигания — напряжение выпрямителя.

В подавляющем большинстве устройств управления зажиганием имеется такое промежуточное воздействие, относительно которого изменение фазы зажигающего напряжения можно считать безинерционным и принять это воздействие за управляющее, как мы и будем поступать в дальнейшем. Например, в случае пик-трансформаторов таким промежуточным воздействием можно считать ток подмагничивающей обмотки вместо напряжения на ее зажимах. Инерцию же промежуточного сигнала относительно входного можно учитывать инерционной цепью соответствующего вида, например индуктивно-омической в случае пик-трансформатора.

Интересующие нас соотношения рассмотрим применительно к двум основным и наиболее типичным методам сеточного управления:

- 1) изменением фазы сеточного напряжения („горизонтальное“ управление — рис. 1, а);
- 2) смещением кривой сеточного напряжения относительно нуля („вертикальное“ управление — рис. 1, б).

В обоих случаях в соответствии с принятым выше допущением каждый момент зажигания определяется точкой перехода периодической кривой сеточного напряжения через нуль из отрицательной области в положительную:

$$t = t_{zk} \text{ при } u_{ct} = 0; \quad -\frac{du_{ct}}{dt} > 0. \quad (1,1)$$

Это условие определяет и значение угла зажигания очевидным соотношением:

$$\alpha_k = \omega t_{zk} - 2k\pi. \quad (1,2)$$

При первом, фазовом методе управления и синусоидальном сеточном напряжении будет:

$$u_{ct} = E_{cm} \sin[\omega t - \theta(t)] = 0. \quad (1,3)$$

Здесь $\theta(t)$ — фаза зажигающего фронта сеточного напряжения, изменяющаяся в зависимости от времени по произвольному закону. Иначе говоря, при фазовом управлении устройство сеточного управления модулирует фазу сеточного напряжения.

Моменты зажигания t_{zk} согласно (1,1) и (1,3), являются решениями уравнения

$$\omega t - \theta(t) = 2k\pi, \quad (1,4)$$

где k — любое целое число, указывающее порядковый номер зажигания.

На рис. 2 показано графическое решение этого уравнения относительно моментов зажигания t_{zk} и значений угла зажигания α_k . Из (1,2) и (1,4) следует, что значения угла зажигания α_k являются дискретными точками заданной непрерывной функции фазы сеточного напряжения $\theta(t)$:

$$\theta(t) = \alpha_k \text{ при } t = t_{zk}. \quad (1,5)$$

Точно такие же соотношения имеют место и при фазовом управлении импульсным сеточным напряжением, например от пик-трансформаторов, а также при управлении игнитронами.

В частном случае линейного изменения фазы θ во времени, например по убывающему закону,

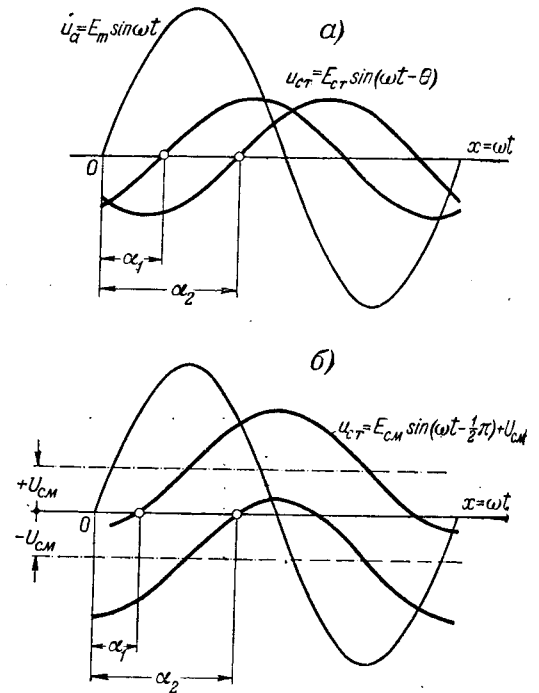


Рис. 1.

соответствующему возрастанию выпрямленного напряжения

$$\theta = \theta_0 - \zeta t, \quad (1,6)$$

сеточное напряжение представится чистой синусоидой с частотой $(\omega + q)$, и из уравнений (1,6), (1,4) и (1,2) находим:

$$t_{zk} = \frac{\theta_0 + 2k\pi}{\omega + q}; \quad \alpha_k = \frac{\omega}{\omega + q} \theta_0 - \frac{q}{\omega + q} 2k\pi. \quad (1,7)$$

Возможные границы изменения угла зажигания α не совпадают с более широкими границами изменения фазы θ и определяются „областью управляемости“ выпрямителя [Л. 7]

$$\alpha_1 < \alpha < \alpha_2, \quad (1,8)$$

которая зависит от числа фаз выпрямителя, падения напряжения в дуге и значения противо-э. д. с., если она имеется в цепи.

В случае m -фазного выпрямителя все рассуждения остаются справедливыми для каждого

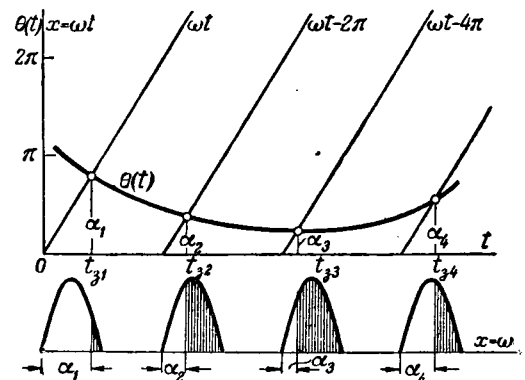


Рис. 2.

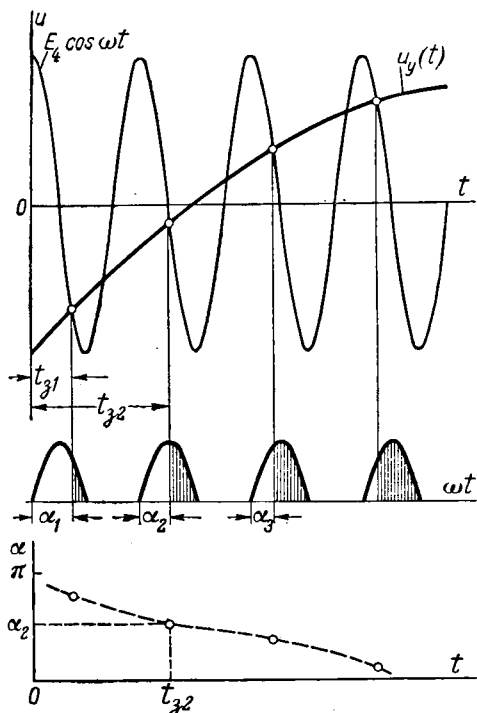


Рис. 3.

анода, но фазные углы и сеточные напряжения, а также начальные ($t=0$) координаты углов зажигания будут смещены у одного анода относительно другого на угол

$$2\pi = \frac{2\pi}{m} = \omega T, \quad (1,9)$$

где m — число фаз (действующих анодов) выпрямителя;

$$T = \frac{2\pi}{\omega m} \quad (1,10)$$

— интервал, равный времени горения одного анода в неуправляемом выпрямителе или при зажигании на нижней границе области управляемости и полном отсутствии противо-э. д. с. в цепи нагрузки выпрямителя. Будем называть этот интервал основным.

При управлении смещением (рис. 1,б) сеточное напряжение является суммой двух составляющих:

1) синусоидальной составляющей постоянной амплитуды

$$u_1 = -E_{cm} \cos \omega t, \quad (1,11)$$

отстающей по фазе на угол $\frac{1}{2} \pi$ от анодного напряжения $u_a = E_{cm} \sin \omega t$;

2) управляющего сеточного напряжения постоянного тока, заданного независимой функцией времени $u_y = f(t)$.

Кривая результирующего сеточного напряжения

$$u_{cm} = u_c + u_y = -E_{cm} \cos \omega t + u_y(t) \quad (1,12)$$

при $u_y \geq 0$ поднимается или опускается и изменяет угол зажигания.

Моменты зажигания, т. е. абсциссы точек $t = t_{zk}$, определяются трансцендентным уравнением (рис. 3)

$$E_{cm} \cos \omega t = u_y(t), \quad (1,13)$$

а значения угла зажигания — соотношением (1,2). Таким образом, если взять непрерывную функцию

$$a = \omega t - 2k\pi, \quad (1,14)$$

то в ней переменная a получит значения угла зажигания $a = a_k$ в точках $t = t_{zk}$. Следовательно, если в левой части уравнения (1,13) заменить переменную t согласно (1,14) выражением

$$E_{cm} \cos a = u_y(t) \quad (1,15)$$

и решить его относительно непрерывной переменной

$$a = \arccos \frac{u_y(t)}{E_{cm}}, \quad (1,16)$$

то частные значения этой функции при $t = t_{zk}$ дадут дискретные значения угла зажигания:

$$a_k = \arccos \frac{u_y(t_{zk})}{E_{cm}}. \quad (1,17)$$

Таким образом, как при фазовом управлении, так и при управлении смещением значения угла зажигания являются дискретными точками некоторой области непрерывной, реальной или фиктивной, кривой фазы управляющего фронта сеточного напряжения. Распределение точек зажигания на кривой фазы и моментов зажигания во времени зависит от свойств фазоуправляющего устройства и от закона изменения его входного управляющего сигнала во времени.

Вследствие дискретного характера процесса управления зажиганием (независимо от инерционности цепи управления) имеет место отставание угла зажигания от управляющего сигнала, так как воздействие на напряжение в интервалах между дискретными точками зажигания невозможно. Величина такого отставания не может быть больше области управляемости [уравнение (1,8)].

2. Переходные процессы. В общем случае в цепи нагрузки выпрямителя могут действовать следующие э. д. с.: 1) выпрямителя; 2) постоянная э. д. с., учитывающая падение напряжения в дуге и 3) нагрузки.

Под э. д. с. выпрямителя мы понимаем [Л. 1] выпрямленное напряжение при холостом ходе в области непрерывного тока. Электродвижущая сила выпрямителя представляет собой сплошную кусочно-гладкую функцию времени, состоящую из отрезков синусоид напряжения сети или вторичного напряжения трансформатора выпрямителя, поскольку мы пренебрегли сопротивлениями на стороне переменного тока. Согласно принципу наложения ток нагрузки выпрямителя можно разложить на две составляющие:

$$i = i_B + i_H, \quad (2,1)$$

где i_B — составляющая от э. д. с. выпрямителя; i_H — составляющая от суммы э. д. с. дуги и нагрузки.

Соответственно и цепь выпрямителя можно разложить на две цепи (рис. 4). Вычисление составляющей тока от э. д. с. дуги и нагрузки может быть выполнено любым известным способом, и в дальнейшем мы рассматриваем только первую составляющую выпрямителя.

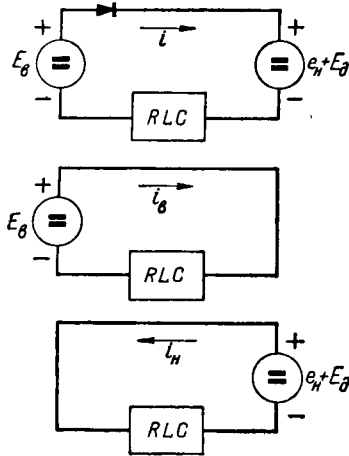


Рис. 4.

Кривую э. д. с. выпрямителя как при постоянном, так и при изменяемом значении угла зажигания на основании принципа наложения можно разделить на две составляющие — среднего значения выпрямленного напряжения и переменную („колебательную“):

$$E_B = E_c + E_{nep}. \quad (2,2)$$

Соответственно и составляющая тока выпрямителя разложится на две новые составляющие:

$$i_B = i_c + i_{nep}. \quad (2,3)$$

Таким образом, в общем случае переменного угла зажигания, но в области непрерывного тока, вычисление переходных процессов в главной цепи выпрямителя может быть сведено к разложению э. д. с. выпрямителя на составляющие и к вычислению токов от каждой из этих составляющих.

Следовательно, выпрямитель, работающий в области непрерывного тока, может быть представлен эквивалентной цепью, состоящей из включенных последовательно полного сопротивления нагрузки и двух генераторов э. д. с.: один — генератор постоянного тока, э. д. с. которого является гладкой функцией угла зажигания, другой — генератор несинусоидальных непериодических колебаний.

Амплитуда и продолжительность каждого колебания зависят от числа фаз выпрямителя, частоты сети, а также от угла зажигания. Продолжительность каждого колебания ограничена интервалом области управляемости (1,8).

В системах автоматического управления выпрямители обычно включены в цепь воздействий последовательно с инерционными звеньями. Полное сопротивление нагрузки выпрямителя и звенья

цепи управления можно рассматривать как многозвенный фильтр, частота среза которого в большинстве случаев значительно ниже основной частоты переменной составляющей э. д. с. выпрямителя:

$$f_o = \frac{f_{сemu}}{m} = \frac{1}{T}. \quad (2,4)$$

Поэтому с достаточной для практических расчетов точностью переменной составляющей э. д. с. выпрямителя можно пренебречь и оставить в эквивалентной цепи только генератор постоянного тока.

Использование эквивалентного генератора э. д. с. имеет здесь более глубокий смысл, чем простой символ, так как переходные процессы в цепях прямого тока ртутного выпрямителя и якоря генератора постоянного тока имеют далеко идущую аналогию (пульсации э. д. с. на коллекторе, коммутация тока и др.).

Изложенная трактовка справедлива для переходных „макропроцессов“, время установления которых достаточно велико по сравнению с основным интервалом горения, т. е. со временем переходных „микропроцессов“.

Необходимо теперь выделить из э. д. с. выпрямителя ее среднее значение.

В частном случае постоянного угла зажигания $\alpha = \text{const}$ такое разложение общеизвестно.

При переходных режимах с постоянным углом зажигания α — включении управляющего сигнала, замыкании цепи нагрузки или изменении угла зажигания от одного постоянного значения до другого — ток в цепи нагрузки выпрямителя можно вычислить, пользуясь интегралом Дюамеля или операторным методом.

Составляющая тока от среднего значения напряжения

$$i_c(t) = E_c A(0) + E_c A(t). \quad (2,5)$$

В простейшем случае нагрузки из последовательно соединенных индуктивности и омического сопротивления

$$A(t) = \frac{1}{R} \left[1 - e^{-\frac{t}{T}} \right]; A(0) = 0; T = \frac{L}{R}, \quad (2,6)$$

и

$$i_c = \frac{E_c}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (2,7)$$

Эта зависимость была установлена автором экспериментально в 1940 г. [Л. 1] и подтверждена осциллограммой на рис. 5, где на кривую тока нанесена точная расчетная экспонента со

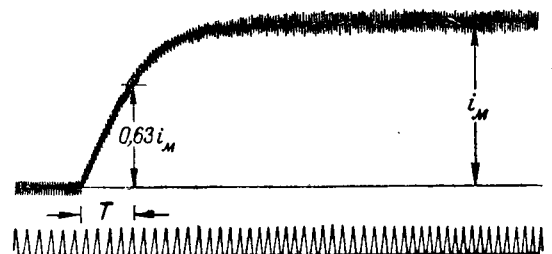


Рис. 5.

ставляющей тока, обусловленной средним значением напряжения, и видны пульсации переменной составляющей.

Рассмотрим теперь общий случай переменного угла зажигания и покажем, что и на этот случай можно распространить известную зависимость для среднего значения э. д. с. выпрямителя при постоянном значении угла зажигания:

$$E_c = E_m C_\alpha \cos \alpha, \quad (2,8)$$

где

$$C_\alpha = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}.$$

Переменную α следует рассматривать как фиктивную непрерывную промежуточную функцию управляющего сигнала [например (1,16)], который в свою очередь является функцией времени, а E_c — как непрерывную функцию угла α .

Докажем, что эта функция $\alpha(t)$ содержит точки, равные реальным значениям угла зажигания в каждом интервале горения, и найдем соответствующие им средние значения напряжения, затем установим выражение для этих значений непосредственно через управляющий сигнал при любом законе его изменения во времени, исключив промежуточную переменную α .

Чтобы установить значения ординат $E_c(\alpha)$ (2,8), разделим ось времени на одинаковые интервалы, равные времени горения одного анода в неуправляемом выпрямителе, т. е. основному интервалу¹ T [см. (1,10)]. Точки деления интервалов выберем так, чтобы каждый интервал не мог содержать более одного зажигания. Для этого они должны соответствовать точкам пересечения синусоид e_α (рис. 6). Действительно, легко проверить, что если границы интервалов перенести влево или вправо от этих точек на бесконечно малое приращение, то в одном интервале может оказаться два зажигания.

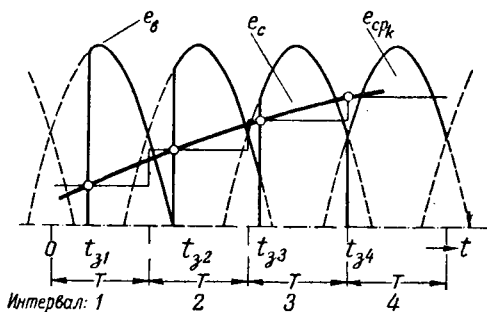


Рис. 6.

При этих условиях среднее значение э. д. с. за любой один интервал T в общем случае переменного угла зажигания выразится той же функ-

цией угла зажигания, что и в случае постоянного угла:

$$E_{cp_k} = E_m C_\alpha \cos \alpha_k, \quad (2,9)$$

где α_k — угол зажигания в k -том интервале.

Сопоставляя (2,8) и (2,9) и имея в виду соотношение (1,2): $\alpha_k = \omega t_{zk} - 2k\pi$, видим, что

$$E_c(\alpha) = E_{cp_k} \text{ при } \alpha = \alpha_k, t = t_{zk}. \quad (2,10)$$

Иначе говоря, ординаты кривой $E_c(\alpha)$ при частных значениях переменной α , равных углу зажигания α_k в данных интервалах, имеют смысл средних интервальных значений э. д. с. в этих интервалах и относятся к соответствующим моментам зажигания. Таким образом, составляющая $E_c(t)$ в принятом определении (2,10) проходит в каждом интервале через точку с координатами E_{cp_k}, t_{zk} при значении промежуточной переменной $\alpha = \alpha_k$ (рис. 6). Остается определить E_c непосредственно через управляющий сигнал, исключив промежуточный дискретный параметр — угол зажигания.

В случае фазового управления, как это было показано выше (1,5), угол зажигания в k -том интервале

$$\alpha_k = \theta(t_{zk}).$$

Подставив уравнение (1,5) в (2,8) и учитывая (1,2), получим выражение для $E_c(t_{zk})$ через управляющий сигнал:

$$E_c(t_{zk}) = E_m C_\alpha \cos \theta(t_{zk}). \quad (2,11)$$

Следовательно, искомое уравнение будет:

$$E_c(t) = E_m C_\alpha \cos \theta(t), \quad (2,12)$$

т. е. при фазовом управлении среднее значение э. д. с. E_c выпрямителя изменяется пропорционально косинусу фазного угла θ сетевого напряжения. Коэффициент передачи выпрямителя с фазорегулятором пропорционален синусу фазного угла θ :

$$k = \frac{\partial E_c}{\partial \theta} = -E_m C_\alpha \sin \theta. \quad (2,13)$$

В случае вращающихся индуктивных фазорегуляторов фазный угол $\theta(t)$ пропорционален (или равен — у двухполосного фазорегулятора) угловой координате ротора. В случае пик-трансформаторов с подмагничиванием, мостиковых и подобных фазорегуляторов фаза $\theta(t)$ является его выходной переменной — функцией входного сигнала (подмагничивающего тока и т. п.), в общем случае нелинейной и инерционной. При расчете переходных процессов в цепях с усилителями фазный угол $\theta(t)$ является промежуточным воздействием и необходимо учитывать динамические характеристики фазорегулятора как входного звена усилителя.

Точно так же для случая управления сеточным смещением, подставив выражение α_k из (1,7) в (2,8), получим:

$$E_c(t_{zk}) = C_\alpha \frac{E_m}{E_{cm}} u_{cm}(t_{zk}). \quad (2,14)$$

¹ Можно показать, что если интервалы взять иначе, например равными продолжительности горения одного анода, то однозначной зависимости от управляющего параметра получить нельзя.

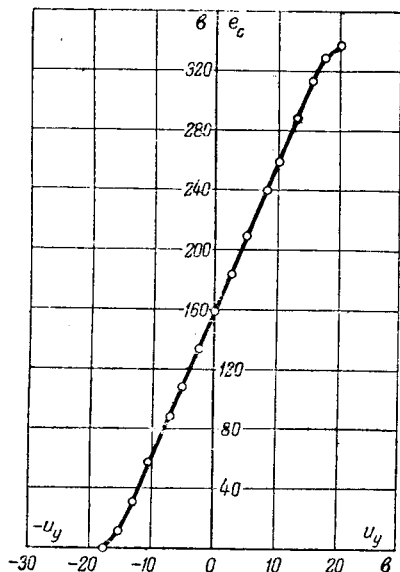


Рис. 7.

Отсюда непрерывное уравнение гладкой составляющей будет:

$$E_c(t) = C_v \frac{E_m}{E_{cm}} u_{cm}(t). \quad (2,15)$$

Иначе говоря, составляющая E_c изменяется пропорционально управляющему сигналу—напряжению смещения.

Коэффициент пропорциональности

$$k = C_v \frac{E_m}{E_{cm}} \quad (2,16)$$

является коэффициентом усиления по напряжению усилителя мощности. Линейный характер зависимости подтверждает экспериментальная кривая (рис. 7), снятая на двухфазном тиратронном усилителе, нагруженном вольтметром.

Заключение. При исследовании переходных процессов в цепях автоматического управления и регулирования с управляемыми выпрямителями выпрямитель следует рассматривать в едином комплексе с устройством для управления зажиганием как ионный усилитель мощности. Угол зажигания в такой системе является промежуточной дискретной функцией непрерывного входного сигнала.

Усилитель мощности, работающий на противо-э. д. с. и линейную комплексную нагрузку, в области непрерывного тока, можно представить эквивалентной схемой замещения (рис. 8), состоящей из следующих элементов: 1—генератора постоянного тока, представляющего собственно

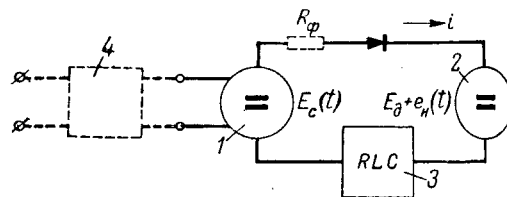


Рис. 8.

выпрямитель с безинерционной частью фазоуправляющего устройства; 2—генератора постоянного тока, учитывающего противо-э. д. с. нагрузки плюс (или минус—в инверторном режиме падение напряжения в дуге); 3—комплексной пассивной цепи нагрузки из линейных элементов R, L, C ; 4—звена, представляющего инерционную часть фазоуправляющего устройства, если она имеется.

Для уточнения расчетов и достижения лучшего соответствия между переходным и стационарным режимами предлагалось [Л. 1] ввести в цепь выпрямленного тока схемы замещения эквивалентное сопротивление, приблизительно учитывающее влияние сопротивлений на стороне переменного тока и коммутацию анодов:

$$R_\phi = R_T + X_T \frac{m}{2\pi},$$

где R_T и X_T —активное и индуктивное сопротивления трансформатора, приведенные ко вторичной стороне.

Для расчета переходных процессов дается вывод простых непрерывных функций, выражающих э. д. с. эквивалентного генератора, представляющего собой выпрямитель, в зависимости от входного управляющего сигнала для двух основных способов фазового управления.

Литература

1. А. А. Булгаков. Переходные режимы электроприводов с управляемыми выпрямителями. Бюллетень ВЭИ № 3, 1941.
2. Chin. P. Walter G. Transient Response of Controlled Rectifier-Circuits. Transactions AIEE. 1945.
3. Р. Д. Лейтес. Нестационарные процессы в цепи с вентильным элементом и смешанной нагрузкой. Электричество, № 5, 1948.
4. Э. А. Меерович. Расчет переходных процессов в сложных электрических цепях. Известия АН СССР ОТН № 10, 1950.
5. З. Б. Голембо. Расчет переходных процессов в цепях с вентилем. Известия АН СССР ОТН, № 10, 1950.
6. О. М. Богатырев. Метод расчета принужденного тока от периодической э. д. с. Электричество, № 1, 1951.
7. А. А. Булгаков. Электронные устройства автоматического управления. Госэнергоиздат, 1951.
8. Я. З. Цыпкин. Переходные и установившиеся процессы в импульсных цепях. Госэнергоиздат, 1951.

[9. 10. 1950]



Автоколебания в высоковольтном вентиле

Кандидат техн. наук М. М. ЧЕТВЕРИКОВА

Москва

В последние несколько лет значительно возрос интерес к явлению высокочастотных колебаний при электрическом разряде в газе. Прежде всего это объясняется тем, что на современном уровне техники роль газоразрядных приборов сильно возросла и продолжает расти. Появились новые типы газоразрядных приборов как возбудителей высокочастотных колебаний, относящихся либо к области звуковых и радиочастот, либо к области сантиметровых и дециметровых волн.

Наряду с этим весьма актуальна задача об изучении свойств высокочастотных колебаний в газоразрядных приборах как отрицательного фактора-источника помех и даже аварий (перенапряжения и обратные зажигания).

Высокочастотные автоколебания [Л. 1] в газоразрядных приборах нельзя рассматривать как аномальное явление. Во всех (за исключением одного) исследованных автором 10 типах тиратронов и газотронов промышленного типа было установлено наличие высокочастотных автоколебаний. Результаты этих исследований частично опубликованы [Л. 2].

В экспериментальных работах по высокочастотным колебаниям в газоразрядных приборах обычно дается качественное объяснение процесса. Теоретические работы касаются главным образом колебаний в плазме, а не в том или ином типе газоразрядного прибора, где, кроме плазмы, большую роль играют анодное и катодное падение, область управляющего электрода и др.

В настоящей статье приведены некоторые результаты экспериментального изучения высокочастотных автоколебаний в высоковольтном вентиле.

Эксперимент. Изучение велось на одном из современных типов одноанодных высоковольтных металлических ртутных вентилях. Помимо обычного анода зажигания и анодов „нижнего возбуждения“, имеется анод „верхнего возбуждения“, расположенный на небольшом расстоянии от деионизационной решетки. Главный анод вентиля — длинный полый внутри металлический цилиндр. Управление разрядом производится с помощью двух сеток — нижней и верхней. Кроме этого, имеются вспомогательные электроды — система делителей напряжения.

Пользуясь ранее примененной методикой измерения [Л. 2], проведено изучение высоковольтного вентиля в стационарном режиме при питании его

Приведены результаты опытов по изучению автоколебаний в высоковольтном металлическом ртутном вентиле. Свойства колебаний иллюстрируются графиками и осциллограммами. Указана возможность фиксации с помощью вольтамперных характеристик (без введения в газоразрядный прибор постороннего индикатора — зонда) критических областей газового разряда.

постоянным током и установлено наличие в нем автоколебаний. Определены места и условия возникновения колебаний, а также их форма, амплитуда и частота. Изучено

влияние нагрузочного тока главного анода на колебания в цепях других электродов. Те же исследования повторены при питании главного анода от трансформатора переменным током частоты 50 гц при различных углах регулирования. Все измерения проводились при температуре охлаждающего масла порядка 22...25°C. При измерениях было всегда включено нижнее возбуждение, питаемое переменным током частоты 50 гц.

Результаты. На рис. 1 приведены вольтамперные характеристики основных газоразрядных областей.

Вольтамперная характеристика для области „главный анод-катод“ представлена в верхней части рис. 2.

При снятии вольтамперных характеристик все электроды, не относящиеся к исследуемой области газового разряда, отключались от схемы питания. Исключение представляет (рис. 2) вольтамперная характеристика $U_{a-k} = f(I_a)$, снятая при $I_{ss} = 0,8$ а, $I_{nc} = 0,4$ а, $I_{ac} = 0,4$ а.

На вольтамперных характеристиках высоковольтного вентиля (рис. 1 и 2) видны скачки на-

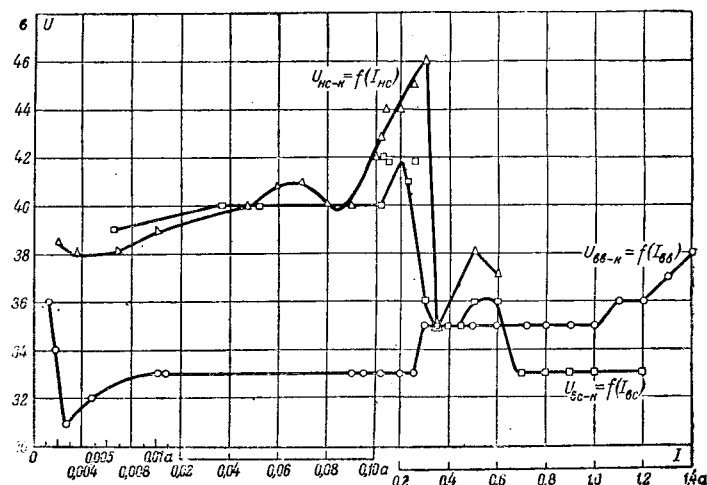


Рис. 1. Вольтамперные характеристики основных газоразрядных областей.

Кривая $U_{ss-k} = f(I_{ss})$ — область „верхнее возбуждение — катод“;
 $U_{nc-k} = f(I_{nc})$ — „нижняя сетка — катод“; $U_{ac-k} = f(I_{ac})$ — „верхняя сетка — катод“.

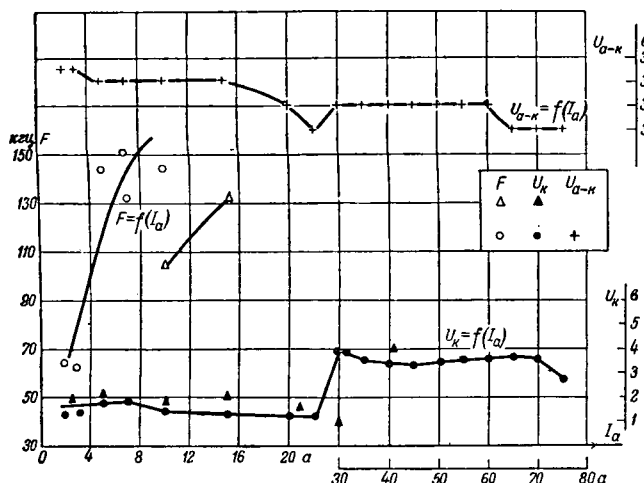


Рис. 2. Два вида обозначений экспериментальных точек соответствуют двум датам измерений.

пряжения не только в начальной их части в момент зажигания, но и в других областях характеристики.

Скачки напряжения на вольтамперных характеристиках говорят о наличии фазовых переходов при изменении разрядного тока [Л. 3 и 4].

Для понимания характера этих переходов следует рассмотреть характеристики частоты F и амплитуды U_k автоколебаний (рис. 2 и 3).

Скачки напряжения вольтамперных характеристик соответствуют резкому изменению частоты (рис. 1 и 3), а также наблюдаемой на экране осциллографа формы автоколебаний.

Окончание области скачкообразно изменяющихся напряжений на вольтамперной характеристике совпадает с началом новой области частот автоколебаний. Действительно, мы видим, что окончание скачкообразного изменения напряжения на вольтамперной характеристике „верхнее возбуждение — катод“ при $I_{\text{вв}} = 0,3 \text{ а}$ (рис. 1) соответствует началу новой области частот, устойчивых по частоте и форме автоколебаний (рис. 3: $F = f(I_{\text{вв}})$). Окончание скачкообразного

изменения напряжения на характеристике $U_{\text{вв-к}} = f(I_{\text{вв}})$ при $I_{\text{вв}} = 0,7 \text{ а}$ соответствует началу новой области частот правильной (близкой к синусоидальной) формы, устойчивых по частоте и форме автоколебаний в газоразрядной области верхняя сетка — катод.

Резкий скачок на характеристике $U_{\text{к-к}} = f(I_{\text{кк}})$ при $I_{\text{кк}} = 0,35 \text{ а}$ соответствует появлению импульсов на фоне хаотически изменяющихся колебаний в газоразрядной области „нижняя сетка — катод“.

Область неустойчивых значений напряжения на вольтамперной характеристике соответствует обычно хаотическим колебаниям.

В некоторых областях разрядного тока частота не меняется (рис. 3). Частота колебаний в области малых значений разрядного тока значительно меньше, чем в области больших значений. Высокочастотные колебания наблюдаются и на главном аноде (рис. 2). Устойчивые колебания правильной формы происходят при малых значениях анодного тока. При больших значениях анодного тока наблюдается спектр высокочастотных колебаний.

Форма колебаний частоты $F = 196 \text{ кГц}$ и амплитуды $U_k = 2,8 \text{ в}$ на главном аноде при питании его постоянным током (от двигателя-генератора) $I_a = 12 \text{ а}$ при $I_{\text{кв}} = 17 \text{ а}$, $I_{\text{вв}} = 0,8 \text{ а}$, $I_{\text{кк}} = 0,4 \text{ а}$, $I_{\text{вс}} = 0,6 \text{ а}$ представлена на рис. 4.

На рис. 5 показаны колебания на верхнем аноде возбуждения при питании его постоянным током (от селенового выпрямителя) и отключенных от схемы питания главного анода верхней и нижней сеток. На рис. 5,а высокочастотные колебания на верхнем аноде возбуждения сняты при токе $I_{\text{вв}} = 0,002 \text{ а}$. Высокочастотные колебания, как это следует из осциллограммы рис. 5,а, модулированы низкой частотой (50 Гц) нижнего возбуждения.

На рис. 5,б колебания частоты $F = 2,56 \text{ кГц}$ и амплитуды $U_k = 8,3 \text{ в}$ получены при $I_{\text{вв}} = 0,014 \text{ а}$. На осциллограмме рис. 5,в показана форма колебаний частоты 43 кГц на аноде верхнего возбуждения при $I_{\text{вв}} = 0,8 \text{ а}$. При включении главного анода и всех остальных электродов колебания на верхнем аноде возбуждения изменяются.

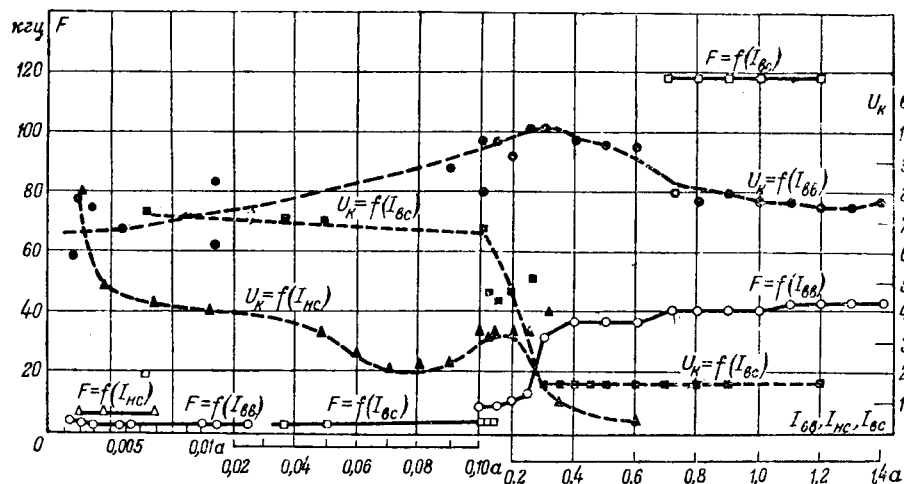


Рис. 3.



Рис. 4.

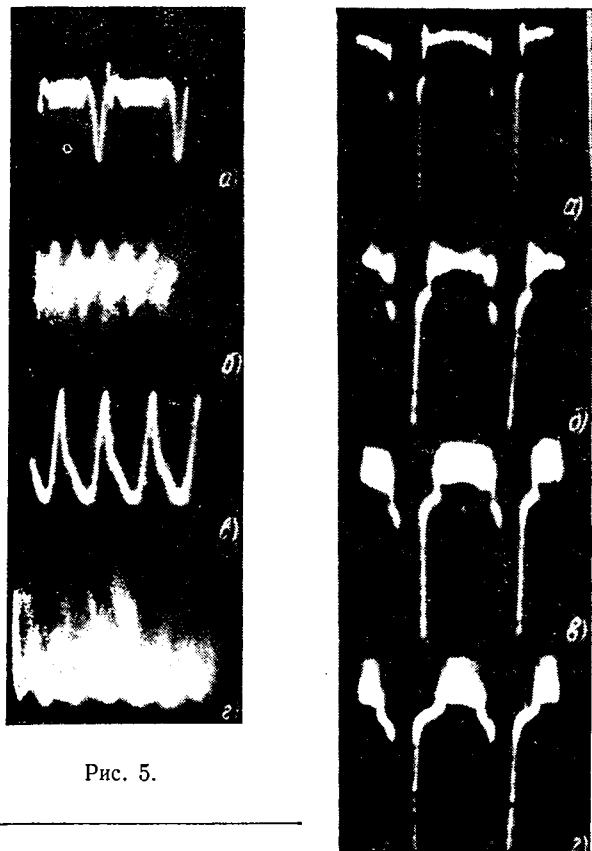


Рис. 5.

Рис. 6. Форма высокочастотных колебаний на одном из анодов нижнего возбуждения при различных значениях анодного тока.

а — $I_a=0$; б — 13 а; в — 49 а; г — 89 а.

На рис. 5,г представлены колебания частоты $F=87$ кГц на верхнем аноде возбуждения. Колебания эти получены при $I_a=2$ а, $I_{нс}=17$ а, $I_{вв}=0,8$ а, $I_{нс}=0,4$ а, $I_{вс}=0,6$ а.

Из сопоставления осциллограмм рис. 5,а ($I_a=2$ а) и 5,в ($I_a=0$) видно, что при включении главного анода частота колебаний на верхнем аноде возбуждения увеличивается. Начиная с $I_a=2,5$ а, колебания на верхнем возбуждении делаются расплывчатыми, а затем хаотическими и амплитуда их с ростом анодного тока уменьшается (таблица).

Амплитуда колебаний на верхнем возбуждении при различных анодных токах

I_a , а	0	2	2,5	12	19	31	40	50	62	75
U_{κ} , в	8,8	9,7	3,5	1,6—2,2	1,6—1,9	1,7	1,3	1,1	0,8	0,8

Аналогичным образом действует нагрузочный ток главного анода и на колебания на нижней сетке. Устойчивые колебания правильной формы на нижней сетке ($F=60$ кГц, $U_{\kappa}=2,2$ в), наблюдаемые при $I_a=0$, при анодном токе I_a , равном от 2,5 до 75 а, становятся хаотическими и

амплитуда их изменяется от $U_{\kappa}=1,6$ в при $I_a=2,5$ а до $U_{\kappa}=1,1$ в при $I_a=75$ а. На верхней сетке при I_a , равном от малых значений до 75 а, колебаний не обнаружено.

В области газоразрядного промежутка „верхняя сетка — нижняя сетка“ возникают колебания частоты $F=196$ кГц и амплитуды $U_{\kappa}=1,7$ в при $I_a=0$, $I_{вс}=0,5$ а, $I_{нс}=0,4$ а, $I_{вв}=0,8$ а, $I_{нс}=20$ а.

При включении главного анода (при токах I_a от 2 до 88 а) высокочастотные колебания в области „верхняя сетка — нижняя сетка“ пропадают.

Изучение процессов в цепи нижнего возбуждения показало, что во время горения нижних анодов возбуждения наблюдаются высокочастотные колебания, модулированные низкой частотой 50 Гц питающего их переменного тока. При $I_a=0$ высокочастотные колебания наблюдаются почти для всего промежутка времени горения исследуемого анода нижнего возбуждения. При $I_a \neq 0$ с возрастанием тока главного анода (питаемого постоянным током от двигатель-генератора) промежуток времени, при котором возникают высокочастотные колебания на рассматриваемом аноде нижнего возбуждения, уменьшается.

Амплитуда высокочастотных колебаний на нижнем возбуждении при увеличении тока главного анода до 20 а увеличивается. При дальнейшем увеличении тока главного анода от 20 до 90 а амплитуда высокочастотных колебаний остается почти неизменной, но эффект стягивания области высокочастотных колебаний с ростом тока главного анода продолжается.

Форма высокочастотных колебаний на одном из анодов нижнего возбуждения представлена на рис. 6.

Кроме того, те же исследования были проведены при питании главного анода от трансформатора и различных углах регулирования. В этом случае также наблюдается влияние тока главного анода на высокочастотные колебания на анодах нижнего возбуждения. При полном времени горения (угол регулирования равен нулю), так же как и при питании главного анода постоянным током, с возрастанием тока главного анода происходит уменьшение промежутка времени, при котором возникают высокочастотные колебания на нижнем возбуждении. Амплитуда же этих колебаний с ростом тока главного анода увеличивается. Амплитуда высокочастотных колебаний на анодах нижнего возбуждения при прочих равных условиях и питании главного анода от трансформатора меньше, чем при питании его постоянным током. Отсюда ясно, что для ртутных вентилях в отношении возникающих в них высокочастотных колебаний инверторный режим более труден чем выпрямительный.

Выводы. 1. Экспериментально установлено существование в высоковольтном металлическом ртутном вентиле высокочастотных автоколебаний.

2. Определены места и условия возникновения автоколебаний, а также их форма, амплитуда и частота.

3. Экспериментально установлено, что скачки напряжений на вольтамперных характеристиках соответствуют (при том же разрядном токе) резкому изменению частоты и формы автоколебаний. Следовательно, анализ вольтамперных характеристик дает возможность определить критические области газового разряда и, таким образом, проследить за процессом происходящих в нем фазных переходов.

4. Выяснено влияние нагрузочного тока глав-

ного анода на колебания в различных областях газового разряда в высоковольтном ртутном вентиле.

Литература

1. К. Ф. Теодорчик. Автоколебательные системы. Гостехиздат, 1952.
2. М. М. Четверикова. Колебания в газоразрядных приборах, Электричество, стр. 116, № 2, 1951.
3. М. М. Четверикова. О фазовых превращениях в газовом разряде, ВМУ, стр. 111, № 1, 1946.
4. Г. В. Спивак, и Е. Л. Столярова. О фазовых переходах в формирующейся плазме, ВМУ, стр. 31, № 5, 1952.

[18. 10. 1952]



Работа дугогасящих устройств с газовым автодутьем

Кандидат техн. наук О. П. СИТНИКОВ

Уральский политехнический институт им. Кирова

Особенность дугогасящих устройств высоковольтных аппаратов с автодутьем состоит в том, что давление, необходимое для гашения дуги, создается путем использования энергии, выделяемой самой дугой. Вследствие этого при их построении возникает необходимость обеспечить путем рационального выбора конструкции и параметров дугогасящего устройства создание давления, достаточного для гашения дуги при малых и средних токах и допустимого из условий механической прочности конструкции при предельных токах.

Расчету давлений в дугогасящем устройстве посвящен ряд работ. Методы расчета давлений, предложенные в этих работах, основанные на численном интегрировании, пригодны для построения кривой давления, если известны параметры дугогасящего устройства и кривая мощности дуги. Громоздкость расчетов затрудняла применение этих методов для анализа влияния параметров дугогасящего устройства на ход изменения давления. Поэтому до сих пор не дано теоретического обоснования конструкции дугогасящего устройства.

Характер изменения давления в камере и исходные уравнения, определяющие их, зависят от наличия истечения жидкости и газа. Возможны четыре основных случая:

- 1) истечение отсутствует;
- 2) существует истечение только жидкости; газ, генерируемый дугой, из камеры не уходит;
- 3) существует истечение газа; истечение жидкости мало влияет на характер изменения давления;
- 4) существует одновременное параллельное истечение газа и жидкости из камеры; режим воз-

Предлагается способ расчёта давления в камере по усредненному напряжению на дуге. На основе анализа устанавливается, что нельзя обеспечить надежную работу дугогасящего устройства за счет использования предварительно запасенного сжатого воздуха и что наиболее рациональным является режим непрерывного дутья.

можен при наличии второй генерирующей дуги, газовый пузырь которой замкнут, причем из него не происходит истечения.

Каждый из четырех режимов работы описывается особой системой уравнений и характер изменения давления и зависимость его от параметров камеры будут в каждом режиме различны. Гашение дуги в камере может происходить только при наличии газового дутья, охлаждающего дугу, и в период гашения любое дугогасящее устройство работает либо в третьем, либо в четвертом режиме. Поэтому все дугогасящие устройства целесообразно разделить на две категории — дугогасящие устройства газового дутья, в которых отсутствует устойчивое параллельное истечение газа и жидкости (масла — через выхлопное отверстие), и дугогасящие устройства масляного дутья, в которых оно образуется вследствие давления на масло со стороны второй генерирующей дуги. Целесообразность такого разделения подтверждается тем, что и характер изменения давления, и зависимость его от параметров камеры резко различны в этих режимах [Л. 3].

В настоящей статье рассматриваются только дугогасящие устройства газового дутья. К ним относятся все устройства с твердым газогенерирующим веществом (трубчатые разрядники, трубчатые предохранители, автогазовые выключатели и выключатели нагрузки) и большая группа дугогасящих устройств масляных выключателей, в которых возникает только одна дуга, отсутствует промежуточный контакт и истечение масла из камеры мало влияет на характер изменения давления.

Для этих дугогасящих устройств изменение давления в камере происходит согласно уравнению

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + \{p_0 - [p_1(0) + p_2(0) + p_3(0) + p_4(0)]\} e^{-\frac{t}{T}},$$

где p_0 — давление в момент $t=0$;
 T — газодинамическая постоянная времени;

$p_n (n=1, 2, 3, 4)$ — давление, создаваемое вследствие выделения дугой n -ной составляющей мощности;

$p_n(0)$ — значение функции в момент $t=0$.

Вывод этого уравнения, как и обоснование положения, что каждой составляющей мощности соответствует составляющая давления, даны в приложении.

Принятые при решении основные допущения — постоянство объема газа, сечения струи выходящего газа и температуры газа — ограничивают круг конструкций дугогасящих устройств, анализ работы которых можно точно провести, используя это решение. Однако решение позволяет установить некоторые практически важные закономерности, справедливые для широкого класса дугогасящих устройств.

Покажем, что при конструировании дугогасящих устройств с газовым автодутьем нецелесообразно предварительно запастись сжатым газом, необходимый для гашения дуги. Примерами устройств, в которых для гашения используется предварительно накопленный газ, являются конструкции простой гасительной камеры (рис. 1, а и б) и камера поперечного дутья (рис. 1, в). В этих дугогасящих устройствах процесс отключения можно разбить на два периода — период подготовки к гашению, когда выхлоп закрыт и запасается сжатый газ, и период после открытия, когда возможно гашение дуги.

Подобное устройство может обеспечить надежное гашение дуги, если интенсивное дутье будет обеспечено запасенным газом в течение полупериода промышленной частоты, так как момент перехода тока через нуль может не совпасть с моментом открытия выхлопа, а наступить на 0,01 сек позднее.

Принцип суперпозиции позволяет рассматривать составляющие давления независимо, что позволяет рассчитать начальное давление в ка-

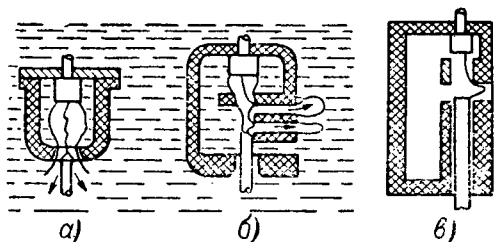


Рис. 1. Дугогасящие устройства с газовым автодутьем.

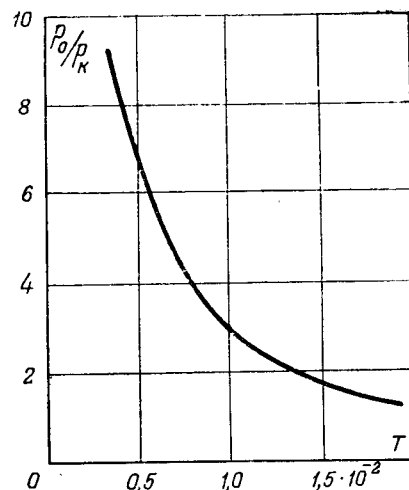


Рис. 2. Зависимость отношения $\frac{p_0}{p_k}$ от газодинамической постоянной времени T .

мере, достаточное для гашения только запасенным газом.

Минимальное необходимое для гашения дуги давление пусть будет p_k .

На основании решения (1,13) [приложение] изменение давления, обусловленного только запа-

сенным газом, происходит по закону $p = p_0 e^{-\frac{t}{T}}$. Следовательно, если для $t=0,01$ требуется $p = p_k$, то должно быть:

$$p_0 = p_k e^{\frac{t}{T}}. \quad (1)$$

Практически можно получить достаточное давление p_k , если $T > 1 \cdot 10^{-2}$ сек (рис. 2). При меньших значениях потребуется начальное давление, во много раз большее необходимого для гашения дуги.

Значение постоянной v_k (приложение) зависит от состава газа, его температуры. Анализ многих осциллограмм давления, полученных при испытании разрядников и дугогасящих устройств масляных выключателей, показал, что в первом приближении

$$v_k \approx 5 \cdot 10^4 \left[\frac{\text{см}}{\text{сек}} \right].$$

Таким образом, для успешной работы дугогасящих устройств этого типа

$$T = \frac{V}{v_k S} > 0,01 \text{ сек},$$

или

$$\frac{V}{S} > 5 \cdot 10^2 \text{ см}, \quad (2)$$

где V — объем газа в камере, см^3 ;
 S — сечение струи газа, см^2 .

Фактически в дугогасящих устройствах этого типа отношение V/S не превышает 50. Например, в эластичной камере фирмы „Сименс“, работающей при отключении малых токов как простая камера,

объем газа в момент выхода свечи из камеры практически равняется объему, занимаемому свечей до размыкания контактов.

По данным опытов, время спада давления составляет $2 \cdot 10^{-2} \dots 3 \cdot 10^{-2}$ сек. Таким образом, при подобном малом объеме газа в камере практически невозможно обеспечить надежную ее работу за счет запасенного сжатого газа. Этот вывод подтверждается и опытом испытаний камер этого типа, показавшим ненадежность их работы. Однако наряду с предварительным запасенным газом дутье почти всегда осуществляется и газом, непрерывно выделяемым дугой после открытия выхлопа. В этом случае возможно надежное гашение дуги, но дополнительное давление, создаваемое запасенным газом, увеличивает механические нагрузки на камеру при отключении предельных токов, не улучшая ввиду быстрого спада давления условий гашения дуги.

Следовательно, при построении дугогасящих устройств нецелесообразно ориентироваться на использование для гашения дуги большого количества предварительно накопленного сжатого газа.

Таким образом, давление, определяющее работу дугогасящего устройства, создается газом, выделяемым при открытом выхлопе.

В этом режиме работы практически почти всегда при анализе кривой давления можно опустить в (1,13) член $\{p_0 - [p_1(0) + p_2(0) + p_3(0) + p_4(0)]\} e^{-\frac{t}{T}}$ ввиду его быстрого уменьшения.

Тогда

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + p_4;$$

$p_1 + p_2 = p_c [a + b(t - T)] = p_c(a + bt)$ — постоянная составляющая давления.

$p_3 + p_4$ определяет величину колебаний давления, возникающих вследствие пульсации мощности дуги.

Рассмотрим амплитуды колебаний давления при постоянной мощности дуги: $b = 0$, $p_2 = 0$, $p_4 = 0$ (приложение):

$$p_3 = -p_c a \sum \left\{ \frac{A_k}{\sqrt{1 + k^2 \omega^2 T^2}} \cos(k\omega t + \varphi - \theta_k) \right\}. \quad (3)$$

Амплитуда k -той гармонической давления

$$p_{3a}^{(k)} = p_0 a \frac{A_k}{\sqrt{1 + k^2 \omega^2 T^2}}. \quad (4)$$

$\frac{p_{3a}^{(k)}}{p_1} = f(T)$ — отношение постоянной составляющей давления к амплитуде переменной дано на рис. 3 для $k = 4$. Для $k > 4$ амплитуда колебаний ничтожна. Из кривой видно, что при $T > 3 \cdot 10^{-3}$ амплитуда колебаний высших гармонических ($k \geq 4$) настолько мала, что колебаниями давления, происходящими с частотой более 100 гц, можно пренебречь.

Очевидно, происходящие вследствие беспорядочных колебаний напряжения на дуге пульсации

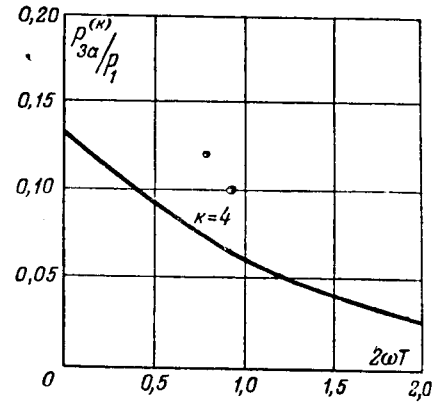


Рис. 3. Зависимость $\frac{p_{3a}}{p_1}$ от газодинамической постоянной времени T .

мощности всегда имеют большую частоту и не могут повлиять на кривую давления в камере, поэтому принятое при расчете (приложение) допущение о прямолинейном изменении напряжения на дуге не может дать заметной погрешности в оценке давления в камере.

Кривые давления при постоянной мощности дуги для двух значений газодинамической постоянной времени приведены на рис. 4.

Характер изменения давления в выключателе с газовым автодутьем ВГ-10 практически точно совпадает с расчетным [Л. 6].

Всегда желательно иметь в дугогасящем устройстве достаточно большое давление в момент перехода тока через нуль при наименьшей мощности дуги.

Отношение давления в момент нуля тока к постоянной составляющей давления в функции t представлено на рис. 4. Кривая показывает, что при всех прочих равных условиях с увеличением объема газа в камере давление в момент перехода тока через нуль будет возрастать. Это является одним из основных факторов улучшения работы дугогасящих устройств с газовым дутьем, в том числе и масляных выключателей при применении дополнительного резервуара, что доказано экспериментально [Л. 3, 4 и 5].

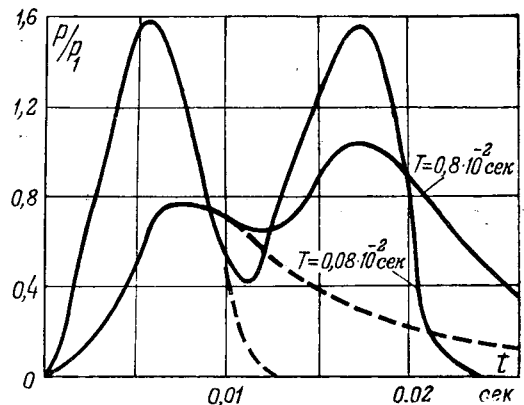


Рис. 4. Кривые давления в дугогасящем устройстве с газовым автодутьем при постоянном напряжении на дуге.

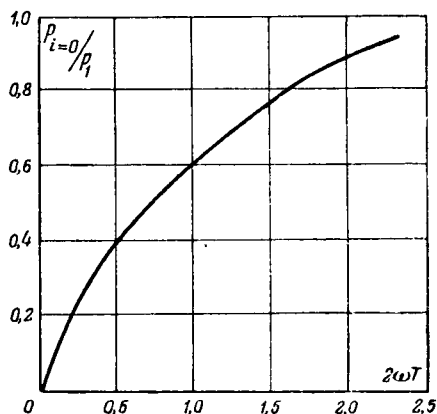


Рис. 5. Относительное значение давления в момент перехода тока через нуль в зависимости от газодинамической постоянной времени.

Из кривой видно, что отношение $\frac{V}{S}$ целесообразно выбирать так, чтобы $T > 10^{-3}$ сек, т. е. $\frac{V}{S} > 50$ см.

Этот вывод сделан при анализе давления и пренебрежении членом $\{p_0 - [p_1(0) + p_2(0) + p_3(0) + \frac{1}{2}p_4(0)]\}e^{-\frac{t}{T}}$ в (1,13).

В случае гашения дуги минимальное время 0,01 сек будет достижимо при $T < 3 \cdot 10^{-3}$ сек, следовательно, $\frac{V}{S} < 150$ см. Значение $\frac{V}{S} = 150$ см ограничивает верхний предел объема газа в камере при гашении дуги в один полупериод. Увеличение газодинамической постоянной времени, кроме того, уменьшает амплитуду колебаний давления и снижает максимальное значение давления при максимуме тока, что облегчает работу дугогасящего устройства при отключении предельных токов.

Выводы. 1. При расчете давления в дугогасящем устройстве с газовым дутьем в большинстве случаев можно без заметной погрешности рассчитывать мощность дуги по усредненному значению напряжения на дуге, пренебрегая его высокочастотными пульсациями, что позволяет достаточно просто рассчитать давление в камере в общем виде.

2. Анализ закономерности изменения давления показал, что практически нельзя получить надежно работающее дугогасящее устройство, использующее для гашения дуги только предварительно запасенный сжатый газ. Сомнительна целесообразность предварительного запаса большого количества сжатого газа путем открытия выхлопа позднее образования дуги. Более рациональным режимом работы является режим непрерывного дутья.

3. При непрерывном газовом дутье оптимальный характер изменения давления будет тогда, когда отношение объема газа в камере к сечению струи выходящего газа в пределах 40...150 см.

Приложение. Для дугогасящих устройств с газовым автодутьем давление в камере

$$pV = GRT_a, \quad (1,1)$$

где p — давление в камере, кг/см²;
 V — объем газа в камере, см³;
 G — вес газа в камере, кг;
 R — газовая постоянная;
 T_a — абсолютная температура, °K;

$$G = G_0 + G_1 + G_2, \quad (1,2)$$

где G_0 — вес газа в камере до размыкания контактов;
 G_1 — вес газа, выделенного генерирующим веществом под действием дуги;
 G_2 — количество газа, истекшее из камеры.

Вес газа, выделенного генерирующим веществом под действием дуги, пропорционален энергии, выделяемой дугой:

$$G_1 = k \int_0^t N dt, \quad (1,3)$$

а вес истекшего газа

$$G_2 = \int_0^t S \frac{p}{RT_a} \left(\frac{2}{x+1} \right)^{\frac{1}{x-1}} \sqrt{\frac{2x}{x+1}} V p \bar{V} \approx \frac{v_k S}{R} \int_0^t \frac{p dt}{T_a}, \quad (1,4)$$

где x — показатель адиабаты;
 S — сечение струи газа ($S = \text{пост}$);
 v — постоянная.

В первом приближении $V = \text{пост}$ и $T_a = \text{пост}$:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{V} \frac{d}{dt} (GRT_a) = \frac{RT_a}{V} \frac{dG}{dt}, \quad (1,5)$$

где p — давление газа; V — его объем.

Учитывая (1,2 — 1,4), получаем:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{v_k S}{V} p - \frac{kRT_a}{V} N = 0. \quad (1,6)$$

Обозначив $\frac{V}{v_k S} = T$; $\frac{kRT_a}{V} = A$, получим:

$$\frac{dp}{dt} + \frac{1}{T} p - AN = 0. \quad (1,7)$$

Для получения решения в общем виде следует иметь зависимость $N = f(t)$ в форме интегрируемой функции. Мощность дуги $N = IU_d$. Без учета апериодической составляющей тока короткого замыкания $I = I_m \sin(\omega t + \varphi)$. Напряжение на дуге — знакопеременная функция, имеющая разрывы непрерывности при каждом переходе через нуль. Анализ многих осциллограмм испытаний дугогасящих устройств показывает, что в процессе отключения напряжения на дуге растет почти линейно, меняя знак каждый полупериод. Пренебрегая пульсациями напряжения на дуге, происходящими с большой частотой, и пиками гашения и зажигания, можно достаточно точно выразить абсолютное значение напряжения на дуге:

$$U_d = U_0 (a + bt). \quad (1,8)$$

Тогда мощность дуги

$$N = I_m U_0 (a + bt) |\sin(\omega t + \varphi)|. \quad (1,9)$$

Разлагая $|\sin(\omega t + \varphi)|$ в ряд и обозначив $N_0 = \frac{2}{\pi} I_m U_0$, получим:

$$N = N_0 \left(1 - \frac{2}{1.3} \cos 2\omega t - \frac{2}{3.5} \cos 4\omega t \dots \right) (a + bt). \quad (1,10)$$

Ввиду линейности исходного дифференциального уравнения применим принцип суперпозиции и будем считать:

что каждая из составляющих мощности создает свою составляющую давления:

$$N = N_0 a + N_0 b t - N_0 a \sum A_k \cos k(\omega t + \varphi) - N_0 b \sum A_k + \cos k(\omega t + \varphi), \quad (I, 11)$$

$$\text{где } k = 2; 4 \dots; A_2 = +\frac{2}{1.3}; A_4 = +\frac{2}{3.5}. \quad (I, 12)$$

Итак, если составляющие мощности будут:

$$N_1 = N_0 a;$$

$$N_2 = N_0 b t;$$

$$N_3 = -N_0 a \sum A_k \cos k(\omega t + \varphi);$$

$$N_4 = -N_0 b \sum A_k t \cos k(\omega t + \varphi),$$

то решение уравнения имеет вид:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + \{p_0 - [p_1(0) + p_2(0) + p_3(0) + p_4(0)]\} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (I, 13)$$

где p_0 — давление в момент $t=0$;

p_n ($n=1, 2, 3, 4$) — давление, создаваемое вследствие выделения дугой мощности N_n , причем $p_n(0)$ — значение функции в момент $t=0$;

$$p_1 = p_0 a;$$

$$p_2 = p_0 b (t - T);$$

$$p_3 = -p_0 a \sum \frac{A_k}{\sqrt{1 + k^2 \omega^2 T^2}} \cos k(\omega t + \varphi - \theta_k);$$

$$p_4 = -p_0 b \sum A_k \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + k^2 \omega^2 T^2}} \cos [k(\omega t + \varphi) - \theta_k] + \frac{1}{1 + k^2 \omega^2 T^2} \cos k(\omega t + \varphi - \theta_k) \right\};$$

$$p_0 = A N_0 T, \quad \theta_k = \arctg k \omega T.$$

Литература

1. Б. М. Малевинский. Расчет давлений в дугогасящих конструкциях выключателей. Электричество, № 11, 1948.

2. С. В. Авакян. Расчет газодинамических процессов в дугогасящих устройствах с масляным дутьем. Электричество, № 4, 1951.

3. М. М. Акодис и М. М. Драчевский. Испытание и усиление выключателей ВМ-22 и МД-15. Эл. станции, № 4, 1940.

4. М. М. Акодис и А. Н. Малахов. Измерение давлений в трубчатых разрядниках. Эл. станции, № 11, 1938.

5. Ю. В. Буткевич и М. М. Бронштейн. Выключатель с твердым газогенерирующим веществом 6—10 ки, 200 мвга. Электричество, № 5, 1946.

[29. 9. 1952]



О коэффициенте рекомбинации электронов

Кандидат техн. наук Е. М. ЦЕЙРОВ

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Теоретическое исследование электрической дуги высокого давления среди прочих трудностей наталкивается на отсутствие количественных сведений о так называемом коэффициенте рекомбинации электронов. В распоряжении исследователя практически нет ни теоретических, ни экспериментальных материалов для оценки его величины. Ниже делается попытка косвенным путем установить выражение, определяющее упомянутый коэффициент рекомбинации.

Пусть имеется достаточно большой объем раскаленного газа, находящегося в термическом равновесии, температура которого соответствует обычным для электрической дуги высокого давления значениям. Допустим, что в этом объеме газа происходит только процесс однократной ионизации молекул и, естественно, рекомбинация электронов. Известно, что в данных условиях преобладающим ионизирующим процессом будет ионизация молекул вследствие соударения с ними электрона, обладающего тепловой скоростью. Известен также метод вычисления интенсивности этого процесса [Л. 1]. Для этой цели на основании законов кинетической теории газов определяется число соударений в 1 сек одного электрона с нейтральными молекулами газа. Если скорость электрона лежит в пределах v и $v + dv$, то число соударений

Предлагается аналитический метод расчета коэффициента рекомбинации электронов при явлении термической ионизации, который может найти применение при инженерных исследованиях газового разряда.

трона с нейтральными молекулами газа. Если скорость электрона лежит в пределах v и $v + dv$, то число соударений

$$dz = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\lambda_e} \frac{v^3}{w^3} e^{-\frac{v^2}{w^2}} dv, \quad (1)$$

где λ_e — свободный пробег электрона;

v — его скорость;

w — наиболее вероятная скорость.

Умножив w на функцию ионизации газа электронами, установим число актов ионизации. Функция ионизации может быть, как это обычно и делается, представлена соответствующим аппроксимирующим выражением. В некотором интервале между энергией ионизации A_i и энергией, которую мы обозначим через A_m , ход функции ионизации можно с большой точностью принять за линейный. Однако, так как часть электронов в рассматриваемом объеме газа может обладать энергией, превышающей верхний предел этого интервала, надлежит прежде всего проверить возможность применения линейной аппроксимации

Максвелловская функция распределения, как известно, имеет вид:

$$R = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{v^3}{w^3} e^{-\frac{v^2}{w^2}}. \quad (2)$$

С помощью этого выражения вычислим вероятность появления в газе электронов, обладающих энергией ионизации A_j . Затем определим ту же вероятность для верхнего предела интервала A_m . Разделим первый результат на второй:

$$\frac{R_j}{R_m} = \frac{\left(\frac{v}{w}\right)_j^2}{\left(\frac{v}{w}\right)_m^2} e^{-\left(\frac{v}{w}\right)_j^2 + \left(\frac{v}{w}\right)_m^2}. \quad (3)$$

Полученное выражение показывает, во сколько раз вероятность появления электронов с энергией A_j больше вероятности появления электронов с энергией A_m .

Энергия электрона

$$A = \frac{10^{12}}{1,59} \frac{mv^2}{2} [\text{эВ}],$$

где m — масса электрона.

Его наиболее вероятная скорость

$$w = \sqrt{\frac{2kT}{m}},$$

где $k = 1,37 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/}^\circ\text{К}$; T — температура электрона, $^\circ\text{К}$.

Если температура воздуха $T = 6000^\circ\text{К}$, то $A_j = 16,3 \text{ эВ}$ и $A_m \approx 100 \text{ эВ}$.

Подсчет показывает, что вероятность появления электронов с энергией не только большей, но даже равной A_m , исчезающе мала. Применение линейной аппроксимации вполне оправдано.

Проинтегрировав произведение выражения (1) на функцию ионизации в пределах от v_0 до ∞ и отнеся результат к числу электронов в единице объема газа, найдем скорость образования новых электронов $\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{ион}}$:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{ион}} = \frac{4a'}{\lambda_e \sqrt{\pi}} N w^3 e^{-\frac{eU_j}{kT}} \left(1 + \frac{eU_j}{2kT}\right), \quad (4)$$

где N — число электронов в 1 см^3 ;

eU_j — работа ионизации, эрг;

U_j — потенциал ионизации.

Коэффициент пропорциональности a' входит в формулу через линейную аппроксимацию функции ионизации $f_i = a'(v^2 - v_0^2)$, где v_0 — скорость электрона соответствующая его энергии ионизации. С учетом поправок на размерность этот неизвестный, нам коэффициент a' может быть вычислен с помощью известной из эксперимента постоянной a относительной ионизации газа. Если выполнить эту операцию, а также учесть, что второй член в скобках уравнения (4) значительно больше еди-

ницы и им, следовательно, можно пренебречь, то после простейших преобразований имеем окончательно:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{ион}} = 4,75 \cdot 10^8 a p \sqrt{T U_j} N e^{-\frac{11600 U_j}{T}}, \quad (5)$$

где a — коэффициент пропорциональности;
 p — давление газа, атм .

Интенсивность процесса рекомбинации электронов определяется, как известно, выражением

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{рек}} = -\beta N^2, \quad (6)$$

где N — попрежнему число электронов (ионов) в 1 см^3 газа;

β — коэффициент рекомбинации.

В условиях стационарного состояния должно, очевидно, соблюдаться равенство

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{ион}} = -\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{рек}}. \quad (7)$$

Так как коэффициент рекомбинации β неизвестен, то равенство (7) ничего не говорит о степени ионизации данного объема газа. Чтобы ответить на этот вопрос, следует обратиться к формуле Сага.

Учитывая, что степень ионизации газа даже при высоких температурах значительно меньше единицы, можно этой формуле придать более простую форму:

$$x = 5,62 \cdot 10^{-4} p^{-0,5} T^{1,25} e^{-\frac{5800 U_j}{T}}. \quad (8)$$

Если число молекул в единице объема $M = 71,5 \cdot 10^{20} p T^{-1}$, то число электронов в нем

$$N = xM = 4,25 \cdot 10^{18} p^{0,5} T^{0,25} e^{-\frac{5800 U_j}{T}}. \quad (9)$$

Уравнения (7), (6) и (9) дают возможность написать:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{\text{ион}} = 18 \cdot 10^{36} \beta p \sqrt{T} e^{-\frac{11600 U_j}{T}}. \quad (10)$$

Таким образом, снова приходим к выражению, определяющему интенсивность ионизирующего процесса в газе, и играющему, очевидно, совершенно ту же роль, что и уравнение (5). Бросается в глаза их большое сходство.

Так как в основе выводов (5) и (10) лежат совершенно различные начала, то указанное сходство не может не служить подтверждением по крайней мере качественной правильности этих уравнений.

Сравним (5) и (10). Разрешим полученное уравнение относительно β :

$$\beta = 0,264 \cdot 10^{-28} a U_j N. \quad (11)$$

Коэффициент пропорциональности β сам зависит от плотности электронов N .

Подставив (11) в (6), получим:

$$\left(\frac{dN}{dt}\right)_{рек} = -\alpha N^3, \quad (12)$$

где

$$\alpha = 0,264 \cdot 10^{-28} a U_j. \quad (13)$$

Значения α и U_j приведены в таблице [Л. 1].

Газ	Воздух	O ₂	N ₂	H ₂	Hg
α	0,26	0,24	0,30	0,21	0,828
U_j	16,3	12,5	15,8	16,0	10,4

Например, для воздуха $\alpha = 1,12 \cdot 10^{-28}$. При температуре газа порядка 6000°K плотность электронов в нем согласно (9) равна $5,36 \cdot 10^{12}$ ($p = 1$ атм). Следовательно, по (11) коэффициент рекомбинации $\beta = \alpha N = 6 \cdot 10^{-16}$.

Литература

1. А. Энгель и М. Штенбек. Физика и техника электрического разряда в газах, ОНТИ, т. 1, 1935.
2. Н. А. Капцов. Электрические явления в газах в вакууме ОГИЗ, 1947.
3. Д. А. Рожанский. Физика газового разряда. ОНТИ, 1937.

[22. 4. 1952]



Применение дросселей насыщения в схемах регулирования электрических печей

Кандидат техн. наук, доц. К. Н. БОРИСОВ

Москва

Длительная эксплуатация электрических печей сопротивления по одной из схем, приведенных на рис. 1 и 2, показала большие преимущества этих схем по сравнению с режимом „включено—выключено“.

В обеих схемах в силовую цепь печи параллельно контакторам включаются дроссели насыщения, которые поддерживают с большой точностью температуру рабочего пространства печи.

При разогреве печи линейные контакторы включают ее на полное напряжение сети. По достижении в рабочем пространстве печи надлежащей температуры контакторы размыкаются, и дальнейшее регулирование температуры осуществляется с помощью дросселя.

В схеме рис. 1 последовательно с печью включен силовой дроссель насыщения D . Его обмотка подмагничивания w питается от магнитного усилителя MU .

Из двух обмоток подмагничивания усилителя MU обмотка 2 питается непосредственно от источника постоянного тока, а обмотка 1 — при помощи балансного моста, в диагональ которого она включена. В одно плечо моста включен термометр сопротивления R_1 , контролирующей температуру рабочего пространства печи. Когда температура печи соответствует заданной, напряжение на диагонали моста bd равно нулю, обмотка 1 обесточена. В этом режиме усилителя ампервиткам питаемой им обмотки w соответствует индуктивность дросселя D , при которой в печь подается мощность, равная мощности, теряемой печью в окружающее пространство.

Отклонение температуры рабочего пространства печи от заданной в сторону ее повышения вызывает прохождение тока по обмотке 1 в одном

Рассматриваются преимущества применения дросселей насыщения в электрических печах сопротивления. Подробно рассматривается вопрос о влиянии низкого $\cos \varphi$ на потери в сети и в трансформаторе. Указывается на возможность уменьшения мощности трансформаторной подстанции термических цехов.

направлении, а при понижении — в другом. При повышении температуры ампервитки обмоток 1 и 2 вычитаются и вследствие понижения суммарных ам-

первитков подмагничивания усилителя ток в обмотке w падает, индуктивность дросселя возрастает и мощность, подаваемая в печь, снижается. При понижении температуры печи действие схемы будет направлено на понижение индуктивности дросселя и повышение мощности, подаваемой в печь. При резком понижении температуры контактор закорачивает дроссель.

В схеме рис. 2 регулирование происходит с помощью обычного потенциометра, в котором дополнительно вмонтированы ртутные контакты. При разогреве печи ртутный контакт 1 замкнут,

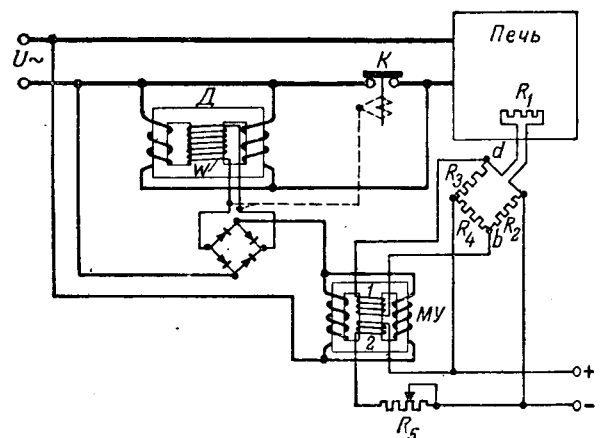


Рис. 1. Схема регулирования печи дросселями насыщения. П — печь; D — дроссель насыщения; МУ — магнитный усилитель; K — контактор; R_1, R_2, R_3, R_4 — плечи моста; R_5 — сопротивления для установки тока подмагничивания в установившемся тепловом режиме (компенсация тепловых потерь).

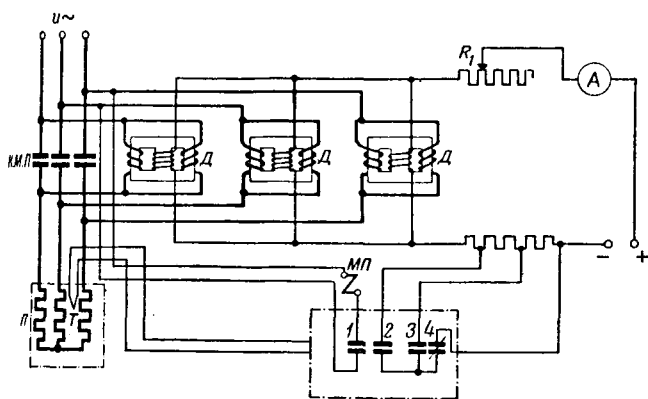


Рис. 2.

П—печь; Д—дроссель насыщения; МП—магнитный пускатель; КМП—контакты пускателя; 1, 2, 3, 4—ртутные переключатели; R_1 —сопротивления для уставки тока подмагничивания в установившемся тепловом режиме печи (компенсация тепловых потерь); Т—термопара.

и нагревательные элементы подключаются линейными контакторами КМП магнитного пускателя МП на полное напряжение сети. При приближении температуры рабочего пространства печи к заданной, ртутные контакты 1 размыкаются, замыкаются контакты 2, линейные контакты КМП размыкаются, включаются дроссели насыщения и мощность, поступающая в печь, понижается. Момент переключения и величина уменьшенной мощности определяется опытным путем.

После того как температура печи достигнет заданной, замыкаются контакты 3 и размыкаются контакты 2. В этом режиме мощность, поступающая в печь, должна быть равна мощности потерь печи в окружающую среду. Если температура рабочего пространства все же повышается, ртутный контакт 4 размыкается, сопротивление в цепи подмагничивающей обмотки дросселя возрастает и, в конечном итоге, мощность, потребляемая печью, значительно понижается. Сопротивление R_1 позволяет подрегулировать уставку температуры печи.

На рис. 3 приведена запись температуры рабочего пространства печи. На пилообразном участке кривой регулирование температуры осуществляется по методу „включено—выключено“, а на плавном участке температура регулировалась—по схеме рис. 2. Следует заметить, что управление дросселями можно также осуществить на электронных и ионных приборах.

В процессе эксплуатации печей по описываемым схемам было установлено и выявлено, что, помимо сравнительно высокой точности регулирования температуры, с помощью дросселей насыщения достигается:

1. Изменение температуры рабочего пространства печи (без учета инерции печи и датчика) по любому заданному технологическому графику, что весьма важно для многих технологических процессов.

2. Увеличение срока службы нагревательных элементов печи, футеровки, а следовательно, и печи в целом, так как температура нагревательных элементов уменьшается, приближаясь

к температуре рабочего пространства печи. Например, при температуре рабочего пространства печи 550°C максимальный перепад температуры между спиралью и рабочим пространством составил 50...65°C, в то время как при регулировании печи методом „включено—выключено“ этот перепад составлял 100...110°C. Это же обстоятельство способствует уменьшению тепловых потерь и увеличению к. п. д. печи, что подтверждается опытом.

3. Снижение мощности печных вентиляторов вследствие равномерности температуры рабочего пространства печи если таковые применяются для этой цели.

4. Увеличение срока службы контакторов и уменьшение мощности управления, так как контакторы работают только при форсированном разогреве печи. В остальное время они не работают, благодаря чему увеличивается надежность работы печи (уменьшается вероятность „залипания“ контакторов).

Практика применения показала, что при описываемом способе регулирования своевременно обнаруживаются изменения тепловых потерь печи, что позволяет также своевременно применять меры к их уменьшению. Это, безусловно, даст экономию электроэнергии, в условиях некоторых заводов—значительную.

Дроссель насыщения, как известно, прост в изготовлении и надежен в эксплуатации, не требует за собой ухода и может быть установлен в любом месте цеха.

К недостаткам применения дросселя насыщения в данных установках следует отнести искажение формы кривой тока и напряжения и понижение коэффициента мощности установки, который колеблется в зависимости от режима работы и к. п. д. печей в пределах от 1 до 0,4.

На резкое снижение коэффициента мощности энергетики указывают как на основной недостаток описываемого способа регулирования. Рассмотрим вопрос подробнее.

Простые математические соотношения показывают, что мощность печи

$$P_a = P_n \cos^2 \varphi,$$

где P_n —мощность включения, когда печь включена на полное напряжение сети: $P_n = \frac{U_n^2}{r_{\text{печи}}}$.

По мере разогрева мощность, поступающая в

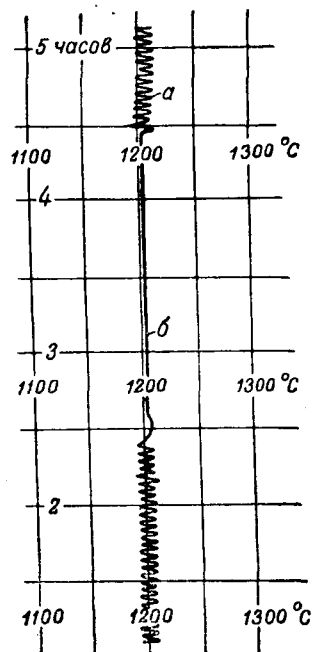


Рис. 3. Температурная кривая регулируемой печи.
а—пилообразный участок при регулировании по методу „включено—выключено“; б—плавный участок регулирования дросселями насыщения.

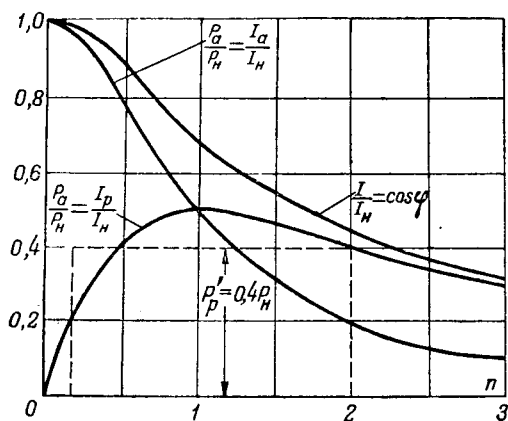


Рис. 4.

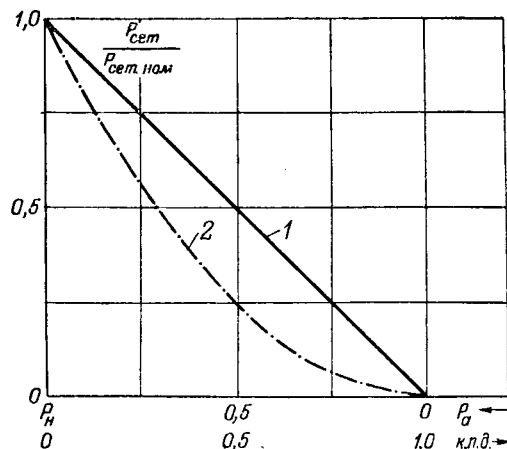


Рис. 5. Потери в сети (относительные величины) при регулировании по методу „включено — выключено“ (1) и при помощи дросселей насыщения (2).

печь, уменьшается с $P_a = P_n$ до $P_a = (0,2 \dots 0,3) P_n$ — мощности, равной тепловым потерям при установившейся температуре рабочего пространства печи; при этом к. п. д. печи составляет $0,8 \dots 0,7$.

Многие технологические процессы термообработки (например, цементация) требуют при установившейся температуре длительной выдержки времени прогрева (10 и более часов).

В этом случае при принятых значениях P_a

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{P_a}{P_n}} = \sqrt{0,2 \dots 0,3} = 0,45 \dots 0,55.$$

Несмотря на низкий и меняющийся $\cos \varphi$, потери в сети те же, что и у печи, работающей по методу „включено — выключено“.

В самом деле, если принять (что близко к истине), что за одни и те же циклы термообработки энергия, затраченная в обоих случаях регулирования, одинакова, то, естественно, и потери в сети за эти циклы будут одинаковы. Разница только та, что в одном случае энергия подается непрерывно, в другом случае — прерывисто. При массовом же применении дросселей насыщения для указанных выше цепей этот способ регулирования может благоприятно повлиять на тепловой режим силового трансформатора, питающего печи.

Например, в одном цехе было установлено на прессах с прессформами для термообработки пластмасс 13 дросселей насыщения. Установка дросселей резко уменьшила броски токов в сети и нагрев трансформатора снизился.

Таким образом, для рассматриваемого частного случая регулирования ухудшение $\cos \varphi$ не влечет дополнительных недостатков, кроме самого факта его ухудшения, а если применить компенсирующие устройства, то потери в сети значительно снизятся и уменьшится мощность трансформаторной подстанции, питающей термический цех.

Рассмотрим этот вопрос с количественной стороны.

Если обозначить отношение реактивного сопротивления дросселя насыщения X к активному сопротивлению печи $r_{печи}$ через $n = \frac{X}{r_{печи}}$, то

получим, что мощность, выделяемая в печи в функции n ,

$$P_a = P_n \cos^2 \varphi = P_n \frac{1}{n^2 + 1}.$$

Соответственно реактивная мощность цепи

$$P_p = P_n \frac{n}{n^2 + 1};$$

$$\text{ток } I = I_n \cos \varphi = I_n \frac{1}{\sqrt{n^2 + 1}}.$$

Активная и реактивная составляющие тока будут:

$$I_a = I \cos \varphi = I_n \cos^2 \varphi = I_n \frac{1}{n^2 + 1};$$

$$I_p = I \sin \varphi = I_n \cos \varphi \cdot \sin \varphi = I_n \frac{n}{n^2 + 1}.$$

Кривые рис. 4 показывают, в каких пределах изменяются интересующие нас величины с изменением реактивного сопротивления дросселя.

Кривые 1 и 2 рис. 5 дают в относительных единицах средние потери в сети и обмотках трансформатора в зависимости от выделяемой мощности в печи. Кривая 1 показывает эти изменения, когда печь работает длительное время с какой-либо средней неизменной мощностью, независимо от того, выделяется ли эта мощность импульсами, когда печь работает по методу „включено — выключено“, либо с помощью дросселя непрерывно, но с плохим $\cos \varphi$.

Кривая 2 показывает эти изменения, когда регулирование производится с помощью дросселя насыщения и осуществлена полная компенсация реактивной мощности. Действительно, при полной компенсации реактивной мощности ток в линии будет пропорционален мощности, выделяемой в печи ($I_a = c P_a$), и может быть представлен той же кривой 1 на рис. 5; в то же время ток в печи из-за наличия реактивной составляющей будет больше: $I = I_n \sqrt{\frac{P_a}{P_n}}$. Поэто-

му потери в сети и обмотках трансформатора, будучи пропорциональны квадрату активного тока, в зависимости от выделяемой мощности печи могут быть представлены кривой 2 рис. 5.

Сопоставление кривых рис. 5 показывает, что потери в сети и обмотках трансформаторов, когда печь работает с дросселями насыщения и осуществлена полная компенсация реактивной мощности, будут меньше, чем тогда, когда печь работает без компенсации реактивной мощности или когда регулирование осуществляется по методу „включено — выключено“.

При этом уменьшение потерь может быть значительным. Это зависит от той мощности, которая выделяется в печи. Например, для значения $P_a = 0,2 P_n$ (к. п. д. равен 0,8) согласно кривым рис. 5 потери уменьшаются в 5 раз, а в отношении потерь, когда печь периодически включается на полную мощность, эти потери будут меньше в 25 раз. Для других значений мощности это снижение потерь будет другим. Практическое осуществление такой установки с полной компенсацией реактивной мощности во всем диапазоне регулирования представляет в настоящее время известную трудность, связанную с необходимостью изменения величины компенсирующей мощности в зависимости от регулируемой мощности печи. Однако, применяя постоянную компенсацию $\cos \varphi$ только на некотором участке регулирования, можно получить

весьма значительное уменьшение потерь, не прибегая к усложнению всей установки.

Например, если подключить к печи компенсирующую мощность $P'_p = 0,4 P_n$ (рис. 4), то получим практически во всем диапазоне регулирования (когда работает дроссель насыщения) $\cos \varphi$, почти равный единице, и потери в сети и обмотках трансформатора могут быть представлены также кривой, подобной кривой 2 рис. 5.

Как видим, способ регулирования электрических печей с помощью дросселей насыщения дает новые средства снижения потерь в сети и трансформаторах и уменьшает мощность подстанции, питающей термический цех.

Вопрос о целесообразности применения компенсирующих устройств зависит от ряда причин как технического, так и экономического порядка и каждый случай должен рассматриваться самостоятельно. Решающим фактором при выборе является режим работы печи или печей: степень загрузки, продолжительности работы, цикл работы — время выдержки в печи и т. д.

Следует еще раз подчеркнуть, что если и не применять компенсации одновременно с использованием дросселя, то печь все же будет работать не менее экономично, чем без дросселя, а во всех других случаях выгодность его применения очевидна.

[29. 9. 1952]



Механические характеристики электрогидроприводов

Профессор М. Г. ЧИЛИКИН и кандидат техн. наук А. М. КОРЫТИН

Московский энергетический институт им. Молотова

В послевоенный период советские станкостроители создали много новых совершенных конструкций металлорежущих станков. Станки отличаются повышенной быстроходностью рабочих органов, что позволяет существенно увеличить производительность труда.

Наряду с этим многие операции требуют сохранения низкого предела скоростей, что приводит к необходимости значительного расширения диапазона скоростей станка. Естественно, что сочетание широкого диапазона регулирования скорости с большим числом ступеней, необходимых для правильного выбора оптимальных режимов резания, не может быть решено с помощью громоздких и сложных коробок скоростей, снижающих к. п. д. привода.

Несмотря на усложнение конструкций, коробки скоростей не позволяют достичь высокой

Излагается методика построения механических характеристик гидравлических приводов с электрическим приводным двигателем гидронасоса, объединенных общим названием — электрогидропривод. Приводятся, в относительных единицах, уравнения механических характеристик подобных систем, что позволяет сравнить по этим показателям два типа привода: электрический и электрогидравлический. Указываются пути построения электрических схем замещения электрогидропривода. Статья является частью работы авторов, выполненной по договору о содружестве Энергетического института им. Молотова и Московского автозавода им. Сталина.

плавности регулирования скорости и не могут обеспечить изменение скорости на ходу. Потребовалось создание новых, более совершенных систем привода для осуществления всех современных производственных режимов.

Наряду с ранее существовавшими системами

электрического и электромеханического приводов широкое распространение получили гидравлические приводы. Системы сочетают электродвигатель и гидравлическую передачу. Характеристики их определяются параметрами двух этих элементов. Поэтому целесообразно назвать эту систему привода электрогидравлической, что наиболее полно характеризует ее.

Хорошие регулировочные свойства электрогидравлических систем — широкий диапазон регулирования скорости, практически бесступенчатое изменение ее, возможность регулировать скорость

без остановки привода и др. — обеспечили большое распространение их для привода металлорежущих станков.

Электрогидроприводы могут обслуживать механизмы с вращательным и возвратно-поступательным движением рабочего органа. Последнее осуществляется без механических преобразователей вращательного движения в возвратно-поступательное благодаря специфике простейшего типа гидродвигателей — поршневого неротационного, состоящего из цилиндра и поршня со штоком. Такие гидродвигатели наиболее широко применяются в приводах как для подачи, так и для главного движения.

Наряду с преимуществами электрогидропривод обладает и рядом недостатков, ограничивающих его применение. Сюда относятся: повышенная стоимость аппаратуры и гидромашин, высокие требования, предъявляемые к рабочей жидкости, зависимость жесткости характеристик от температуры рабочей жидкости и др.

Существование и развитие электрогидроприводов наряду с электроприводами ставят задачу сравнения этих систем.

Оценка регулировочных свойств привода, как известно, возможна при знании его механических характеристик, наиболее полно разработанных для электроприводов, чего нельзя сказать об электрогидроприводах, которые до последнего времени исследуются с точки зрения качества конструкций гидромашин и аппаратуры.

В настоящей статье впервые предлагается методика построения механических характеристик основных систем электрогидропривода с позиций теории электропривода, что дает возможность правильно подойти к сравнению двух указанных систем по их техническим показателям.

Электрогидравлические системы по построению аналогичны системам генератор — двигатель.

Электрический двигатель приводит во вращение ротор гидронасоса (генератора гидравлической энергии). По соединительным трассам рабочая жидкость под давлением, обусловленным нагрузкой, подводится к гидродвигателю, в котором происходит преобразование гидравлической энергии в механическую. Скорость гидродвигателя определяется количеством рабочей жидкости, подводимой в единицу времени.

Гидромашин могут быть регулируемы и нерегулируемы. В гидронасосах регулируется их производительность, в гидродвигателях — скорость.

Все системы с одной или обеими регулируемы гидромашинными составляют класс электрогидроприводов с объемным регулированием скорости, так как в этом случае скорость гидродвигателя определяется величиной рабочего объема гидромашин.

Регулирование скорости гидродвигателя в системах с нерегулируемыми гидромашинными осуществляется с помощью дросселей и носит название дроссельного регулирования скорости.

Характеристики гидромашин. Характерным параметром гидронасоса является его производи-

тельность, которая для регулируемых конструкций может быть подсчитана по формуле

$$Q_r = u k_n n \text{ [л/мин]}, \quad (1)$$

где u — параметр регулирования гидронасоса (от 0 до 1);

k_n — коэффициент пропорциональности между скоростью приводного двигателя гидронасоса и его производительностью, л/об;

n — скорость приводного двигателя.

Для нерегулируемых гидронасосов действительна та же формула при $u = 1$.

Характерными параметрами гидродвигателя являются скорость и момент (усилие), развиваемые на его валу:

$$n_d = \frac{Q_d}{\psi k_e} \text{ [об/мин]}, \quad (2)$$

где Q_d — расход рабочей жидкости через гидродвигатель, т. е. объем жидкости, подводимой к гидродвигателю в единицу времени;

ψ — параметр регулирования гидродвигателя;

k_e — коэффициент пропорциональности между расходом рабочей жидкости через гидродвигатель и его скоростью;

момент, развиваемый гидродвигателем,

$$M_d = \psi p_d k_m \text{ [кгм]}, \quad (3)$$

где p_d — рабочее давление гидродвигателя; k_m — коэффициент пропорциональности между давлением и моментом (см² м).

В рассматриваемых приводах широкое применение получили поршневые неротационные гидродвигатели для приводов с возвратно-поступательным движением рабочего органа. Простые по своей конструкции, они не требуют механических преобразователей вращательного движения в возвратно-поступательное. Для них:

$$V_d = \frac{Q_d}{k_v} \text{ [л/мин]}, \quad (4)$$

где k_v — коэффициент пропорциональности между расходом рабочей жидкости через гидродвигатель и его скоростью, л/м;

$$F_d = p_d k_f \text{ [кг]}, \quad (5)$$

где k_f — коэффициент пропорциональности между давлением и усилием, см².

Приведенные выше соотношения облегчают подход к выводу уравнений механических характеристик электрогидроприводов.

Механические характеристики систем с объемным регулированием скорости гидродвигателя, по аналогии с электроприводами, являются характеристиками потерь в главной цепи машин.

Главная цепь гидромашин состоит из гидронасоса, соединительных трасс, аппаратуры защиты и управления и гидродвигателя.

В гидросистеме возникают объемные потери от утечек рабочей жидкости через уплотнения

и потери давления от трения жидкости о стены трубопровода. Объемные потери зависят от давления при данной температуре и определяются по объемному к. п. д. гидромашин. Аналогичные падению напряжения в цепи якорей системы генератор—двигатель, они могут быть охарактеризованы скольжением:

$$s = \frac{Q_m - Q(p)}{Q_m} = \frac{q_{ym}(p)}{Q_m} = \frac{s'}{u} p, \quad (6)$$

где Q_m — теоретическая производительность гидронасоса (расход гидродвигателя); $Q(p)$ — расход рабочей жидкости, создающий полезную работу; $q_{ym}(p)$ — утечки рабочей жидкости; s' — удельное скольжение — коэффициент, определяемый по объемному к. п. д. системы, $см^2/кг$.

Полученная зависимость аналогична выражению для скольжения в системе генератор—двигатель.

Потери давления зависят от скорости жидкости и сопротивления трассы, по которой она течет. При их подсчете можно пользоваться формулой для упрощения дальнейших преобразований:

$$\Delta p = R_{mp} Q \quad [кг/см^2], \quad (7)$$

где Q — расход рабочей жидкости через трубопровод; R_{mp} — сопротивление трубопровода.

Для вывода уравнения механической характеристики воспользуемся схемой, изображенной на рис. 1. Ротор гидронасоса вращается со скоростью n_c ; производительность гидронасоса Q_m ; в трассу поступает Q_n рабочей жидкости; $q_{ym}(p)$ — утечки в гидронасосе; потери давления в трассе Δp ; давление в гидродвигателе

$$p_d = p - \Delta p \quad [кг/см^2]; \quad (8)$$

утечки в гидродвигателе $q_{ym}(p_d)$; полезный расход рабочей жидкости через гидродвигатель

$$Q_d = Q_m \left(1 - \frac{s'_n}{u} p - \frac{s'_d}{u} p_d \right) \quad [л/мин]. \quad (9)$$

Объемные потери в аппаратуре относим к одной из гидромашин, вблизи которой располагается аппаратура.

Величину давления гидродвигателя определяет нагрузка на его валу. Следовательно, давление в гидронасосе целесообразно привести к давлению в гидродвигателе.

По соотношениям (7) и (8) получим:

$$p = \frac{p_d + R_{mp} Q_m}{1 + R_{mp} Q_m \frac{s'_n}{u}} \quad [кг/см^2]. \quad (10)$$

При совместном решении двух последних уравнений и исключении величины второго порядка малости (произведение удельных скольжений гидронасоса и гидродвигателя) приходим к формуле:

$$Q_d = \frac{Q_m}{1 + R_{mp} Q_m \frac{s'_n}{u}} \left[1 - p_d \frac{(s'_n + s'_d)}{u} \right] \quad [л/мин]. \quad (9a)$$

Воспользовавшись уравнениями (1), (2), (3) и (9a) и считая, что ротор гидронасоса вращается с синхронной скоростью приводного электродвигателя, нетрудно получить уравнение механической характеристики гидроприводов с объемным регулированием скорости гидродвигателя:

$$n_d = \frac{u k_n n_c}{\phi k_e (1 + s'_n R_{mp} k_n n_c)} \left[1 - \frac{M}{\phi k_m} \frac{(s'_n + s'_d)}{u} \right] \quad [об/мин]. \quad (11)$$

Наиболее удобной для сравнения формой уравнений является безразмерная. К ней и приведем последнее уравнение. Введем следующие обозначения:

$$\nu_d = \frac{n_d}{n_0},$$

где $n_0 = n_c \frac{k_n}{k_e}$ — скорость идеального холостого хода гидродвигателя на естественной характеристике (при $u = 1$ и $\psi = 1$);

для приводов с возвратно-поступательным движением:

$$\nu_d = \frac{V_d}{V_0},$$

где $V_0 = n_c \frac{k_n}{k_v}$ — скорость идеального холостого хода на естественной характеристике;

$\mu = \frac{M}{M_n}$ и $\varphi_d = \frac{F}{F_n}$ — относительные момент и усилие;

$s_{dn} = \frac{M_n s'_d}{k_m}$ — номинальное скольжение гидродвигателя;

$p_{mp} = s'_n R_{mp} k_n n_c$ — удельные потери давления в трассе;

$$\sigma = \frac{s'_n}{s'_d}.$$

Располагая выписанными выше соотношениями, можно получить в безразмерной форме механические характеристики всех типов гидропривода с объемным регулированием скорости. В системах с вращающимся гидродвигателем обе гидромашин вместе с распределительным золотником komponуются в одном корпусе. Со-

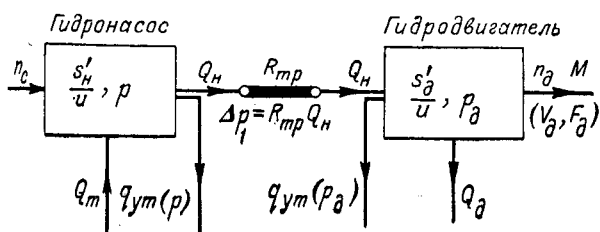


Рис. 1. Схема для вывода уравнений механических характеристик систем объемного регулирования скорости гидродвигателя.

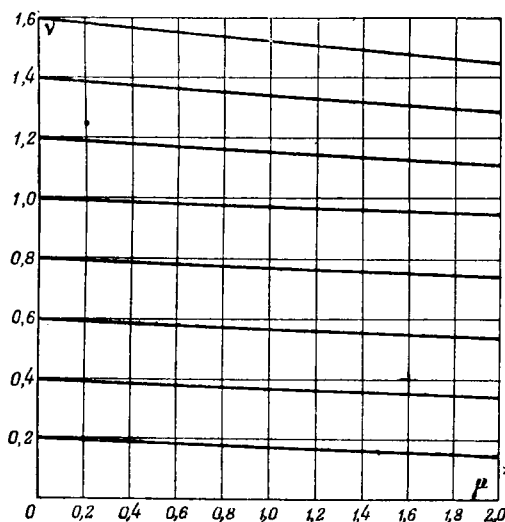


Рис. 2. Механические характеристики гидропривода с регулируемыми гидромашинами.

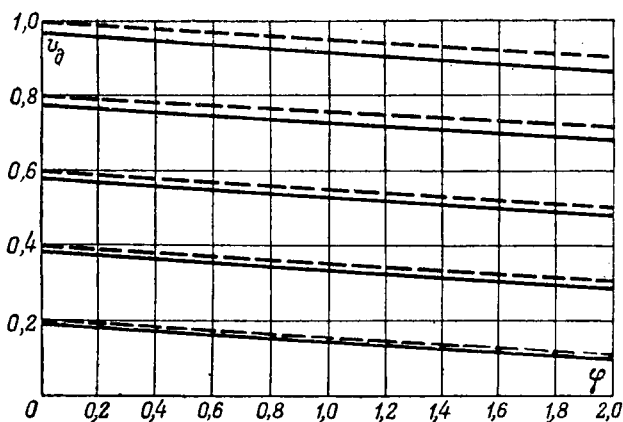


Рис. 3. Механические характеристики системы объемного регулирования скорости с поршневым неротационным гидродвигателем.

противление соединительных трасс мало и может быть принято равным нулю; тогда $p_{тр} = 0$. Уравнение механической характеристики таких систем:

$$v_d = \frac{u}{\psi} - \frac{\mu}{\psi^2} s_{дн} (\sigma + 1). \quad (12)$$

В гидросистемах с поршневым неротационным гидродвигателем $\psi = 1$, и сопротивлением трассы пренебречь нельзя; тогда:

$$v_d = \frac{u}{1 + p_{тр}} \left[1 - \frac{\varphi}{u} s_{дн} (\sigma + 1) \right]. \quad (13)$$

Последние два уравнения аналогичны уравнениям механических характеристик в системе генератор — двигатель, причем характеристики, построенные по (13) (рис. 3), смещены вниз относительно характеристик систем, где потери давления в трассе отсутствуют. По уравнениям (12) и (13) на рис. 2 и 3 построены механические характеристики рассматриваемых систем.

Механические характеристики гидроприводов с дросселем, включенным последовательно с гидродвигателем. На рис. 4 приведены схемы с включением дросселя последовательно с гидродвигателем в напорной трассе (рис. 4, а, „на входе“ системы) и сливной (рис. 4, б, „на выходе“).

Элементом, регулирующим скорость в этих схемах, является дроссель. Расход рабочей жидкости через гидродвигатель определяется характеристикой дросселя, которой можно воспользоваться при выводе уравнения механической характеристики:

$$Q_{др} = c \Delta p^a \text{ [л/мин]}, \quad (14)$$

где $Q_{др}$ — расход рабочей жидкости через дроссель; c — коэффициент, зависящий от степени открытия дросселя и других факторов; Δp — перепад давления в дросселе; a — характеристика дросселя (обычно $a = 0,5 \dots 1$).

Принцип регулирования скорости гидродвигателя при заданной нагрузке состоит в том, что, изменяя раскрытие щели дросселя, изменяют расход рабочей жидкости через гидродвигатель. Остальная часть рабочей жидкости переливается в бак через клапан. Конструкции клапанов такого типа обеспечивают поддержание примерно постоянного давления в полости нагнетания гидронасоса.

Для системы с дросселем, включенным в напорную трассу, уравнение (14) можно записать в следующем виде:

$$Q_{др} = c (p_0 - p_d - p_2 - R_{трн} Q_{др})^a \text{ [л/мин]}. \quad (14a)$$

Для системы, изображенной на рис. 4, б,

$$Q_{др} = c (p_1 - p_2)^a \text{ [л/мин]}. \quad (14б)$$

Так как $p_1 = p_0 - p_d - R_{трн} Q_{др}$, то оба уравнения оказываются сходными, что позволяет обобщить механические характеристики для обеих схем.

Системы дроссельного регулирования рассчитываются обычно на небольшую мощность, трассы

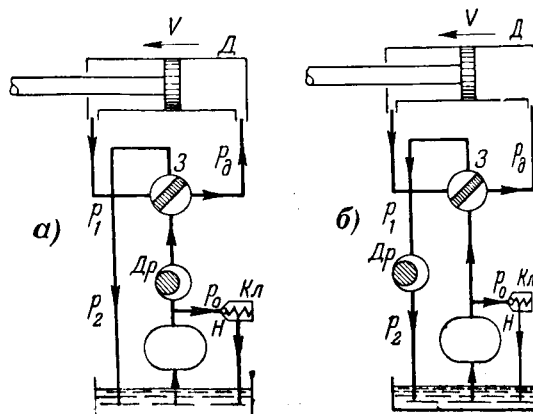


Рис. 4. Схемы дроссельного регулирования. а — последовательное включение дросселя „на входе“; б — последовательное включение дросселя „на выходе“.

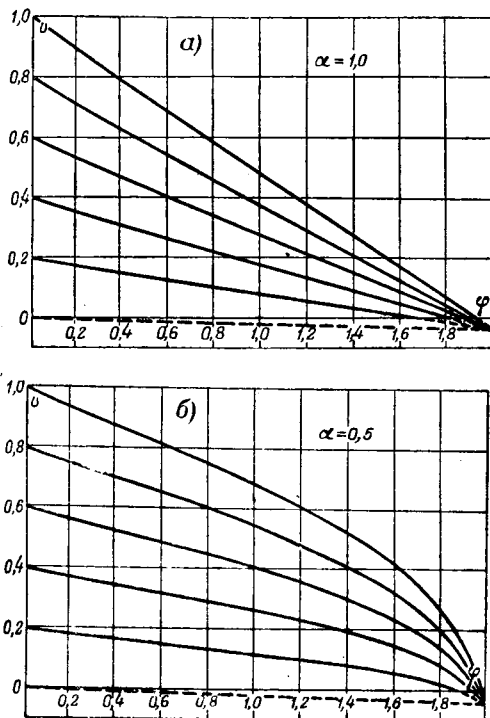


Рис. 5. Механические характеристики систем с последовательно включенным дросселем. а — характеристика дросселя $\alpha=1$; б — характеристика $\alpha=0,5$.

их невелики и расходы рабочей жидкости малы. Поэтому величиной $R_{тр} Q_{др}$ можно пренебречь.

Количество рабочей жидкости, создающее полезную работу, будет меньше расхода через дроссель на величину утечек в гидродвигателе:

$$Q_d = c(p_0 - p_d)^\alpha - s'_d p_d Q_{др0} \quad [\text{л/мин}], \quad (15)$$

где $Q_{др0}$ — расход через дроссель (гидродвигатель) при идеальном холостом ходе и максимально открытом дросселе.

Пользуясь уравнениями (4), (5) и (15) и обозначая $u_f = f/f_{\max}$, где f, f_{\max} — текущее и максимальное раскрытие щели дросселя; $F_0 = p_0 k_f$; $c' = \frac{c f_{\max}}{k_f k_f^2}$, получим уравнение механической характеристики:

$$V_d = u_f c' (F_0 - F_d)^\alpha - s'_d F_d V_{c0} \cdot \frac{1}{k_f} \quad [\text{м/мин}]. \quad (16)$$

По режиму идеального холостого хода при $u_f=1$ определяем $c' = \frac{V_{d0}}{F_0^\alpha}$. В относительных единицах последнее уравнение будет иметь следующий вид:

$$v_d = u_f \frac{(\varphi_0 - \varphi_d)^\alpha}{\varphi_0^\alpha} - \varphi_d s_{dn}. \quad (16a)$$

По полученному уравнению на рис. 5, а и б построены механические характеристики для рассматриваемых систем при $\alpha=1$ и $\alpha=0,5$. Механические характеристики при $\alpha=1$ подобны характеристикам электродвигателя с параллельным возбуждением при шунтировании якоря.

Механические характеристики гидроприводов с дросселем, включенным параллельно гидродвигателю. Схема приведена на рис. 6. Полезный расход рабочей жидкости через гидродвигатель определится по равенству

$$Q_d = Q_n - Q_{др} \quad [\text{л/мин}], \quad (17)$$

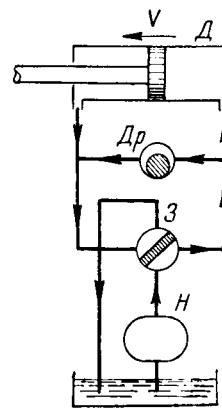
где Q_n — производительность гидронасоса с учетом объемных потерь в гидронасосе и гидродвигателе.

Потерями давления, как и в предыдущем случае, можно пренебречь; тогда $p_d = p_0$ и $p_2 = 0$. Получим:

$$Q_d = Q_n [1 - (s'_n + s'_d) p_d] - c p_d^\alpha \quad [\text{л/мин}]. \quad (17a)$$

После преобразований, аналогичных приведенным, можно получить следующее уравнение механической характеристики:

$$V_d = V_0 - V_0 (s'_n - s'_d) \frac{F_d}{k_f} - u_f c' F_d^\alpha \quad [\text{л/мин}]. \quad (18)$$



Если выполнить замену $u_f c' F_{dn}^\alpha / V_0 = s_{dp}$, то последнее уравнение в относительных единицах примет следующий вид:

$$v_d = 1 - (s_{nn} + s_{dn}) \varphi_d - s_{dp} \varphi_d^\alpha. \quad (18a)$$

Эта схема характеризуется тем, что в ней

Рис. 6. Схема параллельного включения дросселя.

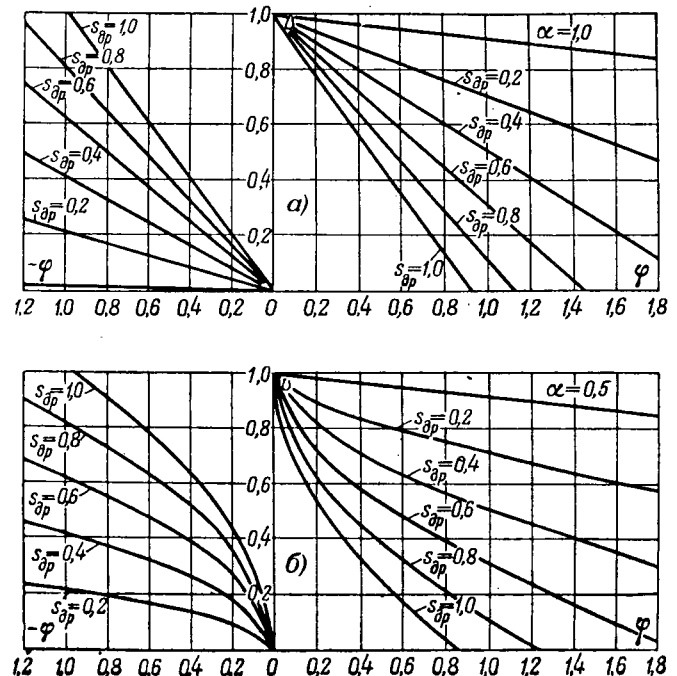


Рис. 7. Механические характеристики системы с параллельно включенным дросселем.

а — характеристика дросселя $\alpha=1$; б — характеристика $\alpha=0,5$.

может иметь место режим, сходный с режимом динамического торможения. Действительно, при отключении гидродвигателя он в силу соответствующего запаса кинетической энергии будет продолжать движение и превратится в поршневой неротационный гидронасос. При этом поток рабочей жидкости через дроссель изменит направление движения. Уравнение механической характеристики для данного режима:

$$v_d = -s_{дн}\varphi_d - s_{др}\varphi_d^a. \quad (18б)$$

По уравнениям (18а) и (18б) на рис. 7 построены механические характеристики, которые при $a=1$ подобны характеристикам электродвигателя с параллельным возбуждением при реостатном регулировании.

Электрические схемы замещения гидросистем. Приведенные выше уравнения позволяют провести следующее сравнение параметров электрических и гидравлических машин, сходных по своему действию.

Величиной, определяющей скорость электродвигателя постоянного тока, является напряжение, приложенное к якорю. В гидросистемах производительность гидронасоса аналогична напряжению. Соответственно расход рабочей жидкости через гидродвигатель эквивалентен э. д. с. электродвигателя. Давление в гидросистемах аналогично току якоря электродвигателя.

Следовательно, объемные потери аналогичны падению напряжения на активном сопротивлении, и можно записать:

$$R'p = q_{ym} [см^3/мин], \quad (19)$$

где R' — объемное сопротивление, $см^5/мин \cdot кг$.

Для относительных единиц

$$r\mu = \Delta v, \text{ или } r\varphi = \Delta v. \quad (19a)$$

Как и для электроприводов, сопротивление в относительных единицах пропорционально скольжению.

Потери давления можно учесть, умножив уравнение механической характеристики на $\frac{1}{1+r_{тр}}$.

Пользуясь этими соотношениями, легко изобразить электрическую схему замещения для любой из гидросистем.

Так, для систем объемного регулирования скорости гидродвигателя действительна схема генератор—двигатель.

Для построения электрической схемы замещения гидросистемы с дросселем, включенным последовательно с гидродвигателем, сопоставим уравнение механической характеристики этой системы с уравнением механической характеристики электродвигателя с шунтированием якоря в относительных единицах ($a=1$):

$$\left. \begin{aligned} v &= u_f - \varphi_d \left(s_{дн} + \frac{u_f}{\varphi_0} \right); \\ v &= \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_n} - \mu \left(r_d + \frac{r_{ш}r_n}{r_{ш} + r_n} \right). \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

На основании сравнения уравнений можно установить:

$$u_f = \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_n} \quad \text{и} \quad r_n = \frac{1}{\varphi_0}.$$

Этим равенством можно дать физическое объяснение, основанное на аналогии, принятой нами выше. Шунтирование якоря электродвигателя и введение последовательно с ним сопротивления можно сравнить с включением якоря на делитель напряжения. Скорость идеального холостого хода определяется по известному соотношению сопротивлений.

В гидросистеме расход рабочей жидкости через дроссель пропорционален открытию его щели. Остальная часть рабочей жидкости сливается через предохранительный клапан, что аналогично падению части напряжения на r_n .

В рассматриваемых схемах точка пересечения всех характеристик определяется координатами:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= -\mu_1 r_d; \\ \mu_1 &= \frac{1}{r_n}; \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= -\varphi_{д1} s_{дн}; \\ \varphi_{д1} &= \varphi_0. \end{aligned} \right\} \quad (21a)$$

Последние выражения свидетельствуют о справедливости второго равенства: $r_n = \frac{1}{\varphi_0}$. Действительно, в электрической схеме для рассматриваемого режима ток якоря, а следовательно, и момент определяются величиной последовательно включенного сопротивления. Выше была установлена аналогия этого сопротивления

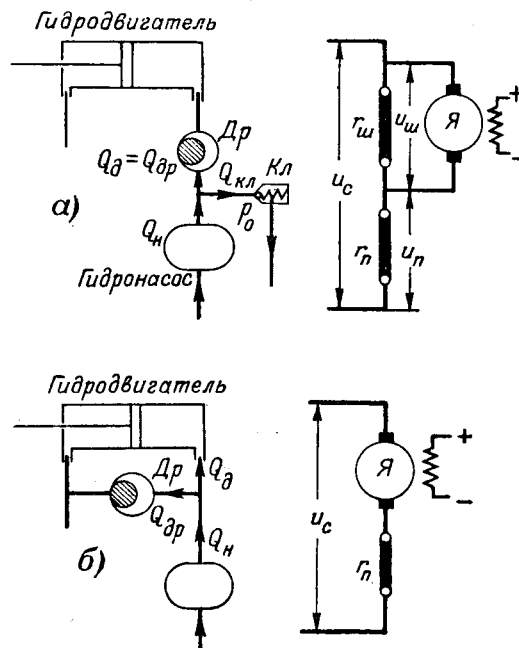


Рис. 8. Электрические схемы замещения гидродвигателей с дроссельным регулированием скорости.

а — последовательное включение дросселя;
б — параллельное.

с переливным клапаном, настройка которого и определяет величину $\varphi_{\partial 1} = \varphi_0$.

Следовательно, гидравлическую схему дроссель—переливной клапан, включенную последовательно с гидродвигателем, можно заменить аналогичной по механическим характеристикам схемой шунтирования якоря электродвигателя с последовательным возбуждением, как это показано на рис. 8,а.

В гидросистемах с дросселем, включенным параллельно с гидродвигателем при $\alpha = 1$, уравнение сходно с уравнением механической характеристики электродвигателя параллельного возбуждения при реостатном регулировании. Схема замещения представлена на рис. 8,б.

В такой системе часть рабочей жидкости ответвляется через дроссель и определяется произведением $\varphi_{\partial} s_{\partial p}$, что соответствует падению напряжения на добавочном сопротивлении в электрической схеме замещения.

Нелинейность характеристик можно объяснить нелинейной зависимостью $r = f(\Phi)$.

Полное уравнение механической характеристики электрогидропривода. Первичным двигателем рассматриваемых систем, как правило, является асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Насосы, а следовательно, и электродвигатели несут переменную нагрузку. Изменение нагрузки электродвигателя вызывает изменение его скорости, что в свою очередь влияет на производительность гидронасоса и скорость гидродвигателя. Влияние механических характеристик электродвигателя не сказывается при включении дросселя последовательно с гидродвигателем, так как в этом случае мощность гидронасоса сохраняется постоянной.

Учесть влияние механической характеристики электродвигателя можно, введя в правую часть уравнений для механических характеристик множитель $[1 - s(\mu)]$, где $s(\mu)$ — зависимость скольжения электродвигателя от нагрузки гидродвигателя. Установим ее.

Мощность гидронасоса определяется по формуле

$$P_n = \frac{p Q_m}{612} [\text{кВт}]. \quad (22)$$

Мощность электродвигателя будет больше мощности гидронасоса на величину вентиляционных и механических потерь в агрегате ($\Delta P_{\text{мех}}$). Определив по (10) p , получим выражение для мощности электродвигателя:

$$P_{\partial} = \frac{p_{\partial} u k_n n + R_{mp} u^2 k_n^2 n^2}{612 (1 + R_{mp} s_n k_n n)} + \Delta P_{\text{мех}} [\text{кВт}]. \quad (23)$$

Выполняя замену $n^2 \approx n n_c$ и полагая $n = n_c$ в знаменателе, после подстановок уравнений (1), (2) и (3) и определения момента электродвигателя получим в относительных единицах:

$$\begin{aligned} \mu_{\partial} &= 1,59 \mu \frac{u}{\phi} \cdot \frac{k_n}{k_m} \cdot \frac{1}{1 + \rho_{mp}} + \\ &+ 1,59 \mu_{mp} \frac{u^2}{1 + \rho_{mp}} \cdot \frac{k_n}{k_m} + \Delta \mu_{\text{мех}} \end{aligned} \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} \mu_{\partial} &= \frac{M_{\partial}}{M_{\partial n}}; \quad \mu_{mp} = \frac{R_{mp} k_n n_c k_m}{M_{\partial n}}; \\ \Delta \mu_{\text{мех}} &= \frac{\Delta M_{\text{мех}}}{M_{\partial n}}. \end{aligned}$$

Для рабочего участка механической характеристики, считая его прямолинейным, можно записать:

$$v_{\partial} = 1 - s_{\partial n} \frac{\mu_{\partial}}{\mu_{\partial n}}, \quad (25)$$

где

$$\mu_{\partial n} = \frac{M_{\partial n}}{M_{\partial n}}.$$

Нетрудно показать, что $1,59 \frac{k_n}{k_m} \cdot \frac{1}{\mu_{\partial n}} = \frac{P_{\partial n}}{P_{\partial n}} = \eta' - \text{к. п. д. системы без учета электрических потерь в электродвигателе и механических потерь в гидродвигателе. Тогда}$

$$\begin{aligned} v_{\partial} &= 1 - s_{\partial n} \left(\mu \frac{u}{\phi} \cdot \frac{\eta'}{1 + \rho_{mp}} + \right. \\ &\left. + \mu_{mp} u^2 \frac{\eta'}{1 + \rho_{mp}} + \frac{\Delta \mu_{\text{мех}}}{\mu_{\partial n}} \right). \end{aligned} \quad (25a)$$

Полное уравнение механической характеристики электрогидропривода для системы объемного регулирования с вращающимися гидромашинами можно получить, полагая $\rho_{mp} = 0$; $\mu_{mp} = 0$. Положим также $1 - s_{\partial} \frac{\Delta \mu_{\text{мех}}}{\mu_{\partial n}} = a$ и $s_{\partial n} \eta' = s'_{\partial n}$. Тогда уравнение механической характеристики электрогидропривода:

$$v_{\partial} = \left(a - s'_{\partial n} \mu \frac{u}{\phi} \right) \left[\frac{u}{\phi} - \frac{\mu}{\phi^2} s_{\partial n} (\sigma + 1) \right]. \quad (26)$$

На рис. 9 приведены механические характеристики, построенные по формулам (26) и (12). Как видно, их жесткости разнятся, а скорости идеального холостого хода смещены одна относительно другой, так как в формуле (12) принято для гидронасоса $n = n_c$.

Если ввести обозначение $s_2 = s_{\partial n} \frac{\sigma + 1}{u}$, то по известному соотношению для скольжения, пользуясь уравнением (26), можно определить эквивалентное скольжение.

Так как при изменении ϕ регулирование осуществляется при постоянной мощности, то на выражение для скольжения электрогидропривода этот параметр влияния не оказывает; кроме того, при уменьшении ϕ должен быть уменьшен и момент, чтобы давление сохранилось номинальным:

$$s_{\text{экв}} = \frac{s'_{\partial}}{a} \cdot u (1 - s_2) + s_2. \quad (27)$$

Последняя формула пригодна для определения эквивалентного скольжения двигателя, питаемого от любого преобразовательного агрегата.

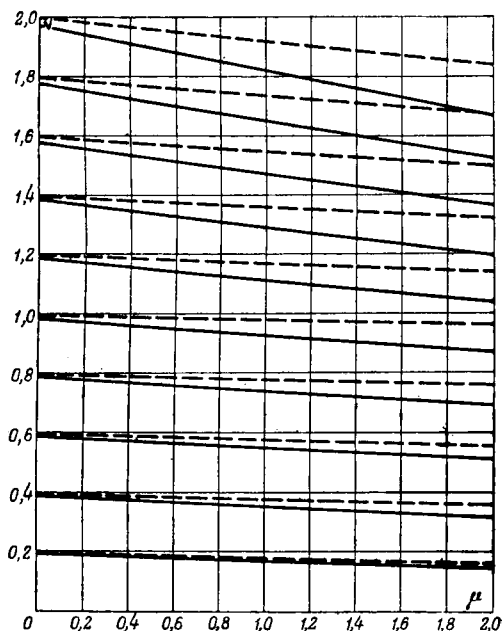


Рис. 9. Механические характеристики электрогидроприводов с регулируемым вращающимся гидромашинными. Для сравнения штрихами показаны характеристики гидросистемы.

Пользуясь уравнением (25а) и уравнениями механических характеристик гидропривода, можно получить интересные нас механические характеристики электрогидроприводов.

Выводы. Приведенные в работе уравнения механических характеристик позволяют сравнить электрогидропривод с электроприводом. Для сложных систем, где применяется комбинация электрического и электрогидравлического приводов, пользуясь электрическими схемами замещения гидросистемы, можно привести гидравлические элементы к электрическим, что позволит просто выполнить анализ таких систем.

Разработка теории построения механических характеристик электрогидроприводов с позиций классической теории электропривода позволяет более строго подойти к выбору системы привода для конкретного исполнительного механизма по статическим характеристикам и регулировочным свойствам.

Приложение I. Механические характеристики гидросистемы с вращающимися гидромашинными: мощность двигателя 25,7 кВт, номинальное давление $p_{дн} = 120 \text{ кг/см}^2$; производительность гидронасоса $Q_n = 140 \text{ л/мин}$; удельное скольжение гидромашин $s'_n = s'_d = 0,00012 \text{ см}^2/\text{кг}$. По принятым обозначениям

$$\sigma = \frac{s'_n}{s'_d} = 1 \quad \text{и} \quad s_{дн} = s'_d p_{дн} = 0,0144.$$

По (12)

$$v_d = \frac{u}{\phi} - \frac{\mu}{\phi^2} 0,0288.$$

Характеристика построена на рис. 2.

Приложение II. Система: регулируемый гидронасос — поршневой неротационный гидродвигатель. Данные гидродвигателя: $p_{дн} = 30 \text{ кг/см}^2$; $k_v = 254 \text{ см}^3/\text{м}$; $s'_d = 0,00087 \text{ см}^2/\text{кг}$.

Данные гидронасоса: $Q_m = 230 \text{ л/мин}$; $k_n = 230 \text{ см}^3/\text{об}$; $s'_n = 0,000758$. Сопротивление трассы $R_{тр} = 0,0192 \text{ кг} \times \text{мин}/\text{см}^5$. Скорость идеального холостого хода гидродвигателя

$$V_o = n_c \frac{k_n}{k_v} = 9,05 \text{ м/мин}.$$

$$p_{тр} = s'_n R_{тр} \frac{k_v V_o}{100} = 0,0333; \quad \sigma = 0,87; \quad s_{дн}(\sigma + 1) = 0,0488.$$

По (13)

$$v = \frac{u - \varphi 0,0488}{1,0333}.$$

Характеристика построена на рис. 3.

Приложение III. Система дроссельного регулирования на входе. Номинальное давление гидродвигателя $p_{дн} = 15 \text{ кг/см}^2$; шестеренный гидронасос $Q_n = 35 \text{ л/мин}$; номинальное скольжение гидродвигателя $s_{дн} = 0,02$; настройка переливного клапана $p_0 = 30 \text{ кг/см}^2$. По (16а)

$$v_d = u_f \frac{(2 - \varphi_d)^2}{2} - 0,02 \varphi_d.$$

Механические характеристики построены на рис. 5а и 5б для $\alpha = 1$ и $\alpha = 0,5$.

Приложение IV. Лопастной нерегулируемый гидронасос производительностью $Q_m = 42 \text{ л/мин}$, $s_{нн} = 0,0715$; питает поршневой неротационный гидродвигатель $p_{дн} = 35 \text{ кг/см}^2$, $s_{дн} = 0,0175$. Регулирование скорости осуществляется с помощью дросселя, включенного параллельно гидродвигателю.

По (18а) и (18б):

$$v_d = 1 - 0,089 \varphi_d - s_{дн} \varphi_d^2;$$

$$v_d = -0,0175 \varphi_d - s_{дн} \varphi_d^2.$$

Механические характеристики построены на рис. 7 для $\alpha = 1$ и $\alpha = 0,5$.

Приложение V. Электропривод с вращающимися регулируемым гидромашинными. Гидродвигатель: $p_{дн} = 2,5 \text{ кг/см}^2$; $M_{дн} = 1,55 \text{ кгм}$; $p_{дн} = 15,5 \text{ кг/см}^2$. Гидронасос: $Q_n = 100 \text{ л/мин}$, $s'_n = s'_d = 0,0006$; $\eta_n = 0,88$. Приводной электродвигатель: $P_{дн} = 2,8 \text{ кВт}$; $s_{дн} = 0,053$; $M_{дн} = 1,92 \text{ кгм}$.

$$\Delta P_{мех} = 0,34 + 0,30 = 0,54 \text{ кг/см}^2.$$

$$\Delta M_{мех} = 0,44 \text{ кгм}.$$

$$\alpha = 1 - 0,053 \cdot 0,44 / 1,92 = 0,988.$$

$$\eta' = \frac{2,5}{2,8} = 0,89;$$

$$\sigma = 1; \quad s_{дн}(\sigma + 1) = 0,02; \quad s'_{дн} = 0,047.$$

По (26)

$$v_d = \left(0,988 - 0,047 \mu \frac{u}{\phi} \right) \cdot \left(\frac{u}{\phi} - \frac{\mu}{\phi^2} \cdot 0,02 \right).$$

По последнему уравнению построены механические характеристики на рис. 9.

Обозначения

- Q_m — теоретическая производительность гидронасоса.
- u — параметр регулирования гидронасоса.
- k_n — коэффициент пропорциональности между скоростью приводного двигателя гидронасоса и его производительностью.
- n — скорость приводного двигателя.
- p_d — скорость гидродвигателя.
- Q_d — расход рабочей жидкости через гидродвигатель.
- ϕ — параметр регулирования гидродвигателя.
- k_e — коэффициент пропорциональности между расходом через двигатель и его скоростью.

p_d — давление гидродвигателя.
 k_m — коэффициент пропорциональности между моментом и давлением.
 V_d — скорость гидродвигателя.
 k_v — коэффициент пропорциональности между скоростью гидродвигателя и расходом.
 F_d — усилие гидродвигателя.
 k_f — коэффициент пропорциональности между давлением и усилием.
 s — скольжение.
 s_d — удельное скольжение.
 $q_w(p)$ — утечки.
 Δp — потери давления.
 $R_{тр}$ — сопротивление трассы.
 s_d' — удельное скольжение гидродвигателя.
 s_n' — удельное скольжение гидронасоса.
 n_c — синхронная скорость электродвигателя.
 v_d — относительная скорость гидродвигателя.
 n_0 — скорость идеального холостого хода гидродвигателя.
 v_d — относительная скорость гидродвигателя.
 V_0 — скорость идеального холостого хода.
 μ — относительный момент.
 φ_d — относительное усилие.
 M_n — номинальный момент гидродвигателя.
 F_n — номинальное усилие гидродвигателя.
 s_{dn} — номинальное скольжение двигателя.
 ε — отношение удельных скольжений.
 $p_{тр}$ — удельные потери давления в трассе.
 $Q_{др}$ — расход через дроссель.

c — коэффициент пропорциональности.
 Δp^2 — перепад давлений.
 p_0 — давление в гидронасосе.
 $R_{тр.н}, R_{тр.сл}$ — сопротивления напорной и сливной трасс.
 F_0 — усилие.
 u_f — относительный расход через дроссель.
 f_{max} — максимальное сечение щели дросселя.
 V_{d0} — скорость идеального холостого хода.
 φ_0 — относительное усилие.
 s_{nn} — номинальное скольжение гидронасоса.
 $s_{др}$ — скольжение дросселя.
 K' — объемное сопротивление.
 r — относительное сопротивление.
 $r_{ш}, r_n$ — относительные сопротивления, последовательное и шунтирующее.
 U — напряжение.
 P_n, P_d — мощности насоса и электродвигателя.
 $\Delta P_{мех}$ — потери мощности механические.
 μ_d — относительный момент электродвигателя.
 $\mu_{тр}$ — относительные потери в трассе.
 $\Delta \mu_{мех}$ — относительные механические потери.
 v_d — относительная скорость электродвигателя.
 $P_{дн}, P_{эн}$ — мощности номинальные гидро- и электродвигателя.
 η' — к. п. д. системы без учета электрических потерь и механических потерь в гидродвигателе.
 s_z — гидравлическое скольжение.

[19. 11. 1952]



Исследование процесса самовозбуждения тяговых двигателей последовательного возбуждения при реостатном торможении

Кандидат техн. наук М. З. ЖИЦ

Академия коммунального хозяйства им. Памфилова

На подвижном составе городского и магистрального транспорта с двигателями последовательного возбуждения за последние 10...15 лет нашло повсеместное применение реостатное электрическое торможение, построенное на принципе самовозбуждения двигателей в начальной стадии тормозного процесса как генераторов последовательного возбуждения.

Однако при этом способе торможения, в момент замыкания цепи генераторов на сопротивление, ток в начальное мгновение равен нулю и возрастает сравнительно медленно, по мере самовозбуждения машин. При проектировании двигателей и аппаратуры управления совершенно необходимо учесть особенности этого переходного процесса. Вместе с тем чисто экспериментальное изучение явлений является весьма сложным.

Ниже излагаются основные результаты теоретического решения этой задачи, подтвержденного экспериментально, на основании материалов исследования новых вагонов типа Г.

Излагаются результаты теоретического и экспериментального исследования процесса самовозбуждения тяговых двигателей последовательного возбуждения на подвижном составе при реостатном торможении с учетом вихревых токов в массивном магнитопроводе электродвигателей, нелинейности их магнитной характеристики и возможного изменения параметров цепи в ходе процесса самовозбуждения.

Теория. Самовозбуждение при реостатном торможении происходит в относительно малые промежутки времени, в течение которых скорость подвижного состава существенно не успевает измениться.

Поэтому достаточно исследовать процесс самовозбуждения двигателя при постоянной его скорости вращения.

Решение должно, однако, учесть возможное уменьшение сопротивления цепи и усиление поля в процессе торможения. Для практического своего применения оно должно также учесть насыщение стали и вихревые токи в массивных частях магнитопровода. Как показывает опытная проверка, расчеты процесса самовозбуждения генераторов последовательного возбуждения в пренебрежении вихревыми токами не дают правильного представления даже о порядке исследуемых величин. Например, самовозбуждение двигателей при скорости вагона 71,5 км/час длится около 2 сек (рис. 1); если же пренебречь вихревыми токами, процесс должен был бы завершиться за 0,027 сек.

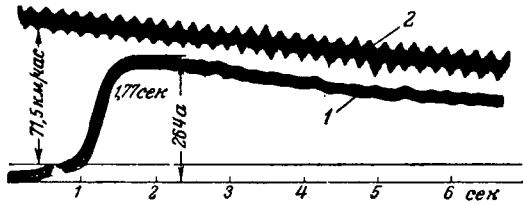


Рис. 1. Ток самовозбуждения двигателя типа ДК-102 при скорости вагона 71,5 км/час.

1 — ток; 2 — скорость двигателя.

Решение для начальной фазы процесса. Машина включена как генератор на реостат.

Обозначим: Φ — полезный поток якоря; R — омическое сопротивление всей цепи; L — суммарная индуктивность якоря и добавочных полюсов; w — число витков обмотки возбуждения главного полюса; $2q$ — число полюсов машины; n — скорость вращения машины; σ — коэффициент рассеяния главного полюса.

Под начальной фазой процесса будем понимать период нарастания магнитного потока машины до такого максимального значения, при котором стационарная магнитная характеристика машины может практически еще считаться прямой.

Обозначим

$$k = \frac{qN}{60a};$$

$$E = \frac{qN}{60a} \Phi n = k \Phi n.$$

Для замкнутого контура тормозной цепи уравнение равновесия напряжений дает:

$$k \Phi n = IR + L \frac{dI}{dt} + 2q \sigma w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

Применительно к рассматриваемой начальной фазе процесса, когда остов и главные полюсы не насыщены, принимаем проницаемость стали за постоянную величину. При включении постоянных ампервитков $w i_o$ на главные полюсы машины ее постепенно нарастающий магнитный поток

$$\Phi = \Phi_o + \frac{w i_o}{R_m(t)}. \quad (2)$$

В этом уравнении Φ_o — остаточный магнитный поток; $R_m(t)$ — переходное магнитное сопротивление машины.

При самовозбуждении машины магнитный поток машины в операторной форме будет:

$$\Phi(p) = \Phi_o + \Phi_1(p) = \Phi_o + \frac{w I(p)}{R_m(p)}. \quad (3)$$

Решение уравнения (1) относительно $I(p)$ дает:

$$I(p) = \frac{k \Phi_o n}{p \left[L + \frac{2q \sigma w^2}{R_m(p)} \right] + R - \frac{k w n}{R_m(p)}}. \quad (4)$$

Для нахождения оригинала изображения (4) необходимо найти операторное магнитное сопротивление машины $R_m(p)$ (приложение I):

$$R_m(p) = \frac{F(p)}{\Phi(p)} = \sigma R_{mj}(p) + \sigma R_{mp}(p) + R_{mi}(p) + R_{ma}(p), \quad (5)$$

где $R_{mj}(p)$, $R_{mp}(p)$, $R_{mi}(p)$, $R_{ma}(p)$ — соответственно операторные магнитные сопротивления остова, главного полюса, воздушного зазора и якоря; $F(p)$ — н. с.

В рассматриваемой пока первой фазе процесса магнитные сопротивления зазора и якоря являются постоянными величинами, и задача подсчета полного операторного магнитного сопротивления машины сводится к определению операторного магнитного сопротивления остова и главного полюса.

Операторные магнитные сопротивления главного полюса и остова. Приближенно рассматриваем главный полюс как прямоугольный сердечник осевой длины l_p со сторонами a_p и b_p , в котором силовые линии параллельны ребру l_p (рис. 2).

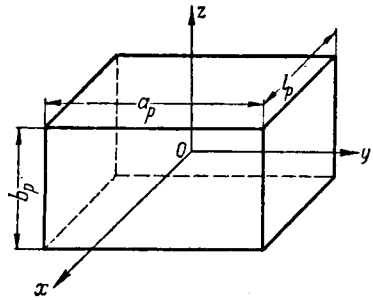


Рис. 2. Идеализированный главный полюс.

Направим ось x параллельно магнитным силовым линиям, ось y — параллельно ребру a_p и ось z — параллельно ребру b_p . Применяя уравнения Максвелла к полю в сердечнике, получим для изменяющегося магнитного поля в сердечнике дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} = \gamma \mu \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (6)$$

где γ — электропроводность;

μ — магнитная проницаемость сердечника.

Т. Г. Сорокер [Л. 1] получил следующее выражение для операторной магнитной проводимости упомянутого прямоугольного сердечника:

$$\frac{1}{R_m(p)} = \frac{\mu a_p b_p}{l_p} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{64}{\pi^4 (2m+1)^2 (2n+1)^2} \cdot \frac{1}{1 + p T_{mn}} \quad (7)$$

(m и $n = 0, 1, 2, 3 \dots$),

где

$$T_{mn} = \frac{\gamma \mu}{\pi^2} \cdot \frac{a_p^2 b_p^2}{(2m+1)^2 b_p^2 + (2n+1)^2 a_p^2}.$$

Магнитное сопротивление остова (рис. 3) можно рассматривать как половину магнитного сопротивления прямоугольной стальной плиты с размерами a_j ; b_j ; l_j , в которой магнитные силовые линии параллельны ребру l_j . Размер l_j равен половине длины средней силовой линии остова; b_j — средняя толщина активной части остова;

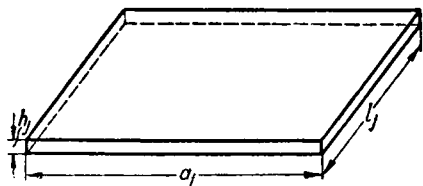


Рис. 3. Идеализированный остов.

a_j — осевой размер активной магнитопроводящей части остова.

Для переходной магнитной проводимости плиты по рис. 3 имеет место следующее выражение (приложение II):

$$\frac{1}{R_{mj}(t)} = \frac{\mu a_j b_j}{l_j} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} (1 - e^{-\frac{t}{T_n}}). \quad (8)$$

Соответственно для операторной переходной магнитной проводимости остова

$$\frac{1}{R_{mj}(p)} = \frac{\mu a_j b_j}{l_j} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{16}{(2n+1)^2 \pi^2} \frac{1}{1 + p T_n}, \quad (9)$$

где

$$T_n = \frac{\gamma \mu}{\pi^2} \frac{b_j^2}{(2n+1)^2}. \quad (10)$$

Операторное магнитное сопротивление машины. Операторное магнитное сопротивление машины в целом по контуру главного магнитного потока выражается уравнением (5). Теоретически можно получить выражение операторного магнитного сопротивления машины, учитывающее как основную волну, так и высшие гармоники вихревых токов.

Однако при анализе сравнительно медленного процесса самовозбуждения машины можно с достаточной для практических целей точностью ограничиться лишь учетом основной волны вихревых токов, так как высшие гармоники потока в соответствии с (7) и (10) имеют весьма малые постоянные времени, убывающие обратно пропорционально квадрату порядка этих гармоник при отсутствии к тому же четных гармоник и затухают поэтому очень быстро. Это подтверждено также проверкой на эксперименте при исследовании самовозбуждения двигателей на вагонах типа Г. При учете лишь основной волны вихревых токов операторные магнитные проводимости главного полюса и остова в соответствии с уравнениями (7) и (9) выразятся следующим образом:

$$\frac{1}{R_{mp}(p)} = \frac{64}{\pi^4} \frac{1}{1 + p T_{oo}} \cdot \frac{\mu a_p b_p}{l_p}; \quad (11)$$

$$\frac{1}{R_{mj}(p)} = \frac{16}{\pi^2} \frac{1}{1 + p T_o} \cdot \frac{\mu a_j b_j}{l_j}. \quad (12)$$

Полное операторное магнитное сопротивление машины в соответствии с уравнением (5) определяется тогда из уравнения

$$\begin{aligned} R_m(p) &= \sigma R_{mj}(p) + \sigma R_{mp}(p) + R_{m(l+z+a)} = \\ &= R_{m(l+z+a)} + \frac{\sigma l_j}{\mu a_j b_j} \cdot \frac{\pi^2}{16} (1 + p T_o) + \\ &+ \frac{\sigma l_p}{\mu a_p b_p} \cdot \frac{\pi^4}{64} (1 + p T_{oo}) = R_{m(l+z+a)} + \\ &+ \frac{\pi^2 \sigma l_j}{16 \mu a_j b_j} + \frac{\pi^4 \sigma l_p}{64 \mu a_p b_p} + \\ &+ p \left(\frac{\sigma l_j T_o}{\mu a_j b_j} \cdot \frac{\pi^2}{16} + \frac{\sigma l_p T_{oo}}{\mu a_p b_p} \cdot \frac{\pi^4}{64} \right) = R_m + L_m(p). \quad (13) \end{aligned}$$

Сопоставляя выражение (13) с операторным сопротивлением электрической цепи с активным сопротивлением R и индуктивностью L , мы видим, что R_m — не что иное, как стационарное магнитное сопротивление машины на ненасыщенной части магнитной характеристики, тогда как постоянную L_m по Аркадьеву [Л. 2] можно называть магнитной индуктивностью машины. Подобно тому как в электрической цепи э. д. с. самоиндукции $e_c = -L \frac{di}{dt}$, так и в магнитной цепи н. с. основной волны вихревых токов

$$F_s = -L \frac{d\Phi}{dt}. \quad (14)$$

Вследствие того что нами в выражениях (7) и (8) учтена лишь основная волна вихревых токов, постоянная R_m в (13) несколько (правда, незначительно) отличается от действительного стационарного магнитного сопротивления машины на ненасыщенной части магнитной характеристики. Поэтому, в дальнейшем в целях достижения наибольшей точности, а также и простоты будем постоянную R_m определять непосредственно из магнитной характеристики машины, что, однако, в соответствии с (14) не изменяет величины вихревых токов основной волны при заданной скорости изменения магнитного потока. В соответствии с (13) получаем следующее выражение:

$$L_m = \sigma \left[\frac{\gamma b_j l_j}{16 a_j} + \frac{\gamma \pi^2 l_p a_p b_p}{64 (a_p^2 + b_p^2)} \right]. \quad (15)$$

Таким образом, магнитная индуктивность машины L_m , определяющая н. с. вихревых токов, не зависит от магнитной проницаемости массивных частей магнитопровода, а определяется лишь их геометрическими размерами и электропроводностью материала. Это весьма ценно с точки зрения точности получаемых результатов, поскольку магнитная проницаемость, как известно, колеблется в широких пределах.

Ток в первой фазе процесса самовозбуждения. Подставляя в уравнение (4) выражение (13) операторного магнитного сопротивления машины, получаем сначала операторные выражения тока

в цепи машины и ее магнитного потока, а затем и ток и поток в функции времени:

$$I(t) = \frac{k\Phi_o n}{LL_m} \left[\frac{R_m + L_m p_1}{p_1(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - 1) + \frac{R_m + L_m p_2}{p_2(p_1 - p_2)} (1 - e^{p_2 t}) \right]; \quad (16)$$

$$\Phi(t) = \frac{k\Phi_o n w}{LL_m} \left[\frac{e^{p_1 t} - 1}{p_1(p_1 - p_2)} + \frac{1 - e^{p_2 t}}{p_2(p_1 - p_2)} \right] + \Phi_o, \quad (17)$$

где p_1 и p_2 — корни характеристического уравнения для данного процесса

$$LL_m p^2 + p(R_m L + L_m R + 2q\tau w^2) + L_m R - k\omega n = 0. \quad (18)$$

Физический смысл и значение уравнений (16) и (17) анализируются ниже.

Изменение параметров в процессе самовозбуждения. Пусть процесс самовозбуждения протекает по уравнениям (16) и (17) и пусть ток достиг значения $I = I_o$, а магнитный поток — значения $\Phi_o + \Phi_{1o}$, причем в соответствии со стационарной магнитной характеристикой для поддержания потока Φ_{1o} требуется н. с. F_o . Пусть в этот момент происходит изменение параметров цепи — величины тормозного сопротивления и числа витков обмотки главного полюса. Тогда дальнейший процесс нарастания тока и потока определяется уравнениями (приложение III):

$$I = I_o + \frac{R_m + p_{11} L_m}{w} \left[\frac{w I_o - F_o}{(p_{11} - p_{21}) L_m} - \frac{p_{21} \Phi_{1o}}{p_{11} - p_{21}} + \frac{k\omega n \Phi_o}{p_{11}(p_{11} - p_{21}) LL_m} \right] (e^{p_{11} t} - 1) + \frac{R_m + p_{21} L_m}{w} \left[\frac{w I_o - F_o}{L_m (p_{11} - p_{21})} - \frac{p_{11} \Phi_{1o}}{p_{11} - p_{21}} + \frac{k\omega n \Phi_o}{p_{21} (p_{11} - p_{21})} \right] (1 - e^{p_{21} t}); \quad (19)$$

$$\Phi(t) = \Phi_o + \Phi_{1o} + \left[\frac{w I_o - F_o}{L_m (p_{11} - p_{21})} - \frac{p_{21} \Phi_{1o}}{p_{11} - p_{21}} + \frac{k\omega n \Phi_o}{p_{11} (p_{11} - p_{21}) LL_m} \right] (e^{p_{11} t} - 1) + \left[\frac{w I_o - F_o}{L_m (p_{11} - p_{21})} - \frac{p_{11} \Phi_{1o}}{p_{11} - p_{21}} + \frac{k\omega n \Phi_o}{p_{21} (p_{11} - p_{21}) LL_m} \right] (1 - e^{p_{21} t}). \quad (20)$$

В этих уравнениях p_{11} и p_{21} — корни некоторого характеристического уравнения

$$LL_m p^2 + p(R_m L + L_m R_1 + 2q\tau w_1^2) + R_m R_1 - k\omega_1 n = 0. \quad (21)$$

Процесс самовозбуждения на криволинейной части магнитной характеристики. Для исследования дальнейшего протекания процесса, прежде всего заменяем приближенно магнитную характеристику машины $\Phi(I)$ выпуклой ломаной линией $Oabc$ из нескольких (обычно трех) прямо-

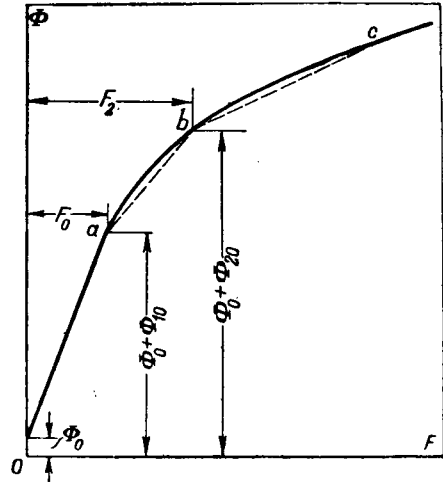


Рис. 4. Кусочно-линейная аппроксимация кривой намагничивания.

линейных отрезков, достаточно точно приближающейся к криволинейной характеристике (рис. 4).

Пусть в процессе самовозбуждения магнитный поток достиг значения $\Phi_o + \Phi_{1o}$, соответствующего точке a стационарной магнитной характеристики, причем для поддержания потока $\Phi_o + \Phi_{1o}$ в соответствии со стационарной магнитной характеристикой необходима н. с. F_o . Пусть в это же мгновение ток в цепи достиг значения I_o . Тогда, как следует из развитой теории (приложение IV), при возрастании магнитного потока от начального значения Φ_{1o} , соответствующего точке a магнитной характеристики, до конечного значения Φ_{2o} , соответствующего точке b этой характеристики, процесс изменения тока и потока характеризуется уравнениями:

$$I = I_o + \frac{R_{m1} + L_{m1} p_{12}}{w} \left[\frac{w I_o - F_o}{L_{m1} (p_{12} - p_{22})} + \frac{k\omega n (\Phi_o + \Phi_{1o}) - F_o R}{p_{12} (p_{12} - p_{22}) LL_{m1}} \right] (e^{p_{12} t} - 1) + \frac{R_{m1} + L_{m1} p_{22}}{w} \left[\frac{w I_o - F_o}{L_{m1} (p_{12} - p_{22})} + \frac{k\omega n (\Phi_o + \Phi_{1o}) - F_o R}{p_{22} (p_{12} - p_{22}) LL_{m1}} \right] (1 - e^{p_{22} t}). \quad (22)$$

$$\Phi(t) = \Phi_o + \Phi_{1o} + \left[\frac{w I_o - F_o}{L_{m1} (p_{12} - p_{22})} + \frac{k\omega n (\Phi_o + \Phi_{1o}) - F_o R}{p_{12} (p_{12} - p_{22}) L_{m1} L} \right] (e^{p_{12} t} - 1) + \left[\frac{w I_o - F_o}{L_{m1} (p_{12} - p_{22})} + \frac{k\omega n (\Phi_o + \Phi_{1o}) - F_o R}{p_{22} (p_{12} - p_{22}) LL_{m1}} \right] (1 - e^{p_{22} t}). \quad (23)$$

В этих уравнениях через R_{m1} обозначено постоянное дифференциальное магнитное сопротивление $\frac{dF_o}{d\Phi}$ на участке ломаной линии ab (рис. 4), аппроксимирующей магнитную характеристику.

Через L_{m1} обозначена магнитная индуктивность для основной волны вихревых токов на участке характеристики ab :

$$L_{m1} = L_m \frac{\sigma_1}{\sigma}, \quad (24)$$

$$\text{где}^* \quad \sigma_1 = 1 + (\sigma - 1) \frac{R_{m,cr}}{R_m}. \quad (25)$$

p_{12} и p_{22} являются, аналогично прежнему, корнями характеристического уравнения

$$LL_{m1}p^2 + (R_{m1}L + L_{m1}R + 2q\sigma_1\omega^2)p + R_{m1}R - k\omega n = 0. \quad (26)$$

Аналогично определяется протекание процесса и на следующем участке магнитной характеристики bc . На этом участке оба показателя p_{13} и p_{23} становятся отрицательными и, следовательно, ток и поток достигают установившихся значений.

Экспериментальная проверка. Численная проверка соответствия теоретических результатов с исследованиями, произведенными на вагонах типа Г в диапазоне скоростей 72...16 км/час, показала совпадение развитой выше теории с экспериментом в пределах точности осциллографа (рис. 5). Индуктивность якоря определя-

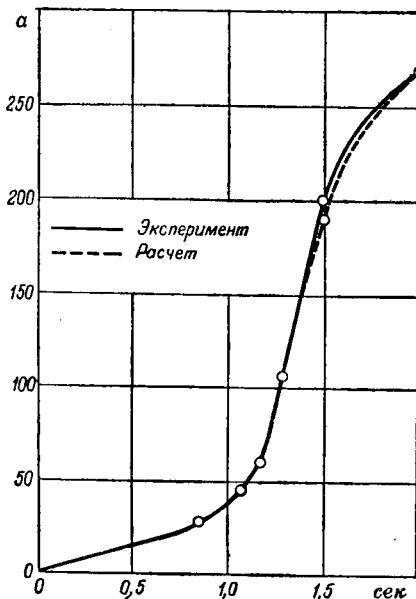


Рис. 5.

лась при численной проверке теории из известного уравнения [Л. 3]:

$$L_a = \left(\frac{\alpha^3 N^2 I_a D_a}{48,5 q^2 a^2 \delta_s} 10^{-8} + \frac{0,4 \pi N^2 I_a h_z}{12 Q a^2 b} 10^{-8} \right) H.$$

Индуктивность добавочных полюсов подсчитывалась по формуле завода „Динамо“ им. Кирова:

$$L_{wp} = 0,6 \frac{2q\omega \Phi'}{I_h}.$$

* $R_{m,cr} = \frac{F_{cr}}{\Phi_{cr}}$ на участке ab магнитной характеристики.

В этих уравнениях приняты следующие обозначения: l_a — активная длина якоря, см; α — коэффициент перекрытия главного полюса; D_a — диаметр якоря, см; δ_s — приведенный воздушный зазор, см; h_z — высота паза, см; b — ширина паза, см; Q — число пазов якоря; ω — число витков катушки добавочного полюса; Φ' — магнитный поток у основания добавочного полюса при часовом токе, *всек*; I_h — часовой ток машины.

Вместе с тем эта численная проверка вскрыла физический смысл полученных уравнений, выявив практическое значение отдельных факторов, влияющих на процесс.

Вначале процесс самовозбуждения протекает по уравнению (16). Из этого уравнения видно, что ток состоит из двух возрастающих экспоненциальных функций:

$$\frac{k\Phi_0 n}{LL_m} \cdot \frac{R_m + L_m p_1}{p_1(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - 1)$$

и

$$\frac{k\Phi_0 n}{LL_m} \frac{R_m + L_m p_2}{p_2(p_1 - p_2)} (1 - e^{p_2 t}).$$

Числовые подсчеты выявили, что показатель p_2 весьма велик по сравнению с p_1 и всегда является отрицательным (например, на вагоне метро p_2 порядка тысячи, а p_1 — порядка единицы).

Абсолютная величина p_2 весьма близка к $\frac{R}{L}$, а вся соответственная слагающая в основном определяет быстро возрастающий ток, обусловленный главным образом э. д. с. от остаточного магнитного потока машины. Первое слагаемое, напротив, характеризует ток, относительно медленно нарастающий вследствие самовозбуждения машины.

Как показывают числовые подсчеты,

$$p_1 \approx \frac{k\omega n - RR_m}{L_m R}. \quad (27)$$

Из уравнения (27) видно, что увеличение показателя p_1 , в основном и определяющего скорость самовозбуждения при заданном сопротивлении тормозной цепи R , может быть достигнуто либо за счет повышения числа витков ω обмотки возбуждения машины, либо путем уменьшения магнитной индуктивности L_m [уравнение (15)], либо за счет того и другого.

В частности, необходимо отметить, что в двигателях, строящихся для реостатного торможения, с целью уменьшения вихревых токов весьма целесообразно собирать главные полюсы из изолированных стальных пластин. Как показали проделанные нами подсчеты, этим путем постоянная L_m может быть снижена на 35...45%.

В первой наиболее ответственной фазе самовозбуждения скорость нарастания тока прямо пропорциональна остаточному магнитному потоку Φ_0 , как это видно из уравнения (16). Практически увеличение потока Φ_0 может быть достигнуто

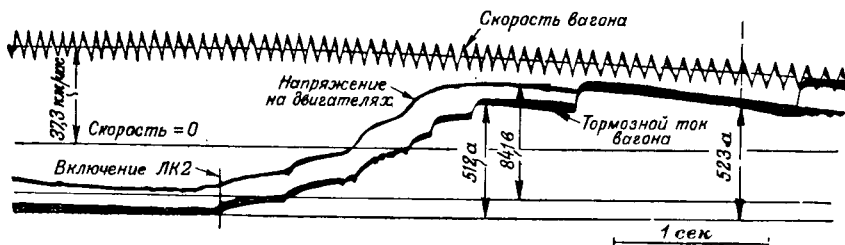


Рис. 6. Ток самовозбуждения двигателя типа ДК-102 при скорости вагона 37,3 км/час.

за счет подпитки машины небольшим током от батареи или от сети.

Упомянутые мероприятия позволяют резко увеличить скорость процесса самовозбуждения.

Уравнение (17) показывает, что и магнитный поток состоит из двух слагающих с теми же постоянными времени, что и слагающие тока. Однако быстро нарастающая слагающая потока весьма мала, так как она по абсолютной величине меньше соответствующей слагающей тока в $\frac{R_m + L_m p_2}{\omega}$ раз, тогда как первая слагающая потока по абсолютной величине меньше соответствующей слагающей тока в $\frac{R_m + L_m p_1}{\omega}$ раз. Осциллограмма рис. 6, где напряжение на двигателях практически пропорционально их потоку, наглядно иллюстрирует это, показывая, что, несмотря на быстрое возрастание тока при выключении ступеней сопротивления, магнитный поток изменяется весьма плавно.

Как видно из уравнений (19)...(23), с качественной стороны описанная выше структура тока и потока сохраняется при изменении параметров цепи, а также и на нелинейной части магнитной характеристики.

Приложение I. Рассматриваем приближенно поверхности перехода магнитных силовых линий из остова в главные полюсы, а также из полюсных наконечников в якорь машины как поверхности равного магнитного потенциала. Пусть $\Phi(t)$ — переменный магнитный поток, замыкающийся по магнитной цепи машины. Тогда полная н. с. главного полюса

$$F(t) = F_j(t) + F_p(t) + F_l(t) + F_a(t)$$

и

$$F(p) = F_j(p) + F_p(p) + F_l(p) + F_a(p) = \\ = \Phi(p) [cR_{mj}(p) + \sigma R_{mp}(p) + R_{ma}(p)],$$

отсюда и следует (5).

Приложение II. Магнитное сопротивление остова (рис. 3) можно рассматривать как сопротивление прямоугольной плиты с размерами a_j ; h_j ; l_j , где магнитные силовые линии параллельны ребру l_j .

Размер l_j равен половине длины средней силовой линии остова; h_j — средняя толщина активной части остова; a_j — аксиальный размер активной магнитопроводящей части остова.

Уравнения электромагнитного поля в остова:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E},$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (\text{II}, 1)$$

$$\text{Отсюда} \quad \text{rot rot } \mathbf{H} = -\gamma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\gamma^2 \mathbf{H}. \quad (\text{II}, 2)$$

$H_z = H_y = 0$; $H_x = H$ и уравнение (II,2) дает:

$$\frac{\partial^2 B}{\partial z^2} - \gamma \mu \frac{\partial B}{\partial t} = 0. \quad (\text{II}, 3)$$

Для определения переходной магнитной проводимости рассмотрим аналогично с [Л. 1] процесс исчезновения магнитного поля в остова после отключения постоянной н. с. обуславливающей в остова равномерное магнитное поле с индукцией B_0 .

Пользуясь гармоническим анализом, ищем интеграл уравнения (II,3) в форме:

$$B = \sum P \cos cze e^{-\frac{c^2 t}{\gamma \mu}}. \quad (\text{II}, 4)$$

При $t=0$ имеют место следующие граничные условия при $z = \pm \frac{h_j}{2}$,

$$B = 0; \quad (\text{II}, 5)$$

$$\text{при } -\frac{h_j}{2} < z < +\frac{h_j}{2},$$

$$B = B_0.$$

$$\text{Отсюда } c = \frac{(2k+1)\pi}{h_j} \quad (k=0, 1, 2, 3 \dots).$$

Для определения коэффициентов p в уравнении (II,4) разложим в ряд функцию по рис. 7:

$$B = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{4B_0}{(2k+1)\pi} (-1)^k \cos \frac{(2k+1)\pi}{h_j} z. \quad (\text{II}, 6)$$

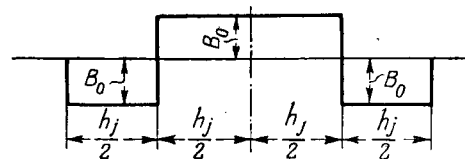


Рис. 7.

Поэтому интеграл уравнения (II,3), удовлетворяющий заданным граничным условиям, выразится следующим образом:

$$B = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{4B_0}{(2k+1)\pi} (-1)^k \cos \frac{(2k+1)\pi z}{h_j} e^{-\frac{(2k+1)^2 \pi^2}{\gamma \mu h_j^2} t}. \quad (\text{II}, 7)$$

Магнитный поток в момент t через 1 см длины определяется из уравнения

$$\Phi = \int_{-\frac{h_j}{2}}^{+\frac{h_j}{2}} B dz = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{8B_0 h_j}{(2k+1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2k+1)^2 \pi^2}{h_j^2 \gamma \mu} t} = \\ = \Phi_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{8}{(2k+1)^2 \pi^2} e^{-\frac{(2k+1)^2 \pi^2}{h_j^2 \gamma \mu} t} \quad (\text{II}, 8)$$

Так как при $t=0$, то $\Phi = \Phi_0$,

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{8}{(2k+1)^2 \pi^2} = 1.$$

то

При включении остова под постоянную н. с. F_0 нарастание магнитного потока произойдет по уравнению

$$\Phi = \Phi_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{8}{(2k+1)^2 \pi^2} \left(1 - e^{-\frac{(2k+1)^2 \pi^2}{h_j^2 \gamma_{1k}} t}\right) = \frac{F_0 \mu \tau_j h_j}{l_j} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{8}{(2k+1)^2 \pi^2} \left(1 - e^{-\frac{(2k+1)^2 \pi^2}{h_j^2 \gamma_{1k}} t}\right). \quad (\text{II}, 9)$$

Следовательно, переходная магнитная проводимость рассматриваемого отрезка остова составит:

$$\frac{1}{R_{mj}(t)} = \frac{\mu \tau_j h_j}{l_j} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{8}{(2k+1)^2 \pi^2} \left(1 - e^{-\frac{(2k+1)^2 \pi^2}{h_j^2 \gamma_{1k}} t}\right), \quad (\text{II}, 10)$$

откуда и приходим к уравнению (9).

Приложение III. Поток машины $\Phi(t)$ и ток $I(t)$ после изменения параметров цепи определяются уравнениями:

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_{10} + \Phi_1(t); \quad I(t) = I_0 + I_1(t).$$

В соответствии с (14)

$$w[I_0 + I_1(t)] = R_m[\Phi_{10} + \Phi_1(t)] + L_m \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (\text{III}, 1)$$

Затем уравнение равновесия напряжений дает:

$$k[\Phi_0 + \Phi_{10} + \Phi_1(t)]n = [I_0 + I_1(t)]R_1 + L \frac{dI_1}{dt} + 2q\omega\sigma_1 \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (\text{III}, 2)$$

Решая совместно (III,1) и (III,2) с учетом начальных условий, получим (19) и (20).

Приложение IV. Поток машины $\Phi(t)$ и ток $I(t)$ на участке характеристики ab определяются уравнениями:

$$\Phi(t) = \Phi_0 + \Phi_{10} + \Phi_1(t); \quad I(t) = I_0 + I_1(t).$$

Как и выше,

$$w[I_0 + I_1(t)] = F_0 + \Phi_{m1} R_{m1}(t) + L_{m1} \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (\text{IV}, 1)$$

$$k[\Phi_0 + \Phi_{10} + \Phi_1(t)]n = [I_0 + I_1(t)]R + L \frac{dI_1}{dt} + 2q\omega\sigma \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (\text{IV}, 2)$$

Решая совместно (IV,1) и (IV,2) с учетом начальных условий, получаем (22) и (23).

Литература

1. Т. Г. Сорокер. О переходных процессах в цепях с массивными сердечниками. Электричество, № 5, 1941.
2. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах, т. II, НКТП, ОНТИ, 1936.
3. А. Б. Иоффе. О неустановившихся режимах тяговых электродвигателей. Вестник электропромышленности, № 9, 1943.

[2. 2. 1952]



К теории симметричной многофазной системы

Доктор техн. наук, проф. Э. В. ЗЕЛЯХ
Ленинград

Введение. Симметричную многофазную систему можно привести к эквивалентной однофазной системе. Такой прием упрощает расчеты и делает их более наглядными. Однако теория данного приема содержит еще ряд неясных мест [см. дискуссию Л. 1, 2]. Поэтому должна представлять интерес излагаемая работа, имеющая целью дать строгое теоретическое обоснование перехода от симметричной многофазной системы к однофазному эквиваленту. Для ясности в основу положена практически наиболее ценная трехфазная система. Общая теория многофазных систем вынесена в приложения.

Основные уравнения и схема замещения симметричного трехфазного многополюсника. Пусть дана симметричная трехфазная система, состоящая из генератора, включенного по схеме звезды с нулевым проводом, каскадно соединенных промежуточных $2(3+1)$ -полюсников [Л. 3, стр. 174] и приемника, также включенного по схеме звезды с нулевым проводом.

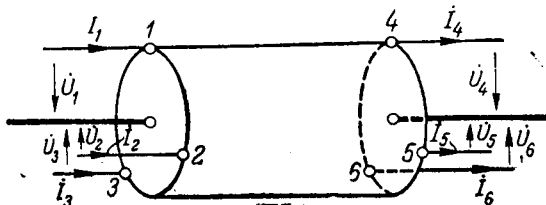


Рис. 1. Трехфазный многополюсник, симметричный относительно центральной оси.

На базе теории многополюсника дается строгое теоретическое обоснование перехода от симметричной многофазной системы к однофазному эквиваленту и рассматриваются некоторые свойства этого эквивалента.

Выделим из этой схемы какой-либо из промежуточных $2(3+1)$ -полюсников. Этот многополюсник симметричен относительно центральной оси (рис. 1) и характеризуется (приложение I) следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= y_{11}\dot{U}_1 + y_{12}\dot{U}_2 + y_{13}\dot{U}_3 + y_{14}\dot{U}_4 + y_{15}\dot{U}_5 + y_{16}\dot{U}_6, \\ i_2 &= y_{12}\dot{U}_1 + y_{11}\dot{U}_2 + y_{12}\dot{U}_3 + y_{16}\dot{U}_4 + y_{14}\dot{U}_5 + y_{15}\dot{U}_6, \\ i_3 &= y_{12}\dot{U}_1 + y_{12}\dot{U}_2 + y_{11}\dot{U}_3 + y_{15}\dot{U}_4 + y_{16}\dot{U}_5 + y_{14}\dot{U}_6, \\ i_4 &= -y_{14}\dot{U}_1 - y_{16}\dot{U}_2 - y_{15}\dot{U}_3 + y_{44}\dot{U}_4 + y_{45}\dot{U}_5 + y_{45}\dot{U}_6, \\ i_5 &= -y_{15}\dot{U}_1 - y_{14}\dot{U}_2 - y_{16}\dot{U}_3 + y_{45}\dot{U}_4 + y_{44}\dot{U}_5 + y_{45}\dot{U}_6, \\ i_6 &= -y_{16}\dot{U}_1 - y_{15}\dot{U}_2 - y_{14}\dot{U}_3 + y_{45}\dot{U}_4 + y_{45}\dot{U}_5 + y_{44}\dot{U}_6. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Проводимости Y_{ki} ветвей схемы замещения (рис. 2) найдем, сравнив узловые уравнения схемы с уравнениями (1).

$$Y_{12} = Y_{13} = Y_{23} = -y_{12}, \quad (2)$$

$$Y_{45} = Y_{46} = Y_{56} = -y_{45}, \quad (3)$$

$$Y_{14} = Y_{25} = Y_{36} = -y_{14}, \quad (4)$$

$$Y_{15} = Y_{26} = Y_{34} = -y_{15}, \quad (5)$$

$$Y_{16} = Y_{24} = Y_{35} = -y_{16}, \quad (6)$$

$$Y_{10} = Y_{20} = Y_{30} = y_{14} + y_{15} + y_{16} + y_{11} + 2y_{12}, \quad (7)$$

$$Y_{40} = Y_{50} = Y_{60} = y_{14} + y_{15} + y_{16} - (y_{44} + 2y_{45}). \quad (8)$$

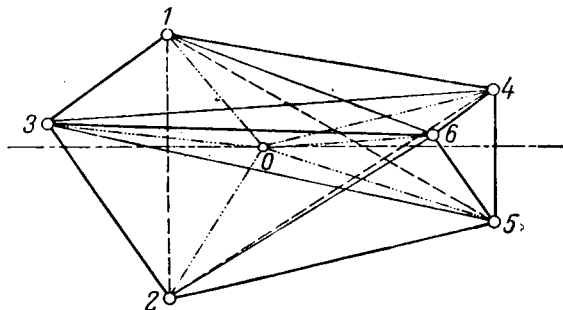


Рис. 2. Схема замещения пассивного симметричного трехфазного многополюсника.

Переход к однофазному эквиваленту. Электродвижущие силы генератора связаны равенствами:

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_1 a, \quad \dot{E}_3 = \dot{E}_1 a^2, \quad (9)$$

где a — единица для нулевой последовательности; $e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ — для прямой последовательности и $e^{+j\frac{2\pi}{3}}$ — для обратной последовательности.

Можно показать (приложение II), что аналогичные равенства имеют место и для напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_1 a, & \dot{U}_3 &= \dot{U}_1 a^2, \\ \dot{U}_5 &= \dot{U}_4 a, & \dot{U}_6 &= \dot{U}_4 a^2. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Подставив (10) в (I), получим уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_k &= y_{11}^* \dot{U}_k + y_{12}^* \dot{U}_{3+k}, \\ \dot{I}_{3+k} &= y_{21}^* \dot{U}_k + y_{22}^* \dot{U}_{3+k}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где коэффициенты имеют для всех фаз ($k=1, 2, 3$) одни и те же значения:

$$\left. \begin{aligned} y_{11}^* &= y_{11} + y_{12}(a + a^2), \\ y_{12}^* &= y_{14} + y_{15}a + y_{16}a^2, \\ y_{21}^* &= -(y_{14} + y_{16}a + y_{15}a^2), \\ y_{22}^* &= y_{44} + y_{45}(a + a^2). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Уравнения (12) можно трактовать как уравнения некоторого четырехполюсника, который и является искомым однофазным эквивалентом.

Для каскадного соединения нескольких промежуточных $2(3+1)$ -полюсников однофазный эквивалент принимает соответственно форму каскадного соединения четырехполюсников. В этом случае целесообразно для каждого из четырех-

полюсников, входящих в соединение, вместо уравнений (11) пользоваться уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_k &= a_{11}^* \dot{U}_{3+k} + a_{12}^* \dot{I}_{3+k}, \\ \dot{I}_k &= a_{21}^* \dot{U}_{3+k} + a_{22}^* \dot{I}_{3+k}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_{11}^* &= -\frac{y_{22}^*}{y_{21}^*}, & a_{12}^* &= \frac{1}{y_{21}^*}, \\ a_{21}^* &= \frac{y_{12}^* y_{21}^* - y_{11}^* y_{22}^*}{y_{21}^*}, & a_{22}^* &= \frac{y_{11}^*}{y_{21}^*}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Тогда матрица $[a]$ каскадного соединения четырехполюсников определится просто как произведение матриц $[a]$, соединяемых четырехполюсников.

Некоторые свойства эквивалента. Образует из коэффициентов уравнений (13) определитель

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11}^* & a_{12}^* \\ a_{21}^* & a_{22}^* \end{vmatrix} = a_{11}^* a_{22}^* - a_{12}^* a_{21}^* = -\frac{y_{12}^*}{y_{21}^*}. \quad (15)$$

Обычно у пассивных четырехполюсников такой определитель равен единице. Это означает, что пассивный четырехполюсник подчиняется принципу взаимности.

Здесь же, как следует из очевидной формулы

$$\Delta = \frac{y_{14} + y_{15}a + y_{16}a^2}{y_{14} + y_{16}a + y_{15}a^2}, \quad (16)$$

определитель в общем случае не равен единице. Следовательно, однофазный эквивалент трехфазной системы в общем случае не подчиняется принципу взаимности.

Этот парадоксальный вывод становится легко объяснимым, если изобразить рассматриваемый четырехполюсник, как показано на рис. 3. Мы видим, что этот четырехполюсник содержит так называемые зависимые источники и, следовательно, является активным четырехполюсником, который может подчиняться или не подчиняться принципу зависимости [Л. 3, стр. 228].

Например, указанный определитель равен единице (и, следовательно, справедлив принцип взаимности) для однофазного эквивалента нулевой последовательности, в чем легко убедиться, подставив в (16) $a=1$.

Что касается однофазного эквивалента прямой или обратной последовательности, то он подчиняется принципу взаимности тогда и только

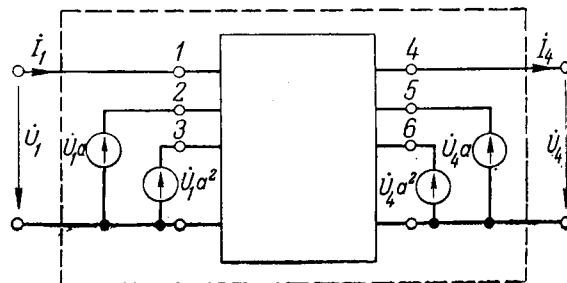


Рис. 3. Однофазный эквивалент симметричной трехфазной системы.

тогда, если выполняется, как это видно из (16), следующее условие:

$$y_{15} = y_{16}. \quad (17)$$

Смысл этого условия можно пояснить с помощью схемы замещения (рис. 2). Действительно, сопоставляя (17) с (5) и (6), приходим к наглядному выводу, что условие (17) обозначает взаимное равенство всех проводимостей, образующих диагонали боковых граней схемы замещения.

Возможны и такие случаи, когда единице равен лишь модуль определителя однофазного эквивалента, а аргумент определителя отличается от нуля,

Пусть, например, рассматриваемый $2(3+1)$ -полюсник состоит из проводимостей

$$Y_m = |Y_m| e^{j\psi},$$

имеющих все один и тот же угол ψ . Тогда, очевидно, и все параметры y_{ki} будут иметь одинаковый угол, равный ψ :

$$y_{ki} = |y_{ki}| e^{j\psi}. \quad (18)$$

Подставив (18) в (16), после несложных выкладок получим:

$$\Delta = 1e^{2\theta}, \quad \theta = \arctg \left(\pm \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{|y_{15}| - |y_{16}|}{|y_{14}| - \frac{1}{2}(|y_{15}| + |y_{16}|)} \right), \quad (19)$$

где верхний знак относится к прямой последовательности, а нижний — к обратной.

Таким образом, если промежуточный многополюсник, входящий в трехфазную систему, состоит из комплексных проводимостей (или сопротивлений), имеющих все один и тот же угол, модуль определителя однофазного эквивалента равен единице. Частным случаем подобного многополюсника является реактивный многополюсник (состоящий только из индуктивностей и емкостей, причем индуктивная связь допускается). Другим частным случаем является многополюсник, составленный из чисто активных сопротивлений.

Трехфазная система без нулевого провода. Перейдем теперь к симметричной трехфазной системе без нулевого провода.

Промежуточный многополюсник в этом случае представляет собой 3×2 -полюсную схему. Нетрудно видеть, что уравнения (1) остаются справедливыми и для такой схемы, если под \dot{U}_1, \dot{U}_2 и т. д. понимать напряжения зажимов схемы не относительно нулевого провода (которого в данном случае нет), а относительно произвольной точки, взятой вне схемы. Добавляется лишь условие равенства нулю суммы параметров в каждой строке уравнений (1), сводящееся к двум равенствам:

$$\begin{cases} y_{11} + 2y_{12} + y_{14} + y_{15} + y_{16} = 0, \\ -y_{44} - 2y_{45} + y_{14} + y_{15} + y_{16} = 0. \end{cases} \quad (20)$$

С указанными оговорками сохраняют силу и все остальные формулы и выводы, приведенные для системы с нулевым проводом.

Изложенным методом можно найти параметры и определитель однофазного эквивалента многофазной системы (с нулевым проводом и без него). Соответствующие формулы даны в приложении III.

Пример. Дадим более точное решение задачи, которая была решена в работе Х. Ф. Фазылова [Л. 1] приближенно.

Допустим, что в схеме трехфазного поперечного добавочного трансформатора (рис. 4) известны комплексные сопротивления обмоток Z_1 и Z_2 и сопротивление взаимной индукции Z_M , которые примем одинаковыми для всех трех фаз. Найдем параметры a_{ki}^* и определитель Δ эквивалентного четырехполюсника для прямой последовательности.

Заменим предварительно каждую пару индуктивно связанных обмоток эквивалентной схемой в виде полного четырехугольника (рис. 5), где проводимости Y_1, Y_2 и Y_M выражаются известными [Л. 3, стр. 98] формулами:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= \frac{Z_2}{Z_1 Z_2 - Z_M^2}, \\ Y_2 &= \frac{Z_1}{Z_1 Z_2 - Z_M^2}, \\ Y_M &= \frac{Z_M}{Z_1 Z_2 - Z_M^2}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Сложив в данной схеме проводимости, соединенные параллельно, получим схему (рис. 6), совпадающую по виду со схемой рис. 2.

Сопоставив рис. 2 и 6 с помощью равенств (2) — (8) и (20), найдем:

$$\left. \begin{aligned} y_{12} &= -Y_1, \quad y_{45} = 0, \quad y_{14} = -Y_2, \quad y_{15} = -Y_M, \\ y_{16} &= Y_M, \\ y_{11} &= -(2y_{12} + y_{14} + y_{15} + y_{16}) = 2Y_1 + Y_2, \\ y_{44} &= -2y_{45} + y_{14} + y_{15} + y_{16} = -Y_2. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

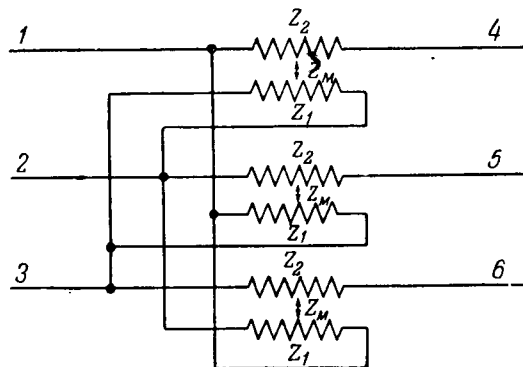


Рис. 4. Схема поперечного добавочного трансформатора.

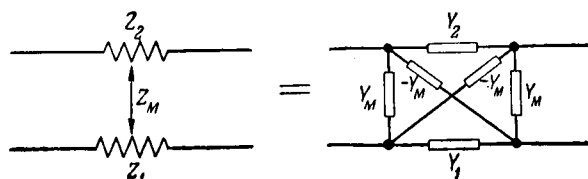


Рис. 5. Эквивалентные схемы.

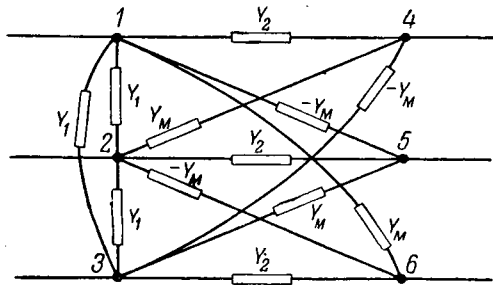


Рис. 6. Схема замещения поперечного добавочного трансформатора.

Далее по формулам (12) определим параметры y_{ki}^* эквивалентного четырехполюсника:

$$\left. \begin{aligned} y_{11}^* &= 3Y_1 + Y_2, & y_{12}^* &= -Y_2 + jY_M \sqrt{3}, \\ y_{21}^* &= Y_2 + jY_M \sqrt{3}, & y_{22}^* &= -Y_2. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Теперь по формулам (14) и (16) с учетом (21) легко найдем искомые параметры:

$$\left. \begin{aligned} a_{11}^* &= \frac{Z_1}{Z_1 + jZ_M \sqrt{3}}, & a_{12}^* &= \frac{Z_1 Z_2 - Z_M^2}{Z_1 + jZ_M \sqrt{3}} \\ a_{21}^* &= \frac{3}{Z_1 + jZ_M \sqrt{3}}, & a_{22}^* &= \frac{Z_1 + 3Z_2}{Z_1 + jZ_M \sqrt{3}} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

и определитель

$$\Delta = \frac{Z_1 - jZ_M \sqrt{3}}{Z_1 + jZ_M \sqrt{3}}. \quad (25)$$

Из формул (24) и (25) формулы (12) Х. Ф. Фазылова вытекают как частный случай.

$$[y] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1, n-1} & y_{1n} \\ y_{1n} & y_{11} & \dots & y_{1, n-2} & y_{1, n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{12} & y_{13} & \dots & y_{1n} & y_{11} \\ \hline y_{n+1,1} & y_{n+1,2} & \dots & y_{n+1, n-1} & y_{n+1, n} \\ y_{n+1, n} & y_{n+1, 1} & \dots & y_{n+1, n-2} & y_{n+1, n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n+1, 2} & y_{n+1, 3} & \dots & y_{n+1, n} & y_{n+1, 1} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Если многополюсник пассивный и, следовательно, подчиняется принципу взаимности, между элементами матрицы имеют место дополнительные зависимости:

1) В левой половине 1-й строки элементы попарно равны, а именно:

$$y_{1k} = y_{1, n+2-k} \quad \left(k = 2, 3, \dots, \frac{n'}{2} \right), \quad (1.4)$$

где для четных значений n

$$n' = n,$$

а для нечетных значений n

$$n' = n + 1.$$

2) Таким же образом связаны и элементы правой половины $n+1$ -й строки:

$$y_{n+1, n+k} = y_{n+1, 2n+2-k} \quad \left(k = 2, 3, \dots, \frac{n'}{2} \right). \quad (1.5)$$

Приложение 1. Основные уравнения 2 ($n+1$)-полюсника, симметричного относительно центральной оси
В общем случае уравнения 2 ($n+1$)-полюсника имеют вид [Л. 3]:

$$I_k = \sum_{i=1}^{i=n} y_{ki} \dot{U}_i \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (1.1)$$

где I_k — ток в k -том полюсе, \dot{U}_i — напряжение i -того полюса относительно соответствующего базиса, а y_{ki} — независимые параметры.

В случае, когда 2 ($n+1$)-полюсник симметричен относительно центральной оси, между параметрами y_{ki} появляются определенные зависимости. Для нахождения этих зависимостей применим следующий прием. Повернем многополюсник по часовой стрелке вокруг центральной оси на угол

$$\varphi = \frac{2\pi}{n}.$$

В силу симметрии многополюсника уравнения (1.1) останутся справедливыми и для новой схемы; следует лишь заменить в них индексы при I и \dot{U} , а именно: 1 на 2, 2 на 3, ..., n на 1, $n+1$ на $n+2$, $n+2$ на $n+3$, наконец, $2n$ на $n+1$.

Произведя такую замену в 1-м и $n+1$ -м уравнениях и расположив слагаемые в порядке возрастания индексов, получим:

$$\left. \begin{aligned} I_2 &= y_{1n} \dot{U}_1 + y_{11} \dot{U}_2 + \dots + y_{1, n-1} \dot{U}_n + \\ &+ y_{1, 2n} \dot{U}_{n+1} + y_{1, n+1} \dot{U}_{n+2} + \dots + y_{1, 2n-1} \dot{U}_{2n}, \\ I_{n+2} &= y_{n+1, n} \dot{U}_1 + y_{n+1, 1} \dot{U}_2 + \dots + \\ &+ y_{n+1, n-1} \dot{U}_n + y_{n+1, 2n} \dot{U}_{n+1} + \\ &+ y_{n+1, n+1} \dot{U}_{n+2} + \dots + y_{n+1, 2n-1} \dot{U}_{2n}. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Произведя указанный поворот последовательно $n-1$ раз, нетрудно убедиться, что коэффициенты уравнений (1.1) образуют матрицу следующего вида:

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1, n-1} & y_{1n} \\ y_{1n} & y_{11} & \dots & y_{1, n-2} & y_{1, n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{12} & y_{13} & \dots & y_{1n} & y_{11} \\ \hline y_{n+1,1} & y_{n+1,2} & \dots & y_{n+1, n-1} & y_{n+1, n} \\ y_{n+1, n} & y_{n+1, 1} & \dots & y_{n+1, n-2} & y_{n+1, n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n+1, 2} & y_{n+1, 3} & \dots & y_{n+1, n} & y_{n+1, 1} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

3) Каждый элемент левой половины $n+1$ -й строки равен по величине и противоположен по знаку расположенному симметрично с ним относительно главной диагонали матрицы элементу верхней половины $n+1$ -го столбца:

$$y_{n+1, 1} y_{n+1, 2} \dots y_{n+1, n} = -[y_{1, n+1} y_{1, 2n} \dots y_{1, n+2}]. \quad (1.6)$$

На основании сказанного и составлены уравнения (1), приведенные в тексте.

Приложение II. Зависимости между напряжениями симметричной многофазной системы. На основе принципа наложения напряжения многофазной системы можно выразить через э. д. с. генератора следующим образом:

$$\dot{U}_k = \sum_{i=1}^n s_{ki} \dot{E}_i \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (II.1)$$

где s_{ki} — некоторые коэффициенты.

Элементарная методика расчета линейных электрических цепей

Кандидат техн. наук О. М. БОГАТЫРЕВ

Московский энергетический институт им. Молотова

В литературе как учебной, так и журнальной, для расчета сложных схем электрических цепей рекомендуются самые разнообразные методы. Таковы, например: 1) трансфигурация сложных схем с целью уменьшения числа неизвестных, а затем использование метода контурных токов или метода узловых потенциалов; 2) составление всевозможных схем замещения, особенно для цепей со взаимной индукцией; 3) преобразование активной трехлучевой звезды в активный треугольник и обратно; 4) преобразование четырехлучевой звезды в четырехугольник и обратно; 5) методы разреза схем на части и решения каждой части схемы отдельно, а затем решение уравнений взаимосвязи. Сюда же относятся некоторые „теории“ пассивных и активных четырехполюсников, применяемые к последовательному и параллельному соединению четырехполюсников и четырехконечников. Придумана даже такая хитроумная вещь, как трансформатор Штейна, который дает возможность сложную схему привести к более простой. В общем, все усилия направлены к тому, чтобы упростить сложную схему, уменьшить число уравнений и, следовательно, число неизвестных.

Целью настоящей статьи является показать, что нет никакой необходимости упрощать схему, а следует смело писать все уравнения либо пользуясь методом узловых потенциалов, когда число узлов без одного меньше или равно числу независимых контуров, либо методом контурных токов в противном случае. При наличии цепей со взаимной индукцией проще всего писать обычные уравнения Кирхгофа по первому и второму законам. Главное не следует бояться большого числа уравнений, даже если оно превысит десяток. Дело в том, что решать эту систему уравнений совсем не представляет большого труда, потому что все эти уравнения представляют собой, как правило, систему неполных уравнений. Узлы обычно не все соединены между собою, а контурные токи имеют среди своих соседей далеко не все другие контурные токи. Таким образом, придется решать совместно систему неполных уравнений со многими неизвестными. Легко показать, что решение такой системы всегда распадается на многократное решение уравнений либо одного уравнения с одним неизвестным, либо двух уравнений с двумя неизвестными. Лишь

Предлагается простая методика расчета линейных электрических цепей, основанная на цепочечном способе решения неполных, как правило, уравнений системы. Даны конкретные числовые примеры.

в последнем окончательном решении придется решать три уравнения с тремя неизвестными.

Наши рассуждения ведутся применительно к системам с числом уравнений порядка десяти. Как проводить такого рода решение будет показано на примерах. Его идея заключается в том, что, рассмотрев написанные уравнения, надо удачно выбрать три неизвестных (а может быть, достаточно будет и двух), затем последовательно выразить все остальные неизвестные через выбранные и, наконец, решить систему трех уравнений с тремя выбранными неизвестными.

Расчеты, сделанные автором, показали, что не стоит упрощать схему преобразованием звезды в треугольник или обратно, даже если они являются пассивными; о преобразовании же активных трехполюсников не может быть и речи. Не затрудняет расчеты также наличие э. д. с. хотя бы во всех ветвях. Эти э. д. с. будут давать только лишний свободный член в уравнениях.

Итак, трудность представляет только полнота уравнений, а таковой, как было указано, в реальных схемах не бывает. Даже можно, пожалуй, утверждать, что чем сложнее схема, тем менее полны будут уравнения.

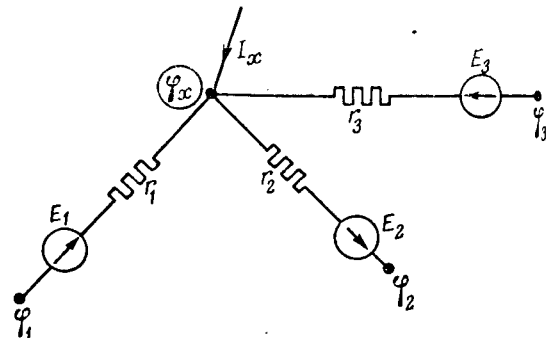


Рис. 1. Схема узла x.

Прежде чем перейти к конкретному изложению методики, напомним основное уравнение метода узловых потенциалов. Для простоты рассмотрим цепь постоянного тока. Пусть к узлу с потенциалом φ_x сходятся 4 ветви (рис. 1), где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ — потенциалы противоположных концов трех ветвей, а I_x — ток, притекающий из четвер-

той ветви¹. Выражая токи в ветвях, сходящихся в узле, через потенциалы концов и суммируя их по первому закону Кирхгофа, получим:

$$I_x + \frac{\varphi_1 + E_1 - \varphi_x}{r_1} + \frac{\varphi_2 - E_2 - \varphi_x}{r_2} + \frac{\varphi_3 + E_3 - \varphi_x}{r_3} = 0, \quad (1)$$

откуда

$$\varphi_x \left[\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right] = \frac{\varphi_1}{r_1} + \frac{\varphi_2}{r_2} + \frac{\varphi_3}{r_3} + \frac{E_1}{r_1} - \frac{E_2}{r_2} + \frac{E_3}{r_3} + I_x.$$

Заменяя $\frac{1}{r}$ через G и преобразуя, будем иметь:

$$\varphi_x \sum_{k=1}^3 G_k = \sum_{k=1}^3 \varphi_k G_k + \sum_{k=1}^3 E_k G_k + I_x. \quad (2)$$

Или, обобщая эту формулу на n ветвей, получим:

$$\varphi_x \sum_{k=1}^n G_k = \sum_{k=1}^n \varphi_k G_k + \sum_{k=1}^n E_k G_k + I_x. \quad (3)$$

В случае переменного синусоидального тока эта формула, записанная в комплексном виде, принимает вид:

$$\dot{\varphi}_x \sum_{k=1}^n Y_k = \sum_{k=1}^n \dot{\varphi}_k Y_k + \sum_{k=1}^n \dot{E}_k Y_k + I_x. \quad (4)$$

В случае расчета переходных процессов формула (3), записанная в операторном виде, примет следующий вид:

$$\Phi_x(p) \sum_{k=1}^n Y_k(p) = \sum_{k=1}^n \left\{ \Phi_k(p) + E_k(p) + [i(0)Lp - u_c(0)]_k \right\} Y_k(p) + I_x(p). \quad (5)$$

Обозначения и вывод формулы (5) — см. приложение II.

Предпоследний член в формуле (5) определяется начальными запасами энергии в схеме в момент, непосредственно предшествующий коммутации ($t = 0$).

Приложение I. Пример 1. Рассчитаем довольно сложную схему, представленную на рис. 2, содержащую 24 ветви 12 узлов или 11 независимых узловых потенциалов. Независимых контурных токов эта схема имеет, очевидно, 13 ($24 - 11 = 13$).

Учитывая, что число узловых потенциалов меньше числа контурных токов, решаем схему методом узловых потенциалов. Примем за нуль потенциал узла, в котором сходится больше всего ветвей, и обозначим его нулем.

Нумеруем узлы в любом порядке числами от 1 до 11 и составляем уравнения по типу уравнения (3) для всех 12 узлов. Для простоты расчета примем все э. д. с. постоян-

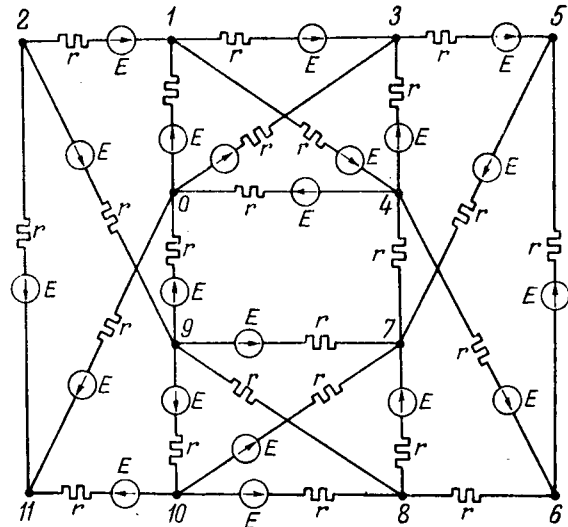


Рис. 2. Схема к примеру 1. Все э. д. с. $E = 10$ в, $r = 1$ ом.

ными и равными по 10 в, а все сопротивления по 1 ом. При этих данных уравнения будут таковы:

$$0 = \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_9 + \varphi_{11} - 10, \quad (0)$$

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4, \quad (1)$$

$$\varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_9 + \varphi_{11} - 30, \quad (2)$$

$$\varphi_4 = \varphi_1 + \varphi_4 + \varphi_5 + 20, \quad (3)$$

$$\varphi_5 = \varphi_1 + \varphi_3 + \varphi_6 + \varphi_7 - 20, \quad (4)$$

$$\varphi_6 = \varphi_3 + \varphi_6 + \varphi_7 + 10, \quad (5)$$

$$\varphi_6 = \varphi_4 + \varphi_5 + \varphi_8, \quad (6)$$

$$\varphi_7 = \varphi_4 + \varphi_5 + \varphi_8 + \varphi_9 + \varphi_{10} + 40, \quad (7)$$

$$\varphi_8 = \varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_9 + \varphi_{10}, \quad (8)$$

$$\varphi_9 = \varphi_2 + \varphi_7 + \varphi_8 + \varphi_{10} - 20, \quad (9)$$

$$\varphi_{10} = \varphi_7 + \varphi_8 + \varphi_9 + \varphi_{11} - 20, \quad (10)$$

$$\varphi_{11} = \varphi_2 + \varphi_{10} + 30. \quad (11)$$

Для удобства дальнейшего анализа представим эти уравнения в виде табл. 1.

Задаемся, например, тремя потенциалами $\varphi_7, \varphi_{10}, \varphi_{11}$, полагая их известными. Теперь, не приступая к решению уравнений, проследим весь процесс решения до конца:

1) из уравнения (11) находим φ_2 через заданные потенциалы;

2) подставляя φ_2 в (9) и (10), и решая их совместно, находим потенциалы φ_8 и φ_9 через заданные;

3) после подстановки φ_8 и φ_9 в уравнения (8) находим φ_6 ;

4) после подстановки φ_2 и φ_9 в (2) находим φ_1 ;

5) после подстановки найденных потенциалов, решая совместно уравнения (1) и (4), находим φ_3 и φ_4 ;

6) из уравнения (3) аналогично находим φ_5 ;

7) подставляя в (5), (6), (7) найденные выражения для всех неизвестных потенциалов, получим три уравнения с тремя неизвестными потенциалами φ_7, φ_{10} и φ_{11} , которые и находим;

8) после этого вычисляем все остальные потенциалы и проверяем их подстановкой в оставшееся контрольное уравнение, а именно уравнение (0). Если это уравнение хорошо удовлетворяется, то есть все основания полагать, что найденное решение правильно.

В данном случае система 11 уравнений с 11 неизвестными свелась к двукратному решению двух уравнений с двумя неизвестными, четырехкратному решению одного уравнения с одним неизвестным и одному решению трех уравнений с тремя неизвестными.

Вполне возможна здесь и другая цепочка последовательных решений, но более простой, повидимому, нет.

¹ Четвертой ветвью может быть любая ветвь с сопротивлением, равным нулю, содержащая э. д. с. или вообще ветвь с заданным током.

Таблица 2

№ уравнения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Порядок действий	Что определяется
1	1	2	3	4	5	6	7							8	6, 7 и 8
2	1	2	3				7	8	9						
3	1	2	3	4					9	10					
4	1		3	4	5					10	11			6	3 и 10
5	1			4	5	6					11	12		5	4 и 11
6	1				5	6	7					12	13	4	5 и 12
7	1	2				6	7	8					13	3	1
8		2					7	8						1	2
9		2	3						9					7	9
10			3	4						10				6	3 и 10
11				4	5						11			5	4 и 11
12					5	6						12		4	5 и 12
13						6	7						13	2	13

Пример 2. В качестве второго примера рассмотрим схему рис. 4. Схема имеет 36 ветвей, 23 узловых потенциала и 13 контурных токов. Применяя метод контурных токов, напишем 13 уравнений.

Для сокращения записи заменим контурные токи числами, соответствующими их номерам, и занесем эти уравнения в табл. 2. Просматривая таблицу, замечаем, что если

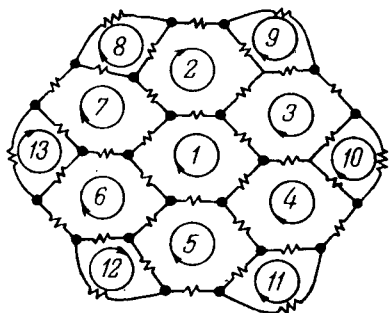


Рис. 4. Схема к примеру 2

задаваться токами 6, 7 и 8, то система уравнений может быть решена в порядке, указанном в таблице. Таким образом, для решения рассматриваемой системы 13 уравнений придется решить:

- 1) 4 раза одно уравнение с одним неизвестным,
- 2) 3 раза два уравнения с двумя неизвестными,
- 3) 1 раз три уравнения с тремя неизвестными.

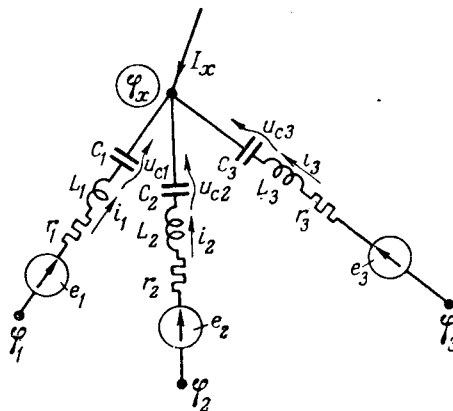
Такой метод решения неизмеримо легче, чем непосредственное решение при помощи определителей хотя бы и с большим количеством нулей. Надо отметить, что после того как найдена первая тройка неизвестных, в данном случае токи 6, 7 и 8, остальные токи находятся совсем легко, так как они уже имеются в явно выраженной форме через указанные неизвестные.

Примечание. При определении порядка решения следует составлять таблицу уравнений обязательно в виде табл. 1, а не в виде табл. 2, т. е. неизвестные должны фигурировать со своими числовыми коэффициентами. В противном случае при наметке пути решения может получиться недоразумение при каком-нибудь решении двух

уравнений с двумя неизвестными. Может оказаться, что упомянутые два неизвестных случайно имеют одинаковые коэффициенты, и тогда уравнения невозможно будет решить.

Если же все уравнения записаны в раскрытом виде, то такое затруднение всегда легко обойти, наметив другую цепочку последовательного решения системы уравнений.

Приложение II. Применение метода узловых потенциалов к расчету переходных процессов в цепях r, L, C .

Рис. 5. Схема узла x .

Рассматривая рис. 5 для какой-нибудь ветви, например 1, можем написать уравнение второго закона Кирхгофа:

$$i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt = \varphi_1 + e_1 - \varphi_x \quad (\text{II}, 1)$$

или, переходя к изображениям [$i \doteq I$; $\varphi \doteq \Phi$; $e \doteq E$],

$$I_1 r_1 + L_1 p [I_1 - i_1(0)] + \frac{1}{C_1 p} I_1 + u_{c1}(0) = \Phi_1 + E_1 - \Phi_x \quad (\text{II}, 2)$$

или

$$I_1 \left[r_1 + L_1 p + \frac{1}{C_1 p} \right] = \Phi_1 + E_1 + i_1(0) L_1 p - u_{c1}(0) - \Phi_x,$$

откуда

$$I_1 = \frac{\Phi_1 + E_1 - \Phi_x + i_1(0) L_1 p - u_{c1}(0)}{Z_1(p)}. \quad (\text{II},3)$$

Аналогично можем написать и для токов I_2 и I_3 .

Заменяя $\frac{1}{Z(p)}$ через $Y(p)$, суммируя токи в узле x по первому закону Кирхгофа и распространяя на n ветвей, получим:

$$\Phi_x \sum_{k=1}^n Y_k(p) = \sum_{k=1}^n \left\{ \Phi_k + E_k + [i(0) L p - u_c(0)]_k \right\} Y_k(p) + I_x(p). \quad (\text{II},4)$$

Здесь в сокращенной записи

$$[i(0) L p - u_c(0)]_k = i_k(0) L_k p - u_{ck}(0);$$

большие буквы Φ_x , Φ_k , E_k , I_x означают операторные изображения функций времени φ_x , φ_k , e_k , j_x ;

$$Y_k(p) = \left[\frac{1}{r + L p + \frac{1}{C p}} \right]_k.$$

В качестве примера рассмотрим схему рис. 6. Применяя к этой схеме уравнение (II,4), можем написать:

$$\begin{aligned} \text{Узел } \varphi_1: \quad \Phi_1 \left[\frac{1}{r_6} + p C_5 + \frac{1}{p L_1} \right] &= [\Phi_2 - L_1 i_1(0) p] \frac{1}{p L_1} + \\ &+ \frac{E(p)}{r_6} + u_{c5}(0) p C_5. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Узел } \varphi_2: \quad \Phi_2 \left[\frac{1}{p L_1} + \frac{1}{r_2 + p L_2} + \frac{1}{r_3 + \frac{1}{C_3 p}} \right] &= \\ = [\Phi_1 + i_1(0) L_1 p] \frac{1}{p L_1} - \frac{i_2(0) L_2 p}{r_2 + L_2 p} + \frac{u_{c3}(0)}{r_3 + \frac{1}{C_3 p}}. \end{aligned}$$

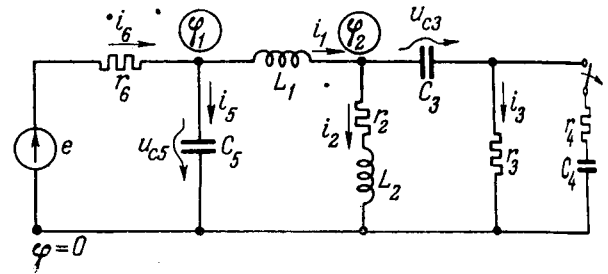


Рис. 6. Схема для примера расчета переходных токов $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$. Цепь $r_3 C_3$ отключается в момент $t=0$.

После приведения к общему знаменателю и простейших преобразований получим два уравнения с двумя неизвестными потенциалами Φ_1 и Φ_2 :

$$\Phi_1 \left[L_1 C_5 p^2 + \frac{L_1}{r_6} p + 1 \right] - \Phi_2 = \frac{E(p) L_1 p}{r_6} + u_{c5}(0) L_1 C_5 p^2 - i_1(0) L_1 p, \quad (\text{II},5)$$

$$\begin{aligned} \Phi_1 [(L_2 p + r_2)(r_3 C_3 p + 1)] - \Phi_2 [(r_3 C_3 p + 1)(L_2 p + r_2) + \\ + L_1 p (r_3 C_3 p + 1) + L_1 C_3 p^2 (L_2 p + r_2)] = \\ = i_1(0) L_1 p (r_3 C_3 p + 1) (L_2 p + r_2) + \\ + i_2(0) L_1 L_2 p^2 (r_3 C_3 p + 1) - u_{c3}(0) L_1 C_3 p^2 (L_2 p + r_2). \quad (\text{II},6) \end{aligned}$$

Решая эти два уравнения путем исключения Φ_2 , получим выражение для потенциала Φ_1 в следующем виде:

$$\Phi_1 = \frac{E(p) Q^3(p)}{H^4(p)} + \frac{G^4[p, u_{c3}(0), u_{c5}(0), i_1(0), i_2(0)]}{H^4(p)},$$

где $H^4(p)$ — полином 4-й степени от p ; $Q^3(p)$ — полином 3-й степени от p ; $G^4(p, \dots)$ — полином 4-й степени от p и от начальных значений индуктивных токов $i_L(0)$ и емкостных напряжений $u_c(0)$.

Вычисление этого выражения наиболее просто проводится по методике, изложенной в специальной статье автора «Рационализация методов расчета переходных процессов в линейных цепях» (Электричество, № 7, 1952).

[4, 2, 1952]



К осциллографическому методу измерения магнитных свойств ферромагнетика

Инж. Г. С. ВЕКСЛЕР

Киевский институт киноинженеров

Введение. Для непрерывного контроля магнитных свойств ферромагнитного материала или детали в процессе их производства наиболее пригоден осциллографический метод [Л. 1, 2]. Этот метод позволяет получать объективную документацию измеренных величин в виде фотографии, всемерно упрощает и автоматизирует процесс измерения, обеспечивая при этом приведенную погрешность порядка 5... 7% [Л. 3, 4].

Схема, обычно применяемая для визуализации стационарных магнитных процессов в ферромагнетиках на экране электронно-лучевой трубки, приведена на рис. 1. На экране трубки наблюдают динамическую кривую, характеризующую протекание магнитного процесса во времени.

Динамическая кривая представляется зависимостью индукции B от тока i_1 [Л. 5]. Таким образом, динамические кривые намагничивания учитывают все виды потерь, которые приводят к росту тока i_1 для создания той же индукции B , которая была получена в статическом режиме.

В отличие от статической петли гистерезиса $B(H)$ условимся динамическую петлю $B(i)$ называть „магнитной петлей“ („магнитную петлю“ также называют — „петлей кажущегося гистерезиса“).

Для получения магнитной петли на экране осциллографа необходимо, чтобы: 1) обмотка w_2 была плотно намотана на образец в целях уменьшения рассеяния; 2) постоянная времени интегрирующей цепи R_2, C_2 была, по крайней мере, в 60 раз больше величины $\frac{1}{2\pi f_n}$ для получения допустимой погрешности при интегрировании; при этом угол фазной ошибки, вносимой несовершенным интегрированием, не будет

Предложена методика определения задерживающей силы образца, у которого потери на вихревые токи одного порядка с потерями на гистерезис. Методика дает возможность разделить потери в образце.

превышать — 1° [Л. 3] (f_n — наиболее низкая частота, на которой проводят исследования); 3) от-

ношение $\frac{i_2 w_2}{i_1 w_1}$ было меньше 0,001 [Л. 1]; при

этом реакция вторичной цепи практически не скажется на петле, видимой на экране.

Для того чтобы горизонтальное отклонение луча, пропорциональное общему первичному току i_1 , дало бы значение H на магнитной петле, равное соответствующему значению H на гистерезисной петле, необходимо, чтобы, помимо выполнения указанных трех условий, потери на гистерезис в образце преобладали как над потерями на вихревые токи, так и над остальными потерями, что в большой степени зависит от материала и формы исследуемого образца.

Поэтому с целью измерения при помощи магнитной петли, магнитных параметров, близких к тем, которые получают при статическом процессе намагничивания, до настоящего времени осциллографическим методом исследовали лишь носители магнитной записи, представляющие собою магнитодиэлектрики, тонкие полоски стали, и специальные ферромагнетики большого электрического сопротивления, стараясь проводить измерение на возможно более низких частотах.

Ниже приводится методика осциллографического измерения задерживающей силы образца, когда потери в нем на вихревые токи сравнимы с потерями на гистерезис. Эта методика также позволяет разделить потери в образце.

Влияние вихревых токов на форму магнитной петли. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман [Л. 6] показали, что в случае преобладания в образце потерь на вихревые токи форма магнитной петли должна приближаться к эллипсу.

На рис. 2 приведены магнитные петли пермаллоя, снятые нами на частотах от 50 до 10 000 гц при неизменно синусоидальной форме кривой первичного тока i_1 и одинаковом его амплитудном значении I_{1m} . С ростом частоты вследствие увеличения активной составляющей тока падает максимальное значение индукции B_m , а вместе с нею и остаточная индукция B_r ; петля сплющивается по высоте. По магнитной петле, искаженной вследствие весьма значительных потерь на вихревые токи, очень трудно оп-

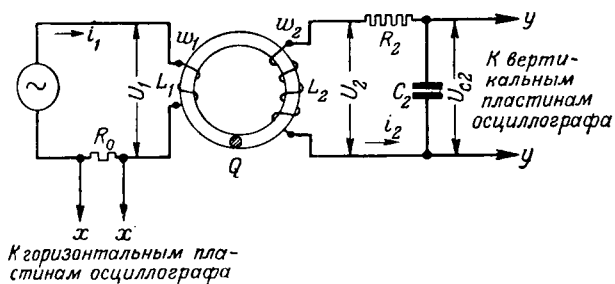


Рис. 1.

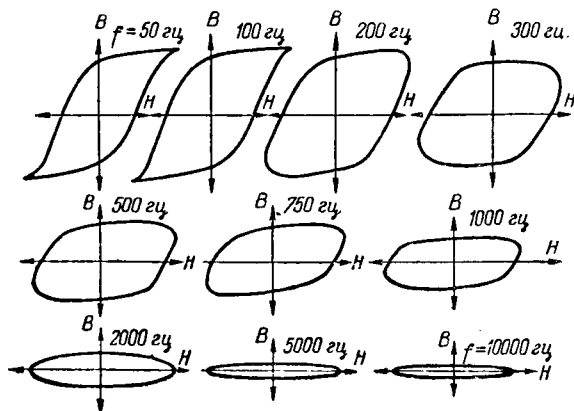


Рис. 2. Магнитные петли пермаллоя на экране осциллографа при различной частоте и синусоидальной форме тока.

ределить статические магнитные характеристики материала¹.

При более низких частотах, например, для испытанного сердечника измерительного трансформатора из пермаллоя (УТТ-5) как при 50 Гц, так и при 100 Гц форма магнитной петли неизменна, но заметно возрастает ее ширина и несколько увеличивается значение B при $H=0$.

О форме намагничивающего тока. Потери на вихревые токи за один цикл перемагничивания зависят также от квадрата коэффициента формы кривой э. д. с. k_u .

На рис. 3 показаны магнитные петли пермаллоя в режиме синусоидального тока (а) и синусоидального напряжения (б) при одном и том же максимальном значении I_{1m} .

При синусоидальном токе кривая э. д. с. — заостренная; коэффициент формы кривой э. д. с. $k_u > 1,11$, в результате чего магнитная петля становится шире (рис. 3, а — сплошная линия).

Из проведенного рассмотрения и проделанного автором эксперимента выясняется, что для образца, имеющего существенные потери на вихревые токи, можно получать на экране осциллографа одинаковые магнитные петли только при неизменной форме тока i_1 . Таким образом, при проведении исследований можно применять любую форму тока i_1 , при которой нужно определить потери, но сравнивать магнитные петли можно лишь при одинаковой форме кривой намагничивающего тока.

Для получения большего приближения магнитной петли к гистерезисной петле следует применять режим синусоидального напряжения ($k_u = 1,11$), а не синусоидального тока ($k_u > 1,11$ [Л. 2]).

Из изложенного ясно, почему при определении статических магнитных параметров материалов при помощи осциллографа принимают меры к уменьшению вихревых токов в образце. К сожалению, некоторые материалы, даже будучи в образцах доведены до малых толщин, все же

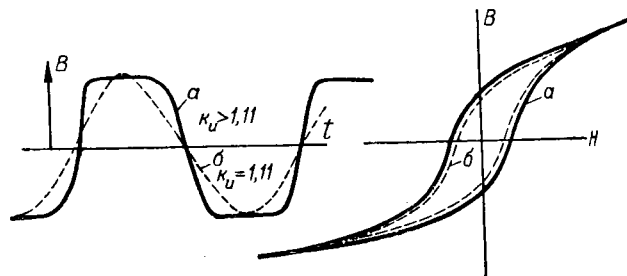


Рис. 3. Магнитная петля при синусоидальном токе (а) и синусоидальном напряжении (б).

имеют потери на вихревые токи, сравнимые с потерями на гистерезис.

В связи с этим представляет интерес разработанный автором статьи для случая низких частот методика определения статических параметров магнитных материалов, обладающих ощутимыми потерями на вихревые токи, с использованием в измерениях электронно-лучевой трубки.

Определение задерживающей силы и разделение потерь. При наличии в образце ощутимых потерь на вихревые токи, и когда измерения проводятся в области низких частот (до порядка 300 Гц), форма магнитных петель практически сохраняется, но только увеличивается площадь петель. Это обстоятельство было нами исследовано и положено в основу предлагаемой методики.

При пренебрежимо малых потерях на вихревые токи площади гистерезисной петли, полученной баллистическим способом, или магнитной петли, видимой на экране осциллографа, дают удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания:

$$\oint H dB = \frac{P_z}{fV}, \quad (1)$$

где P_z — потери на гистерезис в образце;
 f — частота;
 V — объем образца.

Магнитная петля материала с ощутимыми потерями на вихревые токи получается при подаче на горизонтальные отклоняющие пластины напряжения, пропорционального общему току i_1 . Поэтому площадь такой петли будет представлять общие удельные потери в образце за один цикл перемагничивания.

Если остальными потерями можно пренебречь, то

$$\oint H_z dB = \frac{P_z + P_v}{fV}, \quad (2)$$

где P_v — потери на вихревые токи в образце;
 H_z — в отличие от H — величина отклонения луча по горизонтали.

Анализ предельных магнитных петель трансформаторной стали, снятых при частотах 50, 100 и 200 Гц и синусоидальной форме кривой тока², показал, что все три магнитные петли

² Работая на разных частотах, легче обеспечить на всех частотах в качестве неизменного режим синусоидального тока. Это достигается включением в цепь первичной обмотки относительно большого активного сопротивления.

¹ Однако по площади петли попрежнему просто и легко найти суммарные потери.

имеют одну и ту же высоту, равную $2B_s$, и хотя их площади отличаются, но конфигурация всех петель одинакова.

Основываясь на равенстве высот отдельных петель, было высказано предположение о том, что

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{H_{x1}}{H_{x2}}, \quad (3)$$

где S_1 и S_2 — площади петель при частотах f_1 и f_2 ; H_{x1} и H_{x2} — значения H_x , соответствующие $B=0$ при частотах f_1 и f_2 .

Экспериментальная проверка, проведенная для электротехнической стали (рис. 4) и пермаллоя, в диапазоне частот от 50 до 300 гц, подтвердила, что пропорция (3) с достаточной точностью верна.

Исходя из этого, можно допустить, что для каждого сорта материала существует некоторый постоянный коэффициент K , который связывает между собою $\oint H_x dB$ и H_x в интервале частот:

$$\oint H_x dB = KH_x. \quad (4)$$

Для выяснения зависимости $\oint H_x dB$ от частоты, эта функция была исследована экспериментально для тех же образцов электротехнической стали и пермаллоя. Результаты исследования для электротехнической стали представлены на рис. 5.

Рис. 5 достаточно хорошо подтверждает известное соотношение:

$$\oint H_x dH = \frac{P_z + P_v}{Vf} = M + Nf, \quad (5)$$

где M — удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания;

Nf — удельные потери на вихревые токи за один цикл перемагничивания при частоте f .

Из выражений (4) и (5) получаем:

$$H_x = \frac{M}{K} + \frac{N}{K}f. \quad (6)$$

Для весьма низкой частоты, стремящейся к нулю, вторым членом правой части выражения, учитывающим влияние вихревых токов и вносящим ошибку в измерение H_c , можно пренебречь, и тогда

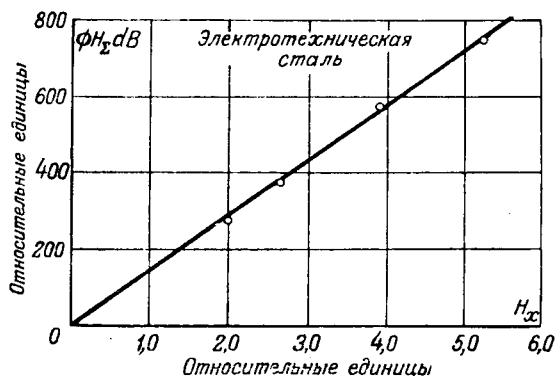


Рис. 4.

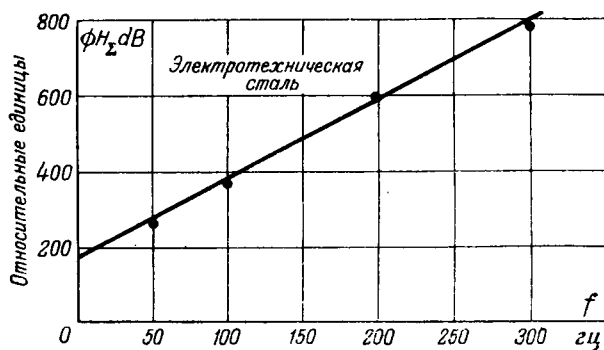


Рис. 5.

для задерживающей силы получим следующее выражение:

$$H_{x \text{ при } f=0} = H_c = \frac{M}{K}. \quad (7)$$

Из выражения (6) легко заключить, что зависимость H_x от f представляет собою прямую, отсекающую на оси H_x величину H_c — задерживающую силу. Следовательно, проведя измерение двух величин H_x при разных частотах, и экстраполируя, можно получить H_c графически, либо аналитически:

$$H_c = \frac{H_{x1}f_2 - H_{x2}f_1}{f_2 - f_1}, \quad (8)$$

где f_1 и f_2 — частоты, на которых сняты стационарные магнитные петли; H_{x1} и H_{x2} — величины H_x , соответствующие $B=0$, при частотах f_1 и f_2 .

На рис. 6 показано несложное приспособление, выполненное из целлулоида и закрепляемое на экране осциллографа, при помощи которого можно графически определить величину H_c . На рис. 6 произведена экстраполяция значения H_c на магнитных петлях, снятых при 50 и 100 гц. Для большей точности отсчета H_c петли увеличены, и поэтому отдельные их части вышли за пределы экрана.

Определив площадь петли³ $\oint H_x dB$, можно подсчитать общие потери в образце:

$$P_z + P_v = \frac{10^{-7}}{4\pi} fV \oint H_x dB \text{ [вт]}, \quad (9)$$

где H_x в эргах; B в гауссах; V в кубических сантиметрах.

Интересно отметить, что, делая указанную выше экстраполяцию, можно также определить из (6) не только $H_c = \frac{M}{K}$, но и величину

$$\frac{N}{K} = \frac{H_{x2} - H_{x1}}{f_2 - f_1}. \quad (10)$$

Зная значения $\frac{M}{K}$ и $\frac{N}{K}$, можно просто произвести разделение потерь.

³ При проведении ответственных измерений желательно фотографировать петлю, а затем увеличивать снимок, проектируя его на большой экран.

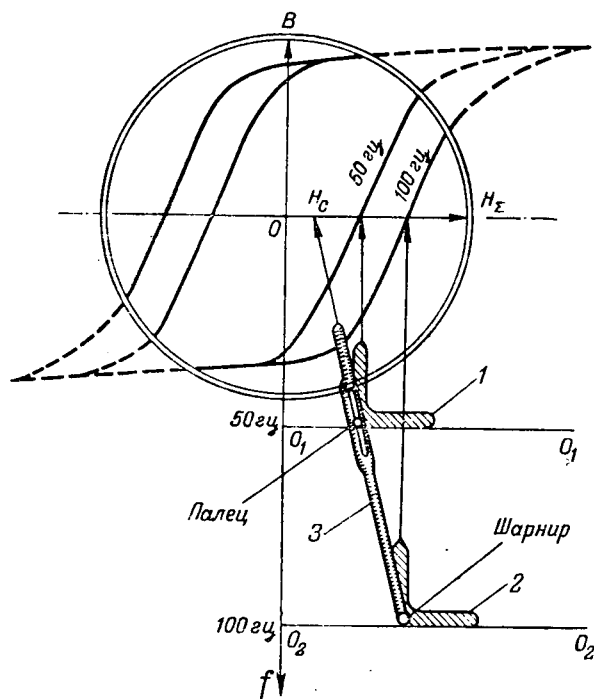


Рис. 6. Приспособление для определения задерживающей силы на экране осциллографа.

1—угольник с пальцем, движущийся в направляющих O_1O_1 ; 2—то же в направляющих O_2O_2 ; 3—линейка с прорезью и острием, указывающим значение H_c .

Удельные потери на гистерезис за один цикл перемagnetивания:

$$M = \frac{\oint H_z dB}{1 + f \frac{H_{x1}f_2 - H_{x2}f_1}{H_{x1}f_2 - H_{x2}f_1}} \quad (11)$$

Удельные потери на вихревые токи за один цикл перемagnetивания на частоте f :

$$Nf = \frac{\oint H_z dB}{1 + \frac{1}{f} \frac{H_{x1}f_2 - H_{x2}f_1}{H_{x1}f_2 - H_{x2}f_1}} \quad (12)$$

При измерении задерживающей силы следует убедиться в том, что достигнут предельный цикл намагничивания. При измерении потерь величину B_m следует довести до того значения, при котором необходимо измерить потери.

Результаты эксперимента. По предлагаемой методике были определены статические магнитные характеристики и потери в трансформаторной стали толщиной 0,5 мм, общим объемом 3,04 см³ (вес 23 г)⁴. Измерения были проведены на двух частотах: 50 и 150 гц. Потери определялись для частоты 50 гц при $B_m = 14000$ гс.

Результаты измерений: при $f_1 = 50$ гц, $H_{x1} = 1,35$ эр, площадь петли $54 \cdot 10^3$; при 150 гц $H_{x2} = 2,41$ эр.

⁴ Контрольные сравнительные измерения на аппаратуре типа У-55 и баллистической установке были проведены инж. Г. Л. Горнштейном.

Согласно (8) $H_c = \frac{M}{K} = 0,8$ эр; согласно (9) $P_z + P_g = 65,4 \cdot 10^{-3}$ вт, что составляет 2,84 вт кг; согласно (10) $\frac{N}{K} = 1,07 \cdot 10^{-2}$, откуда $\frac{N}{K} \cdot f_1 = 0,53$ эр; из (8) и (10) $\frac{M}{Nf_1} = 1,51$, откуда $P_z = 39,4 \cdot 10^{-3}$ вт и $P_g = 26 \cdot 10^{-3}$ вт.

В таблице приведены сравнительные результаты измерений по методу автора и баллистическим способом (суммарные потери определялись индукционным способом на установке типа У-55).

Величины	Осцилло- графиче- ский способ	Баллисти- ческий способ	Расхож- дение, %
Задерживающая сила H_c , эр	0,8	0,78	3
Суммарные потери в образ- це $P_g + P_z$, 10^{-3} вт . .	65,4	70	7
Потери на гистерезис в об- разце P_z , 10^{-3} вт . . .	39,4	42	6
Потери на вихревые токи в образце, 10^{-3} вт	26	28	7

Выводы. 1. Если потерями на вихревые токи в ферромагнитном материале можно пренебречь, то при измерении статических магнитных характеристик при помощи электронно-лучевой трубки допустима любая форма кривой намагничивающего тока.

2. При наличии ощутимых потерь на вихревые токи в образце магнитная петля на экране тем больше приближается к петле гистерезиса, чем меньше коэффициент формы кривой э. д. с.

3. Чем ниже частота намагничивающего тока, тем магнитная петля, видимая на экране, будет больше соответствовать гистерезисной петле.

4. Методика, предложенная автором, позволяет путем экстраполирования половин ширины двух магнитных петель, полученных при разных частотах, определить значение задерживающей силы в том случае, если потери на вихревые токи в образце одного порядка с потерями на гистерезис.

В заключение автор считает своим долгом отметить, что работа проводилась под руководством члена-корр. АН УССР А. А. Харкевича.

Литература

1. В. П. Вологдин и М. А. Спицын. Генераторы высокой частоты. ОНТИ, 1936.
2. K. Krüger und H. Plendl. Aufnahme von Magnetisierungskurven mit Braun'schen Röhre, Zeitschrift für Hochfrequenztechnik, v. 27, № 5, 1926.
3. Г. С. Векслер. Метод получения основной кривой намагничивания. Электричество, № 10, 1952.
4. D. E. Wiegand and W. W. Hansen. A 60-Cycle Hysteresis Loop Tracer for Small Samples of Low Permeability Material, Transactions AIEE, v. 66, 1947.
5. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах. ОНТИ, 1935, 1936.
6. П. Л. Калантаров и Л. Р. Нейман. Теоретические основы электротехники, Госэнергоиздат, 1951.

Приближенные зависимости электропотребления шахтного электротранспорта

Инж. В. А. СПИРИДОНОВ

Комбинат Востсибуголь

Цель настоящей работы — установить приближенные зависимости, с помощью которых технический персонал имел бы возможности просто и с достаточной для практики точностью анализировать и планировать электропотребление шахтного транспорта по известным проектным или фактическим показателям его работы.

С этой целью были проведены наблюдения и экспериментальные замеры на восьми шахтах Восточно-Сибирского угольного бассейна, имеющих разные производительность и длину электровозных путей, а также разную величину средневзвешенного уклона шахтных электровозных путей и разное количество находящихся в работе электровозов.

В настоящее время производительность шахтного электротранспорта за определенное время выражается в тонно-километрах. В отчетных данных эта величина определяется обычно как произведение общего количества угля (m), доставленного к шахтному двору за определенное время, на средневзвешенную длину пути доставки угля. При этом доставка порожняка и прочих грузов, а также маневры не учитываются.

Эта величина, по нашему мнению, мало удобна для анализа работы транспорта, так как в шахтных условиях транспортировка угля производится из разных мест на различные расстояния, а иногда даже по разным путям. Пути доставки угля из выработок к шахтному двору в течение месяца часто меняются. При таких условиях бывает трудно определить средневзвешенную

Даются методика и результаты проведенного автором изучения закономерностей электропотребления электротранспорта шахт Восточно-Сибирских угольных бассейнов. Устанавливается ряд приближенных зависимостей, определяющих количество электроэнергии, потребляемой транспортом при разных условиях его работы. Вводится понятие об эксплуатационном коэффициенте транспорта и дается методика его определения.

длину пути доставки угля, поэтому объем выполненных транспортом работ (в тонно-километрах) определяется со значительными ошибками.

Для анализа работы транспорта, в особенно-

сти для анализа его электропотребления, более удобно выражать производительность шахтного транспорта за определенное время не в тонно-километрах, а через среднюю скорость поступления угля на шахтный двор. Это не внесет изменений в физический смысл определения, так как объем работ, выполненных шахтным транспортом за определенное время (в тонно-километрах) прямо пропорционален весу угля, доставленного за это же время на шахтный двор. В результате такого преобразования единицы производительности транспорта расчеты упрощаются, а их точность увеличивается, так как определение средневзвешенного пути доставки становится лишним.

Исходя из сказанного, за удельный расход электроэнергии шахтным транспортом нами принято среднее количество электроэнергии, затрачиваемое на транспортировку к шахтному двору 1 t угля в час.

Определение основных показателей электропотребления шахтного электротранспорта и анализ изменения этих показателей в зависимости от изменения условий работы транспорта производились путем изучения графиков средней нагрузки тяговой подстанции и графиков производительности транспорта шахты. Методику построения графиков $P=f(Q)$ удобнее всего показать на примере.

На рис. 1,а дан суточный график нагрузки тяговой подстанции шахты со стороны постоянного тока, а на рис. 2,а — график доставки на рудничный двор угля электротранспортом шахты за те же сутки. Ввиду того что на данной шахте работает восемь электровозов, перевозящих груз на различные расстояния и по путям переменного профиля, график изменения нагрузки подстанции не в полной мере соответствует графику изменения производительности транспорта. Если же по этим графикам построить графики продолжительности использования максимумов нагрузки и производительности транспорта (рис. 1,б и 2,б), то зависимость изменения нагрузки от производительности проявляется достаточно ясно.

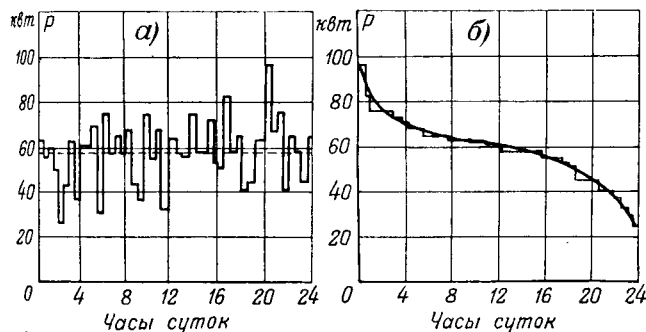


Рис. 1.

а — суточный график нагрузки тяговой подстанции шахты со стороны постоянного тока ($T_2=5250$ час); б — суточный график продолжительности использования максимума нагрузки тяговой подстанции шахты.

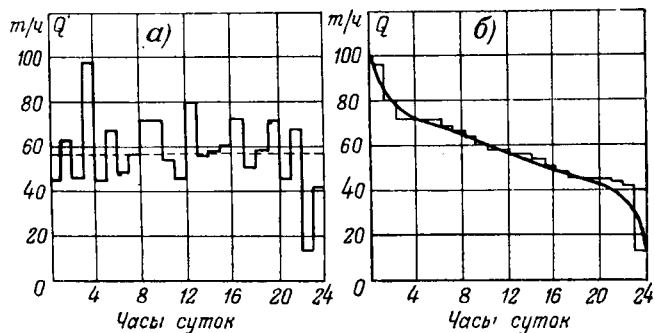


Рис. 2.

а — суточный график производительности электротранспорта шахты; б — суточный график продолжительности использования максимума производительности электротранспорта шахты.

Линия изменения средней нагрузки подстанции, построенная по графикам продолжительности использования максимумов нагрузки и производительности, дана на рис. 3. Как видно, зависимость $P=f(Q)$ может быть изображена прямой, которая отсекает на горизонтальной оси отрезок, соответствующий величине непроизводительно затраченной электроэнергии (маневры и постоянные потери), которая на данной шахте незначительна. Поэтому линия изменения средней нагрузки выходит практически из начала координат графика (рис. 3).

В этом частном случае нагрузка тяговой подстанции изменяется пропорционально изменению производительности транспорта. Следовательно, удельный расход электроэнергии с достаточной степенью точности можно считать в данном случае постоянной величиной, не зависящей от изменения производительности транспорта.

На рис. 4, а и 5, а даны суточные графики нагрузки подстанции и производительности электротранспорта другой шахты. Транспорт этой шахты наряду с основным грузом — углем — перевозит значительное количество других грузов (лес, люди и т. п.).

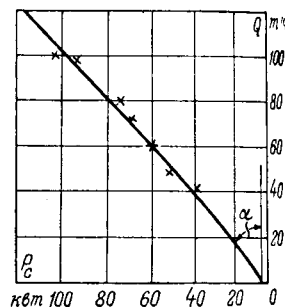
Линия средней нагрузки тяговой подстанции шахты для этого случая дана на рис. 6. Как видно, она также может быть изображена прямой линией, но в отличие от предыдущего случая линия $P=f(Q)$ отсекает на горизонтальной оси (рис. 6) значительный отрезок C , соответствующий средней мощности, затраченной на перевозку вспомогательных грузов.

Следует заметить, что маневры транспорта в условиях угольных шахт обычно сводятся к прогону электровозов от одного конца состава к другому. Поэтому затрата электроэнергии на маневровые работы шахтного электротранспорта бывает незначительной и в практике расчетов может быть опущена.

В общем случае, когда шахтный электротранспорт перевозит, кроме угля, значительное количество других грузов, удельный расход электроэнергии не будет постоянным, а будет изменяться с изменением производительности транспорта по кривой, уравнение которой имеет следующий вид:

$$P_y = K + \frac{C}{Q_y}, \quad (1)$$

Рис. 3. График изменения средней нагрузки тяговой подстанции шахты в зависимости от изменения производительности шахтного электротранспорта.



где K — величина, на которую изменяется средняя нагрузка тяговой подстанции шахты со стороны постоянного тока (квт) при изменении производительности транспорта на 1 m в час;

$K = \operatorname{tg} \alpha$ и определяется из графика;

C — определяемая по графику средняя мощность (квт), затраченная на перевозку вспомогательных грузов;

Q_y — среднее за рассматриваемое время количество угля, доставленное шахтным электротранспортом на шахтный двор в час.

Средняя нагрузка преобразовательной подстанции может быть найдена из уравнения

$$P_c = Q_y K + C. \quad (2)$$

Анализируя графики, подобные приведенным и составленные по рассматриваемым восьми шахтам за ряд дней года, в которые шахты работали с разной производительностью, мы убедились в следующем:

1. Величина составляющей удельной нагрузки K , найденная из графиков, построенных для данной шахты, практически оставалась постоянной, не зависела ни от производительности электротранспорта, ни от числа электровозов, находящихся в работе.

2. График изменения средней нагрузки тяговой подстанции в зависимости от изменения

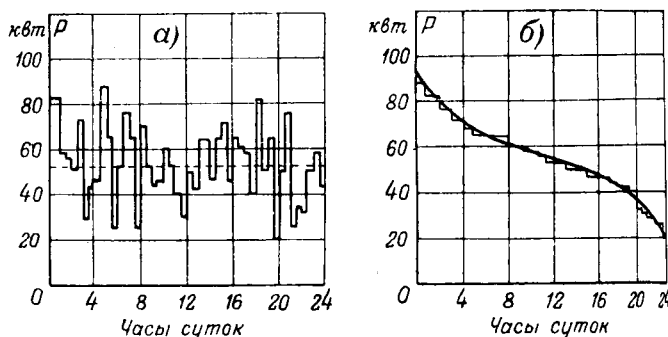


Рис. 4.

а — суточный график нагрузки тяговой подстанции шахты со стороны постоянного тока ($T_2 = 5100$ час); б — суточный график продолжительности использования максимума нагрузки преобразовательной подстанции шахты.

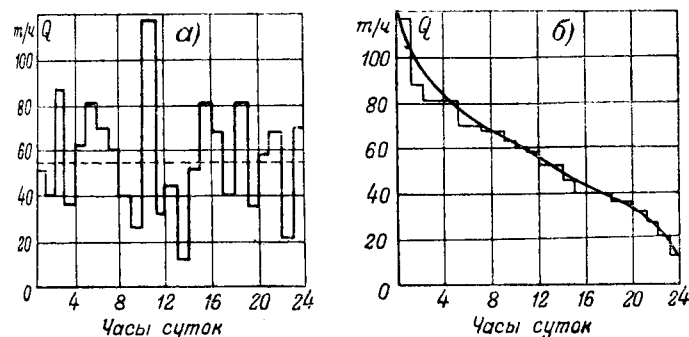


Рис. 5.

а — суточный график производительности электротранспорта шахты;
б — суточный график продолжительности использования максимума производительности электротранспорта шахты.

производительности транспорта во всех случаях без заметной ошибки может быть изображен прямой линией.

3. Число часов использования максимума нагрузки тяговой подстанции шахты во всех случаях находилось в пределах 4 800 ... 5 250, т.е. оно практически не зависит от условий работы шахтного электротранспорта и может быть принято в расчетах постоянным и равным 5 000 час.

Следует заметить, что все рассматриваемые шахты работают в три смены.

4. Составляющая удельной нагрузки K , судя по графикам, построенным для разных шахт, изменяется только с изменением величины средневзвешенного уклона шахтных электровозных путей. Она растет с увеличением средневзвешенного уклона независимо от того, идет ли груз на подъем, а порожняк подается под уклон, или наоборот.

Последнее обстоятельство понятно, так как груженные и порожние составы, идущие под уклон, почти не потребляют электроэнергии; их торможение осуществляется механически.

Для выяснения того, как изменяется составляющая удельной нагрузки K в зависимости от изменения средневзвешенного уклона электровозных путей, нами по данным восьми шахт был построен график (рис. 7).

Левая часть графика (рис. 7) характеризует изменение величины K для случаев, когда груженные составы идут на подъем, а порожняк —

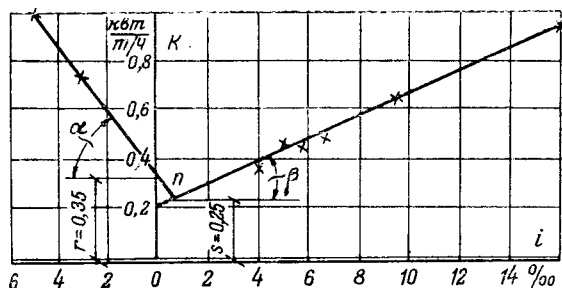
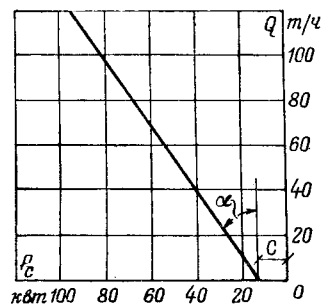


Рис. 7. График изменения составляющей удельной нагрузки K тяговой подстанции в зависимости от средневзвешенного уклона всех шахтных электровозных путей.

Рис. 6. График изменения средней нагрузки тяговой подстанции шахты в зависимости от изменения производительности шахтного электротранспорта.



под уклон; правая же часть — для случаев, когда уголь транспортируется под уклон, а порожняк идет на подъем.

Из графика рис. 7 видно, что зависимость $K=f(i)$, где i — величина средневзвешенного уклона путей в тысячных, вполне может быть изображена прямыми линиями, пересекающимися в точке n , определяющей минимальную величину K .

Величина K_{\min} определяется отрезком s (рис. 7) и соответствует случаю, когда груз транспортируется под уклон, равный окло 0,75 тысячных. При горизонтальных путях величина K будет определяться отрезком r (рис. 7).

С помощью графика рис. 7 выразим зависимость составляющей удельной нагрузки K от изменения средневзвешенного уклона путей для различных случаев.

Случай 1. Груженные составы идут вверх, а порожняк — вниз:

$$K_1 = r + \operatorname{tg} \alpha i = 0,35 + 0,13 i. \quad (3)$$

Случай 2. Груз транспортируется под уклон превышающий 0,75 тысячной:

$$K_2 = 0,2 + \operatorname{tg} \beta i = 0,2 + 0,05 i. \quad (4)$$

Случай 3 (редко встречающийся). Груз идет под уклон, находящийся в пределах от 0 до 0,75 тысячной:

$$K_3 = r - \operatorname{tg} \alpha i = 0,35 - 0,13 i. \quad (5)$$

Подставив уравнения (3), (4) и (5) в уравнение (1), получим следующие приближенные выражения удельных расходов электроэнергии на доставку угля шахтным электровозным транспортом:

для случая 1

$$P_y = 0,35 + 0,13 i + \frac{C}{Q_u}; \quad (6)$$

для случая 2

$$P_y = 0,2 + 0,05 i + \frac{C}{Q_u}; \quad (7)$$

для случая 3

$$P_y = 0,35 - 0,13 i + \frac{C}{Q_u}. \quad (8)$$

Если известна величина перевозимых за сутки вспомогательных грузов, а также известно, вверх или вниз по уклону транспортируются эти грузы, то величину C можно определить с помощью

следующих формул, вытекающих из графика рис. 7:

для случая 1

$$C = \frac{(0,35 + 0,13 i) Q'}{24}; \quad (9)$$

для случая 2

$$C = \frac{(0,2 + 0,05 i) Q'}{24}; \quad (10)$$

для случая 3

$$C = \frac{(0,35 - 0,13 i) Q'}{24}. \quad (11)$$

В уравнениях (9), (10) и (11) через Q' обозначена величина вспомогательных грузов, перевозимых шахтным электротранспортом за сутки (m).

Поясним применение полученных формул на конкретном примере.

Пример. На шахте, работающей в три смены, весь уголь перевозится с помощью электротранспорта. Средняя производительность электротранспорта за сутки по проекту или по фактическим данным составляет $Q_n = 100 \text{ т/час}$. Средневзвешенный уклон шахтных электровозных путей $i = 5$ тысячных. Грузовые составы идут на подъем, а порожняк — под уклон. Кроме угля, шахтный электротранспорт перевозит в сутки 175 т леса, который транспортируется под уклон. На шахте применяются десяти-тонные электровозы и однопонные вагонетки.

Определим удельный расход электроэнергии на транспортировку угля. Для этого воспользуемся уравнениями (3) и (10)

$$P_y = 0,35 + 0,13 \cdot 5 + \frac{(0,20 + 0,05 \cdot 5) 175}{24 \cdot 100} = 1,033 \text{ кВт} \cdot \text{т/час}.$$

Средняя нагрузка тяговой подстанции со стороны постоянного тока будет:

$$P_c = 1,033 \cdot 100 = 103,3 \text{ кВт}.$$

Длительный максимум нагрузки

$$P_m = 103,3 \cdot \frac{8760}{5000} = 180 \text{ кВт}.$$

Если уголь транспортируется под уклон, а лес подается на подъем, то удельный расход для этого случая (формулы 4 и 9)

$$P_y = 0,20 + 0,05 i + \frac{(0,35 + 0,13 i) Q'}{24 Q_n} = 0,52 \text{ кВт} \cdot \text{т/час}.$$

Средняя нагрузка подстанции со стороны постоянного тока

$$P_c = 0,52 \cdot 100 = 52,0 \text{ кВт}.$$

Длительный максимум

$$P_m = 52,0 \cdot \frac{8760}{5000} = 91 \text{ кВт}.$$

Выражение зависимости средней нагрузки шахтной тяговой подстанции от производительности шахтного транспорта может быть получено другим путем.

Уравнение движения электровозного состава, как известно, имеет следующий вид:

$$D = m Q_{\text{общ}},$$

где D — сила тяги электровоза, кг;

m — общее сопротивление движению поезда по рельсам, кг/т;

$Q_{\text{общ}}$ — вес состава, т.

Примем, что тяговое усилие электровоза прямо пропорционально потребляемой из сети

электрической мощности. Тогда средняя мощность, потребляемая электровозом из сети при движении состава,

$$P_n = P_y' Q_{\text{общ}} m, \quad (12)$$

где P_y' — мощность, потребляемая из сети для создания тягового усилия, равного 1 кг. При постоянной средней скорости движения состава

$$P_y' = \frac{P_n}{Q_{\text{общ}} m} = \text{const}.$$

Величина P_y' может быть определена как отношение номинальной мощности электровоза к его номинальному тяговому усилию. У электровозов типа Ю-10, а также П-ТР-2 и П-ТР-3, применяемых на рассматриваемых шахтах, номинальное тяговое усилие $D = 370 \text{ кг}$, а номинальная мощность $P_n = 17 \text{ кВт}$. Следовательно, для этих типов электровозов

$$P_y' = \frac{17}{370} = 0,046 \text{ кВт/кг}.$$

Если общие потери энергии собственно электровоза принять равными 10% потребляемой из сети мощности, то величина P_y' может быть принята постоянной и равной 0,05 кВт/кг.

Подставив найденное значение P_y' в уравнение (12), получим:

$$P_n = 0,05 Q_{\text{общ}} m. \quad (13)$$

Обозначим вес состава вагонеток Q_n , вес электровоза — Q_v , отношение веса груженой вагонетки к весу угля в ней — q ; тогда уравнение (12) примет следующий вид:

$$P_n = (0,05 q Q_z + 0,05 Q_v) m, \quad (14)$$

где Q_z — вес угля в составе.

При электровозах, вес которых равен 10 т,

$$P_n = (0,05 q Q_z + 0,5) m. \quad (14')$$

Сопротивление движению поезда m зависит в основном от состояния рельсовых путей, состояния подвижного состава и от профиля пути.

Уравнение (14') может быть справедливо не только для одного электропоезда, но и для всего электротранспорта шахты. В этом случае оно примет следующий вид:

$$P_c = (0,05 q Q_z + n 0,5) m', \quad (15)$$

где P_c — средняя нагрузка тяговой подстанции со стороны постоянного тока, кВт;

Q_z — среднее количество транспортируемого всеми электровозами угля, т/час;

n — количество работающих на шахте электровозов;

q — отношение веса груженой вагонетки к весу помещающегося в нее угля;

m' — эксплуатационный коэффициент, характеризующий использование электропоезда.

Величина m' зависит не только от состояния путей, подвижного состава и средневзвешенного уклона путей, но и от величины электрических потерь в троллейных проводах, от затраты электроэнергии на маневровые работы, а также от всех других затрат электроэнергии, связанных с работой электротранспорта шахты.

Уравнение (15) включает величины, всегда известные на шахте, поэтому средняя за определенное время величина коэффициента m' может быть легко определена.

Если в уравнении (15) вместо P_c подставить выражение (2), то

$$m' = \frac{Q_4 K + C}{0,05qQ_4 + 0,5n} \quad (16),$$

Пример. Шахта имеет в работе девять электровозов весом 10 т каждый. Емкость вагонеток 1 т. Вес порожней вагонетки 0,75 т. Среднечасовая производительность электротранспорта шахты $Q_4 = 70$ т. Уголь подается вверх, на подъем. Средневзвешенная величина уклона шахтных путей $i = 3$ тысячных. Кроме угля, электротранспорт перевозит 100 т леса в сутки ($Q' = 100$), лес транспортируется вниз, под уклон. Средняя нагрузка тяговой подстанции со стороны постоянного тока $P_c = 80$ кВт.

Определим, удовлетворительно ли используется электротранспорт шахты. Нормальное значение коэффициента находим с помощью уравнения (16), которое для данного случая будет иметь вид:

$$\begin{aligned} m'_n &= \frac{Q_4 (0,35 + 0,13i) + \frac{(0,20 + 0,05i) Q'}{24}}{0,05qQ_4 + n0,5} = \\ &= \frac{70 (0,35 + 0,13 \cdot 3) + \frac{(0,20 + 0,05 \cdot 3) 100}{24}}{0,05 \cdot 1,75 \cdot 70 + 9 \cdot 0,5} = 5,05. \end{aligned}$$

Фактическое значение эксплуатационного коэффициента находим с помощью уравнения (15):

$$m'_\phi = \frac{P_c}{(0,05qQ_4 + n0,5)} = \frac{80}{0,05 \cdot 1,75 \cdot 70 + 9 \cdot 0,5} = 7,5.$$

Ввиду того что фактическое значение коэффициента m'_ϕ значительно больше нормального m'_n , электротранспорт на данной шахте используется неудовлетворительно, так как имеют место дополнительные неоправданные потери энергии.

Если коэффициент m' будет доведен до нормального для данной шахты значения, удельный расход электроэнергии

$$P_y = \frac{P_c}{70} = \frac{(0,05 \cdot 1,75 \cdot 70 + 9 \cdot 0,5) 5,05}{70} = 0,761 \text{ кВт/т·час.}$$

Фактический же удельный расход равен $\frac{80}{70} \approx 1,14 \text{ кВт/т·час.}$

Следовательно, электротранспорт шахты ежедневно перерасходует 640 кВтч.

Приведенные приближенные зависимости позволяют анализировать и планировать электропотребление транспорта с вполне достаточным для практики приближением, дают возможность устанавливать для каждой шахты комбинация величины нормальных эксплуатационных коэффициентов и, таким образом, контролировать работу электротранспорта каждой шахты. Приведенные зависимости полезны не только для производственного анализа и планирования электропотребления, но и для проектирования тяговых подстанций.

Литература

1. В. И. Вейц. Энергетические характеристики и коэффициент полезного действия промышленной энергетики. Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук, № 11, 1946.
2. В. А. Спиридонов. Некоторые закономерности электропотребления угольных шахт. Электричество, № 9, 1951.
3. С. А. Волотковский. Рудничная электровозная тяга. Углетехиздат, 1951.

[13. 6. 1952]



Электрическая изоляция в работах П. Л. Шиллинга и Б. С. Якоби¹

Кандидат техн. наук, доц. В. А. ГОЛУБЦОВА

Москва

Статическое электричество широко изучалось учеными XVIII в. Для объяснения наблюдаемых электростатических явлений было выдвинуто немало гипотез. Нельзя, однако, сказать, чтобы они давали правильное объяснение указанным явлениям. Этот период характерен главным образом тем, что был накоплен обильный экспериментальный материал, имевший большое значение для развития науки об электричестве и для зарождения в будущем новой отрасли техники—электротехники.

В проводившихся тогда опытах ученые обнаружили, что различные тела ведут себя неодинаково в отношении статического электричества и что их можно разделить на две группы. К первой можно отнести тела, обладающие способностью создавать электричество при трении: стекло, смолу, алмаз, серу, фосфор и др., ко второй—тела, способные распространять электричество, а также электризоваться при помощи тел первой группы. Знание электрических свойств разных веществ позволило ученым осуществлять интересные эксперименты с электричеством, получать электростатические заряды и отводить их на довольно значительные расстояния от основного источника—лейденской банки. Можно напомнить о разнообразных опытах со статическим электричеством первых русских выдающихся деятелей науки и экспериментаторов в области электротехники—М. В. Ломоносова, Г. В. Рихмана, Ф. У. Т. Эпинуса, А. Т. Болотова, В. В. Петрова, и др.

Немало экспериментов было выполнено и за рубежом. При этом приходилось разрешать также вопросы, связанные с изоляцией. Лесаж в Женеве в 1774 г., пытаясь построить электростатический телеграф, передавал сигналы—заряды по 24 проводникам, изолированным в глиняных трубках.

Уже опыты с лейденской банкой и электростатическими машинами показали большую важность материалов, не проводящих электричество, для сохранения электрического заряда и необ-

ходимость таких изолирующих электричество материалов для успешных экспериментальных исследований, а также для практических целей. Расширение знаний об электрических свойствах отдельных материалов, о зависимости выявленных свойств от внешних условий постепенно обогащало технику эксперимента и подсказывало ученым пути для более полного раскрытия и изучения природы электрических явлений. Разные результаты, полученные, например, в соответствующих опытах, проведенных в дождливую и сухую погоду, в температурных условиях зимы и лета, указывали на зависимость электроизолирующих свойств материалов от влажности, температуры и других факторов. Так накапливались по мере наблюдений сведения, показывавшие, например, что влага и тепло ухудшают свойства непроводящих электричества тел, а хорошо высушенное дерево, покрытое лаком, значительно лучше сохраняет электрический заряд.

Открытие явления гальванического тока и затем создание вольтова столба (1799 г.) вписали новую страницу в науку об электричестве. Появилась возможность получать непрерывный электрический ток. Русский академик В. В. Петров (19.7.1761—3.8.1834) создал гальванический прибор—«огромную наипаче батарею» (из 4 200 медных и цинковых кружков), посредством которого можно было производить не только уже известные до того «физико-медико-химические опыты, но и с надежнейшим успехом заниматься новыми исследованиями» [Л. 1].

Василий Владимирович Петров, первый открывший явление электрической дуги (1802 г., не позднее) и указавший на многие ее практические применения, был непревзойденным классиком эксперимента. Проводя опыты со своей батареей, он высоко оценил практическое значение качества электроизоляционных материалов и научился усиливать качества последних (покрывая, например, дерево сургучным лаком, пропитывая бумагу органическими маслами). Он первый осуществил изоляцию проволоки, по которой отводил электрический ток от полюсов батареи к месту своего эксперимента.

Акад. В. В. Петров заложил основы электротехники.

¹ В № 12 («Электричество», 1952) опубликована первая часть работы автора—«Вопросы электрической изоляции в трудах русских ученых».—Ред.

Русские ученые Павел Львович Шиллинг (16.4.1786—6.8.1837) и Борис Семенович Якоби (21.9.1801—10.3.1874) своими трудами намного увеличили вклад русских ученых в области применения электричества. В числе их изобретений — телеграф, гальванопластика, электровзрывание мин на расстоянии, электродвигатель и др.

Член-корреспондент Петербургской академии наук П. Л. Шиллинг усиленно занимался вопросами применения электрического тока для практических целей. Он был в курсе предпринимавшихся в этом направлении попыток современных ему ученых и, в частности, был знаком с работами немецкого ученого Земмеринга, который, применяя гальванический ток для устройства телеграфа, использовал принцип электролиза воды: на приемном пункте поднимались пузырьки газа, доступные наблюдению [Л. 2].

8 июля 1809 г. Земмеринг записал в своем дневнике: «Не мог успокоиться, пока не привел в исполнение мысль о телеграфе посредством выделения газов». Для этого опыта он употребил небольшую батарею из 15 пар элементов и проволоки, изолированные сургучом. В другом месте Земмеринг указывает, что его «телеграфический проводник составлен из 35 проволок, из которых каждая обмотана шелком для изолирования и передает действие гальванизма независимо одна от другой» [Л. 3]. Можно предположить, что упоминание о двух вариантах изоляции проволоки свидетельствует о попытках ученого найти наилучшее решение вопроса изоляции провода; в то время этот вопрос еще не был решен. Попытки Земмеринга построить телеграф не имели практических результатов, но представляли известный интерес в экспериментальном отношении.

Учитывая обстоятельства неудачи Земмеринга (неудовлетворительная идея действия и недостатки конструкции самого аппарата, большие затруднения с изоляцией проводников), П. Л. Шиллинг занялся в первую очередь разработкой именно вопросов электрической изоляции проволоки. Над этой задачей он работал с 1810 по 1812 г.

В 1812 г. для испытания надежности изоляции провода при передаче электричества на расстояние и для проверки своей идеи применения электрического тока в военном деле для взрыва мин на расстоянии П. Л. Шиллинг организовал опытный взрыв мин на р. Неве. Опыт подтвердил правильность рассуждений и расчетов Шиллинга по обоим вопросам. В этих опытах он применял проводники, покрытые каучуком и лаковой мастикой. В 1814 г., будучи вместе с войсками русской армии в Париже, П. Л. Шиллинг успешно повторил свой опыт на р. Сене.

В 1827 г., во время маневров русской армии в Царском Селе (г. Пушкин), Шиллинг при взрыве мин посредством электрического тока применил для изоляции новые материалы и разработал новую конструкцию провода. Сведения об этом мы находим в статье С. Усова «Об электрических опытах в России», помещенной в газете «Северная пчела»: «Для зажигания пороха в земле на дальние расстояния, на всяком местоположении, даже на сыром, барон (Шиллинг. — В. Г.)

употреблял следующий способ. Сообщительные проволоки, которые идут от полюсов вольтовой батареи, запрядались в смоляные пеньковые веревки в палец толщиной, длиной же по надобности², концы этих веревок укреплялись в медные трубки, которые имели на своих концах по заостренному концу хорошего плотного древесного угля, трубки были закреплены на медной бляхе, в таком между собой расстоянии, что куски угля были друг от друга около полудюйма. Другие концы веревок прикреплялись к полюсам батареи» [Л. 4].

Электрозажигательная система Шиллинга и его методы изолирования токонесущих проволок получили особенное распространение после Русско-турецкой войны 1828—1829 гг.

Методы, которые применял П. Л. Шиллинг для изоляции проводников, были довольно разнообразны. В очерке, посвященном истории Технического гальванического заведения русской армии, напечатанном в «Инженерном журнале», описывается такой способ изолирования Шиллингом проводников: «Проводники состояли из весьма тонкой проволоки № 27, т. е. толщиной в диаметре 0,096 линии, обвитой шелком и пропущенной через смолистый состав, потом обвитой пенькою и вторично пропущенной через тот же состав. Две изолированные таким образом проволоки оплетались в одну общую веревку» [Л. 5]. В дальнейшем Шиллинг увеличил диаметр проволоки, так как примененная им вначале «весьма тонкая проволока № 27» расплавлялась.

Исследуя вопросы изоляции и плодотворно работая в области минного дела, Шиллинг не оставлял мысли о телеграфе. Он поставил перед собой задачу построить, используя действие электрического тока на магнитную стрелку³, пригодный для эксплуатации электромагнитный телеграф [Л. 6—8].

В 1830 г. замысел Шиллинга получил материальное, конструктивное воплощение, а в 1832 г. уже была протянута первая телеграфная линия подземного кабеля между Зимним дворцом и зданием Министерства путей сообщения. Для этой цели П. Л. Шиллинг разработал конструкцию подземного кабеля. «Кабели для телеграфа Шиллинга употреблялись подземные, для чего брались стеклянные трубки, которые соединялись резиновыми муфтами, места соединения обмазывались особым составом и в них прокладывалось необходимое число медных проволок, обмотанных для изоляции бумажной пряжей» [Л. 9].

П. Л. Шиллинг первый изобрел в 1832 г. электромагнитный телеграф⁴, действительно пригод-

² Разрядка моя. — В. Г.

³ Предложение Фехнера в 1820 г., так же как незадолго до него Ампера, применить открытое Эрстедом действие гальванического тока на магнитную стрелку не было ими реализовано.

⁴ Гаусс и Вебер построили по принципу Шиллинга телеграфную линию в Геттингене в следующем, 1833 г.; Уитстон ввел стрелочный телеграф на железных дорогах в Англии в 1837 г.; Карл Штейнфельд провел телеграф в 1838 г.; Морзе изготовил свой аппарат в 1840 г.

ный для практических целей, и создал выдержавший испытание подземный телеграфный кабель. Его предложение о передаче электрического тока по голым проводам воздушной линии, широко используемое в современной технике, было злоосмеяно современниками.

В своих работах Шиллинг широко использовал каучук для изоляции подземных проводов.

Автор ряда исторических изысканий в области технических изобретений и открытий акад. И. Х. Гамель (ученик В. В. Петрова) в связи с этим отмечает: «Если бы виновнику телеграфа суждено было жить долее, то первейшая попытка подводного проложения телеграфных проводов состоялась бы у нас, в России. Эти проводники, однако, служили бы вероятно недолго потому, что в то время еще не знали употребления гуттаперчи для изолирования проволоки и Шиллинг должен был довольствоваться каучуком» [Л. 10].

Б. С. Якоби, говоря о выдающихся работах Шиллинга, отмечает, что разработанная Шиллингом техника в области взрывания мин при помощи электрического тока открыла «возможность воспламенять порох почти на всяком произвольном расстоянии, что прежде даже теоретически считалось невозможным».

Акад. Якоби, приоритет которого закреплен во многих областях электротехники, приложил немало усилий для продолжения работ П. Л. Шиллинга в области взрывания мин и телеграфии. Неоднократные неудачи, которые постигали Якоби из-за плохой изоляции проводников при испытаниях взрыва пороха, заставили его упорно работать над подбором изолирующих материалов и над способами изолирования проводов.

В инструкции, разработанной Б. С. Якоби для подготовки взрывов мин, есть перечень материалов, необходимых для производства этих работ. Кроме того, им была сконструирована специальная машина для обвивки провода, созданы конструкция и технология изоляции проводов. Изоляция состояла в обвивке пряжей с последующей пропиткой специальной мастикой, состоящей из сала, воска и гарпиуса. Однако эта изоляция не могла надежно обеспечить работу телеграфных линий под водой. Поэтому последующие работы Якоби были направлены на усиление изоляции проводов.

В программе наставлений «По применению гальванизма в военном деле», написанной Якоби в 1844 г., есть специальная глава «О способности электропроводимости проводников; лучший способ их приготовления и изолировки». В одном из своих писем Б. С. Якоби, характеризуя выполненную в России работу по взрыванию мин с применением электрического тока, отметил, что начало его работ по этому предмету совпадает с началом 1840 г. и что, следовательно, Россия обратила на эту столь существенную уже в то время отрасль военного искусства внимание почти 30 годами раньше других государств.

Называя 40-й год прошлого столетия, Якоби рассматривает этот вопрос в разрезе собственных работ, имея в виду годы, когда мины с электрическим взрывателем прочно вошли на вооруже-

ние русской армии. Если же вести счет, начиная с работ Шиллинга в этой области, то к цифре, названной Якоби, нужно прибавить не меньше 28 лет.

В 1839 г. Б. С. Якоби было поручено устроить телеграфное сообщение между Зимним дворцом и зданием Главного штаба. Кабель Якоби состоял из двух проводников медной проволоки (обмотанной резиной), заключенных в стеклянные трубки, отдельные звенья которых также были соединены резиновой обмоткой. Такого устройства проводники были проложены в земле через Дворцовую площадь [Л. 11].

В 1843—1844 гг. Якоби руководил прокладкой на глубине в $1\frac{1}{2}$ аршина подземной телеграфной линии между Петербургом и Царским Селом (г. Пушкин) и применил там провода, в которых медная проволока была обвита двумя рядами резиновой тесьмы.

Одним из главных и существенных недостатков в подземных телеграфных кабелях того времени была неудовлетворительная изоляция проволоки. Даже при самой тщательной обмотке резиновой тесьмой, как показал опыт, между слоями резины все-таки оставались скважины, пропускающие воду. В этот же период Якоби изготовил провод с гуттаперчевой изоляцией. Однако гуттаперча в то время была еще мало известна и недостаточно оценена.

Для изоляции проводников телеграфной линии Москва — Петербург и предохранения их от возможных повреждений Якоби предполагал разместить их в желобах из деревянных брусков, пропитанных дегтем, шириной 4 и толщиной 3 дюйма. Желоба, в которых размещались проводники, должны были быть залиты асфальтом, а бруски — прибиты к шпалам.

Для соединения проводников с приборами Якоби намечал применить проводники из медной проволоки, обвитые нитками, пропитанными мастикой из воска и гарпиуса и продетые через стеклянные трубки; последние должны были быть уложены в деревянные желоба и залиты асфальтом.

В 1949 г. в Ленинграде был обнаружен на глубине 85 см под двумя слоями булыжного покрытия деревянный жолоб, в котором оказались две стеклянные трубки. В каждой из трубок находился медный проводник диаметром 1,37 мм, изолированный суровыми нитками, пропитанными изоляционной массой, состоящей из воска и канифоли. По утверждению проф. Чарахова, найденный жолоб с проводниками (кабель) относится к одной из экспериментальных телеграфных линий, проложенных акад. Якоби по направлению к Московскому вокзалу.

Вопросами электрической изоляции Б. С. Якоби занимался и при конструировании своего первого электромагнитного двигателя. Он писал: «Спираль должны очень близко охватывать стержни, которые для изоляции должны быть покрыты шелковой материей» и дальше: «две смежных проволоки до 400 футов длины и $\frac{3}{4}$ линии в диаметре, тщательно покрытые шелковой

лентой, были вместе намотаны спиралью на пустотелый деревянный цилиндр диаметром в $1\frac{1}{2}$ дюйма». Итак, изоляция токоведущих частей первого электромагнитного двигателя Якоби была выполнена с помощью шелковой ленты. После того как стала известна возможность получить электромагнитную машину вращения, созданную Якоби, многие ученые и изобретатели всех стран мира усиленно стали заниматься разработкой новых конструкций электромагнитных двигателей вращения.

На протяжении двух последних столетий было установлено, что ряд веществ обладает не проводящими электричество свойствами. Ученые XVIII и первой половины XIX в. к ним относили: стекло, минеральную кость, смолу, серу, сургуч, шеллак, дерево, перламутр, драгоценные камни, шелк, хлопчатобумажную, шелковую и суровую нитки, волос, бумагу, картон, растительное масло, деготь, воск, сало, каменную соль, горные квасцы, чистую воду, сухой воздух и др. Фарадей, занимаясь изучением многих вопросов электричества и магнетизма, расширил приведенный перечень изолирующих веществ, добавив спермацет, петролейный эфир, очищенный скипидар, газы (азот, кислород, углекислый газ, хлор, сероводород, сернистый газ и др.). В 1837 г. Фарадей выяснил и описал роль диэлектриков в электрических явлениях.

Следует все же признать, что ученые и изобретатели, работавшие в прошлом над изучением и применением электричества, хотя и понимали значение качества электрической изоляции для успеха создания надежных электрических машин, аппаратов и приборов, все же оставляли часто вопросы изоляции в тени, считая их нередко второстепенными.

К чести наших отечественных ученых XVIII—XIX вв., в частности имея в виду упомянутые выше работы Шиллинга и Якоби, необходимо отметить большое внимание, уделявшееся ими вопросам изоляции. Благодаря их усилиям такие диэлектрики, как гуттаперча, а также после открытия в 1839 г. метода вулканизации каучука—резина, получили быстрое распространение.

Литература

1. Из рапорта В. В. Петрова в Конференцию Петербургской медико-хирургической академии в 1801 г. (М. А. Шателен, „Русские электротехники“, стр. 42, 1950).
2. П. Войнаровский. „Электротехника“. Энциклопедический словарь. Изд. Брокгауза и Эфрона, т. 80, стр. 570—578, изд. 1904 г.
3. Копия записки К. Ладрей, сохранившейся у акад. И. Гамеля (Исторические очерки. СПб, 1886).
4. Газета „Северная пчела“, № 282, 11 ноября 1837 г.
5. „Инженерный журнал“, № 12, 1869.
6. М. Шедлинг. „История телеграфа“. Почтово-телеграфный журнал, 1896, сентябрь—ноябрь.
7. О. Д. Хвольсон. Речь на торжественном собрании, посвященная столетию со дня рождения Шиллинга. Электричество, № 6, 1886.
8. О. Д. Хвольсон. Популярная лекция об электричестве и магнетизме. Лекция XII, раздел „Телеграф Шиллинга“. СПб, 1884.
9. Очерк работы русских по электротехнике 1800—1900 гг. СПб, 1900.
10. И. Х. Гамель. Исторические очерки электрических телеграфов. СПб, 1886.
11. История телеграфа России. Электричество, № 13—14, 1881.
12. Д. В. Ефремов и М. И. Радовский. Динамомашин в ее историческом развитии. Материалы и документы под ред. В. Ф. Миткевича, изд. АН СССР, 1934.
13. Д. В. Ефремов и М. И. Радовский. Электродвигатель в его историческом развитии (значении). Документы и материалы под ред. В. Ф. Миткевича, 1936.
14. А. А. Елисеева. Выдающиеся открытия и изобретения русских электротехников в XIX веке. Журнал „Физика в школе“, № 2 и 3, 1948.



К статье А. А. Глазунова, А. А. Глазунова и Г. М. Розанова „Экономически целесообразное отношение сечений алюминия и стали в сталеалюминиевых проводах“

(Электричество № 5, 1952)

Кандидат техн. наук Н. Н. КРАЧКОВСКИЙ

Гидроэнергопроект

В связи с интенсивным строительством электрических сетей экономия высококачественной оцинкованной стальной проволоки в сталеалюминиевых проводах и уменьшение затрат по сооружению линий электропередачи в масштабе всего Советского Союза могут достигнуть значительных величин. Поэтому вопросы, поднятые в статье А. А. Глазунова и др., имеют актуальное значение.

Предложение авторов статьи заключается в отказе от действующего ГОСТ-839-41 на сталеалюминиевые провода и замене его новым стандартом. Авторы предлагают совершенно исключить из ГОСТ провода усиленной прочности (АСУ). Осуществление этого предложения, по их мнению, дает сокращение расхода стальной оцинкованной проволоки на 25...30%.

Авторы статьи считают, что принятые в ГОСТ 839-41 величины отношения сечений алюминия и стали необоснованы; что изготавливаемые по этому стандарту сталеалюминиевые провода обладают излишней надежностью и предлагают новый стандарт, предусматривающий понижение эксплуатационного запаса прочности сталеалюминиевых проводов в среднем на 20%. Такое предложение может быть принято в том случае, если каким-либо способом, с учетом данных о работе существующих линий, будет обоснована возможность обеспечить надежную работу линий электропередачи с проводами нового стандарта.

По мнению авторов, убедительным доказательством такой возможности является то, что предлагаемые сталеалюминиевые провода новых марок АСІ и АСІІ имеют более высокие эксплуатационные коэффициенты запаса прочности, чем медные провода. При этом авторы ссылаются на практику эксплуатации медных проводов в СССР, которая показала их высокую механическую прочность и высокую надежность работы линий с этими проводами.

Однако в статье не имеется фактических данных и анализа работы линий электропередачи с медными и сталеалюминиевыми проводами, изготовленными по ГОСТ 839-41. А между тем известно, что на некоторых линиях 110 кВ вследствие гололеда и мокрого снега имели место аварии с обрывами проводов. Казалось, следовало бы рассмотреть такого рода аварии и дать анализ их. Без этого трудно согласиться с предложением авторов об уменьшении коэффициента запаса прочности сталеалюминиевых проводов.

Вопрос о коэффициенте запаса прочности не может решаться во всех случаях однозначно — следует учитывать ответственность и значение линии электропередачи. Введение в ГОСТ 839-41 проводов усиленной прочности давало возможность сооружать ответственные линии повышенной механической надежности. До настоящего времени на линиях 220 кВ, по которым нормально передается 100...150 мвт, применялись провода усиленной прочности типа АСУ. В зависимости от расчетной нагрузки выбирался провод АСУ-300, либо АСУ-400. Эффект короны при этом обычно не учитывался, так как диаметр провода АСУ-300 равен 25,2 мм, а провода АСУ-400—27,8 мм.

Согласно табл. 2 рассматриваемой статьи предлагаемые провода АСІ имеют следующие коэффициенты запаса прочности¹:

	II район гололедности	IV район гололедности
АСІ-120	5,70	3,50
АСІ-150	6,35	3,75
АСІ-400	6,0	3,95

Из рассмотрения этих данных следует, что во II районе гололедности провода АСІ-400 имеют меньший запас прочности, чем провода АСІ-150, что нелогично, так как провода АСІ-400 будут применяться на линиях 220 кВ, которые вследствие больших мощностей, передаваемых по ним, должны обладать не меньшим, а большим запасом прочности, чем линии 110 кВ, на которых обычно применяются провода АСІ-150. Данные табл. 2 также показывают, что при переходе от II к IV району гололедности коэффициент запаса прочности провода уменьшается в 1,5...1,8 раза.

Согласно „Правилам устройства электротехнических установок“² при определении климатического района „Единичные случаи (наблюдаемые, например, раз в десятилетие) особо высоких или низких температур, особенно сильные ветры и исключительно интенсивных гололедов не должны приниматься во внимание“. Это означает, что провода должны обладать необходимым запасом прочности, обеспечивающим надежную работу линий.

Провода М-70 и М-95 в IV районе климатического условия, как следует из табл. 2 рассматриваемой статьи, имеют коэффициенты запаса прочности 2,70 и 3,35. В соответствии с указанием авторов о высокой надежности линий с медными проводами следует сделать заключение, что величины этих коэффициентов в полне достаточны. Поэтому и сталеалюминиевые провода могут иметь коэффициенты запаса прочности, равные в среднем 3. Следовательно, коэффициент запаса прочности проводов предлагаемой конструкции, равный для II района гололедности в среднем 6, очевидно, совершенно не нужен и можно идти на его снижение, т. е. на дальнейшее уменьшение содержания стали в проводах, на дальнейшее их удешевление. К сожалению, авторы рассматриваемой статьи ничего не говорят о том, какие же именно необходимо иметь запасы прочности для надежной работы линий электропередачи.

Экономическая эффективность применения новых проводов дана в табл. 4 и 5 статьи А. А. Глазунова и др. Из табл. 4 следует, что по сравнению с проводами существующей конструкции получается сокращение пролета на 1,4...3,6%. Однако в дальнейшем в табл. 5 это обстоятельство не учитывается. Уменьшение стоимости сооружения 1 км линии с проводами АСІ-95...АСІ-400 лежит в пределах 642...2 430 руб., что в ценах 1950 г. составляет 1...1,5% стоимости линии. Следовательно, если при

¹ Эксплуатационные коэффициенты прочности проводов подсчитаны по предложенному проф. А. А. Глазуновым способу. Некоторые авторы, в частности В. В. Бургсдорф, определяют его несколько иначе без вычета собственного веса проводов.

² Правила устройства электротехнических установок, Госэнергоиздат, 1949, стр. 144.

вычислении данных табл. 5 учесть сокращение пролета, то, повидимому, никакой экономии фактически не получится. Уменьшение количества оцинкованной стальной проволоки компенсируется увеличением металла для опор и бетона для фундаментов.

Подводя итоги сказанному, можно сделать заключение, что для решения вопроса о введении нового ГОСТ на сталеалюминиевые провода необходимо:

а) рассмотреть данные о работе существующих линий с медными и сталеалюминиевыми проводами и дать анализ аварий, связанных с обрывом проводов;

б) установить на основании результатов этого анализа или дополнительных испытаний необходимый эксплуатационный запас прочности проводов независимо от климатического района.

Как известно, многие сооружения разделяются на классы в зависимости от их ответственности и требований надежности. Представляется целесообразным и линии электропередачи разделить на два класса — нормальной и повышенной надежности — и установить для них необходимые эксплуатационные коэффициенты запаса прочности проводов (например, 3 и 5). Соответственно этому целесообразно иметь два сортамента сталеалюминиевых проводов — с меньшим и большим содержанием стали.

В I и II климатических районах линии работают в гораздо более легких условиях, чем в III и IV. Поэтому при наличии двух сортовентов для I и II районов следует применять провода с меньшим содержанием стали, с тем, однако, чтобы при этом были обеспечены повышенные коэффициенты запаса прочности, требуемые для линий I класса.

Поскольку содержание стали в проводах влияет на их тяжение и провес, а следовательно, на величину пролета, целесообразно на 2...3 конкретных объектах дать полное экономическое сравнение линий со сталеалюминиевыми проводами нормальной и повышенной прочности. Расстановку опор при этом следует произвести на продольном профиле. Такое сравнение позволит сделать окончательное заключение о том, один или два сортамента проводов целесообразно иметь.

Инж. Р. А. ГОЛУБЦОВ

Теплоэлектростроитель

При подвеске многопроволочных проводов на линиях электропередачи с нормальным тяжением, т. е. с номинальным коэффициентом запаса прочности, равным 2, расчетное напряжение обычно принимается: $\sigma_{\max} = 19,5 \text{ кг/мм}^2$ — в медных проводах и $\sigma_a = 8 \text{ кг/мм}^2$ (по алюминию) — в сталеалюминиевых проводах. При таких значениях расчетных напряжений действительные коэффициенты запаса прочности, как известно, составляют для медных проводов примерно 1,8, для сталеалюминиевых проводов нормальной прочности (АС) — 2,34...2,55, для сталеалюминиевых проводов усиленной прочности (АСУ) — 2,65...2,70.

Отмеченная разница в прочности сталеалюминиевых и медных проводов, с одной стороны, и относительно удовлетворительная работа последних на линиях электропередачи, подтвержденная длительным опытом эксплуатации, — с другой, дают основание констатировать наличие в сталеалюминиевых проводах значительных формально недоиспользуемых запасов прочности. В связи с этим возникли предложения о более эффективной нагрузке сталеалюминиевых проводов за счет полного использования их механических свойств.

По характеру рекомендуемых мероприятий предложения могут быть разделены на две основные группы. Предложения первой группы идут по пути значительного увеличения расчетного тяжения в проводах, доводя значения фактических напряжений до 12 кг/мм^2 и выше, а второй — по пути создания новых конструкций сталеалюминиевых проводов с уменьшенным сечением стального сердечника. Предложение авторов рассматриваемой статьи относится ко второй группе.

Авторами разработаны конструкции сталеалюминиевых проводов марок АС I и АС II. Однако при последующем сравнении обеих марок в статье отдается предпочтение проводам марки АС I. Отношение сечений алюминия и стали

для проводов марки АС I находится в пределах 7,20...8,73. Для существующих проводов нормальной конструкции (АС) это отношение составляет 5,33...5,6 (для сечения 95 мм^2 и выше), а для усиленной конструкции (АСУ) — 4,09...4,48.

По мнению авторов, предлагаемые ими конструкции проводов марки АС I могут быть допущены для применения в любых климатических условиях. Однако авторы по этому поводу делают оговорку, что в районах с исключительно тяжелыми климатическими условиями линии следует строить с повышенными эксплуатационными запасами прочности, для чего наиболее целесообразно идти на некоторое снижение допускаемых напряжений материала провода. Более конкретные указания на этот счет в статье не дается.

Применение проводов марки АС I дает 25...30% экономии стали, идущей на их изготовление. Из стоимости этой стали и складывается размер снижения затрат на сооружение 1 км линии с проводами АС I. Результаты подсчета этого снижения даны в табл. 5 рассматриваемой статьи, из которой видно, что размер прямой экономии от применения проводов АС I лежит в пределах 1...1,5% стоимости линии.

Замена проводов марки АС проводами марки АС I приведет, с одной стороны, к уменьшению расчетных пролетов, т. е. к некоторому увеличению числа опор на линии, а с другой, — к облегчению расчетных нагрузок на опоры, т. е. может оказать некоторое влияние на снижение их весов. Можно предполагать, что в районах с нормальными климатическими условиями линии с проводами АС и АС I в отношении основных затрат будут иметь примерно одинаковые экономические характеристики. То же самое можно сказать и в отношении потерь электроэнергии и мощности на нагрев и на корону.

Что же касается районов с исключительно тяжелыми климатическими условиями, то может оказаться, что как в отношении основных затрат, так и в части эксплуатационных расходов лучшими экономическими показателями будут располагать линии с проводами АСУ. Напомним, что в соответствии с приведенными в статье подсчетами потери на корону на 1 км линии 220 кВ с проводами АСУ-400 составляют 0,24 кВт в хорошую погоду и 17 кВт в плохую погоду, а на 1 км той же линии с проводами АС I-400 — соответственно 0,30 и 25 кВт. Следовательно, с точки зрения потерь на корону, вопреки мнению авторов, провода АСУ-400 и АС I-400 не могут считаться одинаковыми.

По совокупности основных экономических показателей предложение о целесообразности применения в районах с исключительно тяжелыми климатическими условиями проводов АС I взамен проводов АСУ нам представляется недоказанным.

Посмотрим, в какой степени обеспечивается необходимая надежность линий в случае замены на них проводов АС проводами АС I. Выяснение этого вопроса авторами ведется при помощи эксплуатационного коэффициента запаса прочности (экзп); при этом устанавливается, что экзп для проводов АС I составляет 0,76...0,82 той же величины для проводов АС, что провода АС I имеют экзп в 1,1...1,3 раза больший, чем медные провода. На основании этого авторы заключают о высокой степени надежности работы воздушной линии с проводами АС I.

При том методе механического расчета проводов, который принят у нас (постоянство значения номинального коэффициента запаса прочности), экзп является величиной переменной, зависящей от длины пролета, от сечения, конструкции и материала проводов, от расчетного тяжения и от района климатических условий. Минимально допустимые значения экзп, как известно, не нормируются и экзп, как мы покажем ниже, не может рассматриваться в качестве единственного мерила для оценки степени надежности работы воздушных линий.

Из общего числа повреждений негрозового характера, зарегистрированных на линиях, самую многочисленную группу (49...56%) составляют повреждения проводов, причем примерно половина повреждений связана с их обрывом. Интересно отметить, что в преобладающем большинстве повреждения проводов бывают вызваны посторонними причинами.

Многолетним опытом эксплуатации линий электропередачи 220, 110 и 35 кВ установлено, что общая эксплуата-

ционная надежность линий значительно возрастает с повышением номинального напряжения. Например, в один из годов на 167 случаев повреждения линий, зарегистрированных в ряде энергосистем, на линии 220 кВ пришлось 5 случаев, на линии 110 кВ — 66 случаев и на линии 35 кВ — 96 случаев.

Общая эксплуатационная надежность линий в значительной мере зависит от материала и сечения проводов. Более высокая общая надежность линий 110 кВ по сравнению с линиями 35 кВ может быть отнесена в значительной мере за счет применения на линиях 110 кВ проводов более крупных сечений и запрещения подвески на них алюминиевых проводов. Большая надежность линий 220 кВ в той же мере может быть объяснена подвеской на них, как правило, особо прочных проводов марки АСУ. Удельная повреждаемость проводов (число обрывов на 1000 км линий в год) в зависимости от сечения и материала может быть охарактеризована следующими показателями:

Марка провода	Удельная повреждаемость	Марка провода	Удельная повреждаемость
М-35	2,5	АС-50	2,0
М-50	1,5	АС-70	1,6
М-70	1,1	АС-95	1,1
М-95	0,2	АС-120 и АС-150	0,8

Таким образом, для обеспечения высокой степени надежности, провода воздушных линий должны обладать не только способностью противостоять гололедным и ветровым нагрузкам, значительно превышающим расчетные (т. е. иметь высокий экзп), но и большой абсолютной механической прочностью конструкции. В свете этого положения мы, вопреки мнению авторов, склонны считать, что, например, провода АС-400 и АСИ-400 обеспечат во II районе гололедности более высокую надежность воздушных линий, чем провода АС-150 и АСИ-150, хотя первые, как то видно из табл. 2 рассматриваемой статьи, имеют мень-

шие экзп. Мы не можем также согласиться с выводами авторов, что линии с проводами А-120 и А-150 во II районе климатических условий работают более надежно, чем линии с проводами М-70 и М-95 в IV районе.

Провода марки АСУ с увеличенным стальным сердечником на линиях Советского Союза обычно не применяются, за исключением проводов АСУ-300 и АСУ-400; при этом последние, как правило, используются на линиях 220 кВ и на больших переходах линий 35 кВ и выше. Этой практики использования проводов АСУ мы считаем целесообразным придерживаться и впредь со следующим, однако, ограничением в части линий 220 кВ: на линиях, проходящих в I и II районах климатических условий, допустимо применять провода АС-300 и АС-400 взамен проводов АСУ-300 и АСУ-400.

Сталеалюминиевые провода нормальной прочности (АС) полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым эксплуатацией, с чем согласны и авторы. Серьезной аргументации о необоснованности конструкции проводов марки АС в рассматриваемой статье не приводится. Свои рассуждения о наличии в проводах марки АС (для сечения 95 мм² и выше) значительных, но практически якобы не используемых и поэтому излишних запасов прочности, авторы строят на формалистическом толковании понятия экзп и приходят к выводам, которые находятся в противоречии с опытом эксплуатации воздушных линий.

Можно считать бесспорным, что удельная повреждаемость проводов марки АСИ будет выше удельной повреждаемости проводов марки АС, т. е. замена проводов АС проводами АСИ неминуемо приведет к снижению эксплуатационной надежности воздушных линий. Это снижение надежности нельзя оправдать экономией, получаемой при замене проводов АС проводами АСИ, и составляющей 1...1,5% стоимости сооружения линий.

Приведенные в рассматриваемой статье значения экономии в затратах по сооружению линии и эксплуатационные коэффициенты запаса прочности могут быть получены и без этой замены путем увеличения расчетных тяжелей в проводах, т. е. путем осуществления рекомендаций первой группы предложений, упомянутых в начале настоящей заметки.

Книга „Общая электротехника“

Под ред. проф. С. А. Пресса

(Электричество № 8, 1952 и № 3, 1953)

Доц. А. А. МЕЖЛУМОВ

Азербайджанский политехнический институт

Необходимо согласиться с рецензентом по поводу недостаточной удачной компоновки книги и последовательности распределения материала в ней. Например, понятие о напряжении дается на стр. 30 (§ 1-3), а напряженность поля и потенциал рассматриваются на стр. 83. В книге очень много ссылок на последующее изложение материала, так как сведения по одному и тому же вопросу часто оказываются размещенными в различных главах книги.

По вопросу о методе изложения теории переменных токов необходимо заметить, что для неэлектротехнических специальностей метод векторных диаграмм в сравнении с символическим методом является более доходчивым.

Необходимо отметить, что в курсе общей электротехники раздел по электроприводу введен впервые, его нельзя не приветствовать. Предлагаемое рецензентом определение электропривода как совокупности электродвигателя, аппаратуры управления и исполнительного механизма (рабочей машины), который приводит в действие электродвигателем, неточно, ибо оно совпадает с понятием электрифицированного производственного агрегата. В. К. Попов, А. Т. Голован, Д. П. Морозов и М. Г. Чиликин определяют электропривод как машинное устройство, заключающее в себе электродвигатель, передачу от двигателя к исполнительному механизму и аппаратуру управления электродвигателем. Если даже иметь в виду современную тенденцию органического совмещения электродвигателя

с рабочей машиной, то и в этом случае характер наименования рабочей машины не исчезает. В таком случае, как известно, сложная электромашина получает полное свое наименование в зависимости от того, с какой рабочей машиной срачивается электродвигатель. Например, общеизвестны такие наименования сложных электромаши, как электронасос, электробур и т. д.

По существу изложенного материала об электроприводе можно указать, что при окончательном выборе двигателя предлагается (стр. 461) запас перегрузочной способности двигателя в размере 20% без какого-либо на то обоснования. При выборе мощности двигателя не упоминается значения пускового момента двигателя.

Следует заметить, что при рассмотрении мощности переменного тока нет особой необходимости в разложении мгновенной мощности на три составляющие; достаточно ограничиться двумя составляющими мощности. Вряд ли можно считать удачным выражение „пульсирующая составляющая мощности в активном сопротивлении“ (стр. 146).

В гл. X при рассмотрении способов улучшения коммутации к сожалению ничего не сказано о влиянии щеток на процесс коммутации.

В гл. XIII описывается холостой ход трансформатора, а описание короткого замыкания трансформатора упущено, что затрудняет формулировку условия равенства падений напряжения при параллельной работе трансформаторов одновременно и как условия равенства напряжений короткого замыкания.

К определению ампера—четвертой основной единицы в абсолютной практической системе единиц

(Электричество № 3, 1952, стр. 68—74)

В № 3, 1952 г. были напечатаны статьи А. Я. Егермана и К. М. Поливанова, в которых выдвигался ряд возражений против принятого в проекте абсолютной практической системы единиц определения понятия четвертой основной единицы — ампера. Редакция, поместив указанные статьи, выразила надежду, что продолжение критического рассмотрения поднятых вопросов будет содействовать наилучшей с научной точки зрения формулировке определения понятия ампера.

Ниже публикуются поступившие дополнительно статьи и заметки по данной теме, а также заключительные замечания редакции журнала «Электричество».

Доктор техн. наук, проф. М. Ф. МАЛИКОВ

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Менделеева

Автор статьи «О практической единице меры тока в системе МКСА» А. Я. Егерман, очевидно, не в курсе этого вопроса и не знает, что целью определения единицы является установление ее размера, а вовсе не программа действий по ее осуществлению. В этом отношении определение ампера полностью достигает своей цели и по существу не отличается от определения секунды, которое также устанавливает ее размеры, а не служит программой действия по ее осуществлению, как полагает А. Я. Егерман. Автор же статьи «Определение электрических единиц абсолютной практической системы» К. М. Поливанов принимал деятельное участие в обсуждении вопросов об установлении системы абсолютных электрических и магнитных единиц и в своей статье ничего нового, что не было бы известно раньше, не дал.

Кандидат техн. наук С. В. ГОРБАЦЕВИЧ

Лаборатория образцовых электрических мер ВНИИМ

В лаборатории образцовых электрических мер воспроизводится эталон абсолютного ампера.

Определение единицы тока в абсолютной системе практических единиц должно быть таким, чтобы по возможности точно отразить величину этой единицы (или, по выражению М. Ф. Маликова, размер единицы). При этом нечего бояться того, что в таком определении имеются предельные допущения, так как иначе трудно, а иногда и невозможно создать четкую и ясную теоретическую схему, позволяющую с наибольшей точностью и простотой определить единицу той или иной физической величины.

Если такое определение основывается на конкретных законах, как это и имеет место в случае определения понятия ампера, то оно дает программу действия для установления эталона единицы в том смысле, что тот же закон (в данном случае закон взаимодействия токов) будет служить основой при практическом воспроизведении схем абсолютных измерений.

Если такое определение основывается на конкретных законах, как это и имеет место в случае определения понятия ампера, то оно дает программу действия для установления эталона единицы в том смысле, что тот же закон (в данном случае закон взаимодействия токов) будет служить основой при практическом воспроизведении схем абсолютных измерений.

Правда, на такой практической схеме единица тока воспроизводится приближенно, как это, впрочем, имеет место с результатами любого измерительного процесса, однако нельзя приближенно определять «размер» единицы в абсолютной системе, так как это приведет к спецификации самих единиц и подорвет методологический и практический смысл перехода на абсолютную систему электрических единиц. Этот переход знаменует собой не только установление связи между механическими и электрическими единицами, но ставит всю методикку поддержания единиц электрических величин на более совершенную основу. Именно отсутствие специфицированного определения единицы и дает возможность совершенствовать эталон и приближать величину воспроизводимой единицы к ее теоретическому значению.

Было бы сплошным анахронизмом закрепить определение единицы ампера путем цифр, характеризующих размеры

электродинамической системы токовых весов, величину уравнивающего груза, чувствительность весов, степень постоянства их нулевого положения, температурные коэффициенты каркасов и т. д.

Такое определение было бы слишком грубым вследствие невозможности предельного расчета параметров такой системы.

Ошибочность позиций К. М. Поливанова и А. Я. Егермана заключается в том, что, по их мнению, определение единицы и ее практическое воспроизведение — одно и то же. На самом деле это не так. Приближенность практического воспроизведения единицы не должна мешать ее теоретическому определению, которое дает тот предел, к которому необходимо стремиться при практическом воспроизведении единицы.

Что касается той «схоластики», которая, по мнению А. Я. Егермана, содержится в принятом проекте определения ампера, то, исходя из позиции А. Я. Егермана, следовало бы зачеркнуть всю геометрию идеальных форм, всю статику абсолютно твердого тела и все дифференциальное исчисление, построенное на понятиях бесконечно-малых величин. Равным образом сплошной схолисткой была бы вся совокупность дифференциальных и точечных законов электродинамики, сыгравших громадную роль в развитии научного знания.

Инж. А. А. ЮМАТОВ

Кронштадт

Хотя работники ВНИИМ Комитета по делам мер и измерительных приборов придерживаются иного взгляда, следует признать, что до настоящего времени правильные решения вопроса об определении понятия электрической единицы в системе единиц не было достигнуто. Об этом свидетельствует и самый факт появления критических статей А. Я. Егермана и К. М. Поливанова.

Нам представляется естественным, что без всестороннего обсуждения с привлечением мнения общественности электротехников нельзя было правильно решить вопрос о создании научной системы единиц измерения электрических и магнитных величин. Учитывая замечательные слова И. В. Сталина о том, что никакая наука не может развиваться и преуспевать без борьбы мнений, без свободы критики, полагаю, что обсуждение поднятых в статьях А. Я. Егермана и К. М. Поливанова вопросов принесет делу пользу.

А. Я. Егерман и К. М. Поливанов хорошо показали нереальность определения ампера, данного в системе МКСА. К. М. Поливанов показал, насколько сильно эксперимент расходится с теоретизированным определением ампера, данным в системе МКСА. А. Я. Егерман справедливо обратил внимание на неудовлетворительность такого определения «практической единицы меры тока», при котором нельзя осуществить единицу практически в виде эталона.

В системе МКСА единица электрического тока — ампер определяется иначе, чем в системе МКСМ. В этом отношении система МКСА представляет несомненный прогресс по сравнению с системой МКСМ. Однако проведение настоящей дискуссии свидетельствует о несовершенстве определения ампера, данного и в системе единиц МКСА.

Мы, пожалуй, не ошибемся, если скажем, что большинство электротехников испытывает неудовлетворение формулировкой ампера в системе МКСА. На это собственно и указала редакция журнала „Электричество“, отметив, что „определение понятия ампер вызывает ряд существенных возражений“.

Определение ампера, данное А. Я. Егерманом, лучше, чем в проекте системы МКСА. Однако вызывает возражение примененный в этом определении термин „эталонные проводники“. В определении основной единицы электрического тока — ампера все термины должны быть строго определенными и расшифрованными. Нам представляется, что надо либо расшифровать термин „эталонные проводники“, либо отказаться от него.

Формулировка ампера, предложенная К. М. Поливановым, действительно не содержит ничего нового, а является повторением известной связи между единицами тока в практической системе *м кг сек* и электромагнитной системе *см г сек* (система CGSM). Кроме того, эта формулировка не дает полного представления об единице измерения электрического тока — ампере и поэтому не может быть принята.

В заключение хотел бы остановиться на примененном в проекте выражении „сила тока“. Такой термин должен быть отвергнут и заменен термином „ток“. На протяжении уже нескольких лет в широких кругах передовых советских электротехников, во многих научных и учебных институтах и учебных заведениях, в журнале „Электричество“ и др. не применяют выражения „сила тока“. Попытка возродить такой термин возвращает нас к старому вопросу. ...прибегая к понятию силы, мы, — говорил Ф. Энгельс, — этим выражаем не наше знание, а *недостаточность* нашего знания о природе закона и о способе его действия“ (Ф. Энгельс, Дialeктика природы, стр. 55). „...во всякой области естествознания, даже в механике, делают шаг вперед каждый раз, когда где-нибудь избавляются от слова *«сила»*“ (Ф. Энгельс, Дialeктика природы, стр. 122).

Отвечая прогрессивному движению советских электротехников, направленному на создание более совершенной системы единиц измерения, следует отказаться от выражения „сила тока“ и не применять его в новой системе единиц в формулировке единицы электрического тока — ампера.

Инж. Ю. А. БИРЗВАЛКС

ЦСС Латвэнерго

Возражения, выдвинутые в статье А. Я. Егермана против определения абсолютного ампера, не имеют достаточного обоснования. Следует различать теоретическое определение ампера и практическую методику осуществления эталона ампера; последняя всегда вытекает из первого. Так, например, коэффициенты пропорциональности в формулах, употребляемых при работе с токовыми весами, рассчитаны, исходя из чисто теоретических определений ампера, например при помощи уравнений, похожих на уравнение, приводимое в статье К. М. Поливанова. Поэтому вполне допустимо дать определение ампера в формулировке, разработанной Комитетом по делам мер и измерительных приборов, лишь немного изменив ее.

Так, целесообразно ввести вместо массы и ускорения прямо соответствующую силу, а вместо бесконечно длинных параллельных проводов, может быть, определенные окружности (но опять-таки „идеальные“ окружности, „изготовленные“ из „бесконечно тонкой проволоки“, и т. п.).

Определение такой формы, какую предлагает А. Я. Егерман и поддерживает К. М. Поливанов, по существу являются описанием методики измерений, причем эта методика сама основана на каком-то теоретическом определении ампера (при помощи только мыслимых экспериментов). Оба автора обходят это молчанием.

Может быть, через несколько лет будет изобретено другое устройство для определения ампера по силе взаимодействия токов, еще более точное, чем современные токовые весы; в таком случае пришлось бы опять изменить определение ампера, если бы оно было принято по предложению вышеупомянутых авторов.

Кроме того, необходимо при разработке определения ампера считаться с применимостью определения во всяком рода учебниках.

Ясно, что методика изложения учения об электричестве в ближайшем будущем уже не сможет основываться на устарелой и псевдонаучной системе CGSE, как это имеет место в подавляющем большинстве случаев в настоящее время.

С методической точки зрения система МКСА является более подходящей по сравнению, скажем, с системами CGSE или MKSM. Но для практических целей (и только для таких!) целесообразно ввести в выражениях размерностей электромагнитных величин, кроме массы, длины, времени и тока, еще и напряжение. При этом размерности многих величин становятся более ясными и легко запоминаемыми.

Конечно, всякая величина будет иметь две эквивалентные размерности, например энергия

$$[L^2MT^{-2}] = [IUT];$$

в каждом случае можно употреблять более подходящую из этих размерностей. Практических затруднений от этого не возникает. Для сравнения приведем несколько примеров.

Величина	Размерность единицы в системе МКСА	Размерность единицы в системе МКСА (при введении дополнительно вольты в выражениях размерности)
R	$\frac{M^2 \cdot K^2}{A^2 \cdot C^2 \cdot S^2}$	$\frac{V}{A}$
E	$\frac{M \cdot K^2}{A \cdot C^2 \cdot S^2}$	$\frac{V}{m}$
B	$\frac{K^2}{A \cdot C^2 \cdot S^2}$	$\frac{V \cdot C}{m^2}$
C	$\frac{A^2 \cdot C^2 \cdot S^2}{M^2 \cdot K^2}$	$\frac{A \cdot C}{V}$

Введение вольты по предложению автора отнюдь не должно рассматриваться как введение пятой основной единицы или величины или даже новой системы, а должно служить лишь для упрощения выражений размерностей. Первоисточником этого предложения является система, разработанная в свое время П. Л. Калантаровым.

Все трудности при разработке определения ампера возникают из того, что ампер по существу не является основной единицей, так как он определяется при помощи других единиц. Такое положение имеет место вследствие всем известного исторического развития электромагнитных единиц и их систем.

Доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Оставаясь при прежнем мнении о необходимости заменить предложенное Комитетом по делам мер и измерительных приборов определение ампера, считаю нужным уточнить некоторые из высказанных мной утверждений, так как обсуждение показало, что они понаты неверно. Кроме того, хочу отметить ошибочность предположения Ю. А. Бирзвалкса об устарелости и псевдонаучности системы CGSE.

В большинстве современных научных работ принята симметричная система *см, г, сек*, единицы которой частично совпадают с единицами системы CGSE, а частично — с единицами системы CGSM.

С. В. Горбачевич указывает, что определение ампера основывается на конкретных законах. Именно это мне и кажется необходимым отметить в полном научном определении ампера. Однако в формулировке обсуждаемого проекта отсутствует упоминание конкретного закона, а приводится только одно из его следствий и то в применении к совершенно нереальным условиям, к которым и не стремятся приблизить условия фактического опыта.

В нашем же определении содержится указание на фактическое положение дел (как в действительных условиях определяется ампер в настоящее время) вовсе не с целью, как предполагает С. В. Горбачевич, „закрепить определение единицы ампера путем цифр, характеризующих размеры электродинамической системы токовых весов...“ и т. д. Однако мне представляется крайне желательным документировать фактическое положение современной метрологии. По поводу своего предложения (Электричество № 3, 1952) добавляю в заключение следующее: я предполагал, что определение ампера следует дать в форме пяти отдельных положений (их нумерация по недо-мотру оказалась пропущенной).

Первое положение (первый абзац) — наиболее короткое — говорит только о том, что ампер абсолютный — это одна десятая единицы тока электромагнитной системы *см, г, сек*. В большинстве теоретических курсов достаточно привести один этот первый пункт, для того чтобы ввести практические единицы. Этот пункт мне представляется важным еще потому, что он отражает фактическую историю введения абсолютного ампера.

Второе положение (второй и третий абзацы) отражает положение нашей современной метрологической практики.

ОТ РЕДАКЦИИ

Имевший место обмен мнений нельзя считать полным. Однако высказанные суждения позволяют выработать более удовлетворительное определение по сравнению с принятым в проекте Комитета по делам мер и измерительных приборов. Соответствующая дискуссия может быть продолжена в научных комиссиях Комитета по делам мер и измерительных приборов.

Строго научное определение ампера важно не только в интересах метрологической практики, но и в интересах логически ясного и последовательного введения практических единиц мер в систему определений современной классической электродинамики и теоретических основ электротехники.

К проекту правил устройства электротехнических установок. Проводки шинопроводами

(Электричество № 7, 1952)

Инж. А. А. ЮМАТОВ

2. Кронштадт

Обсуждаемый «проект Правил» является важным документом для широких кругов советских электротехников. Однако следует отметить, что предлагаемый текст «проекта» изложен небрежно; написан плохим языком и читается тяжело, а некоторые параграфы и пункты вовсе непонятны. Например, в § 13 записано: „б) **Защищенный шинопровод**. То же, как п. „а“ и пожароопасных категорий П-2, но при высоте установки более 2,5 м над уровнем пола“. Формулировка малопонятная. Трудно разобраться в подобной записи. Лучше дать такую редакцию: „б) **Защищенный шинопровод**. Устанавливается в тех же помещениях, что и в п. „а“. „Правил“, включая и пожароопасные помещения категории П-2; шинопровод должен устанавливаться на высоте более 2,5 м над уровнем пола“.

В § 24 сказано: „Исключение допускается для ответвлений, обладающих пропускной способностью не менее половины пропускной способности защищенного участка шинопровода, которые могут присоединяться к шинопроводу лишь помощью развешивающего аппарата“. В этом тоже трудно разобраться.

В § 32 в п. б) вместо слов „в отступление от указаний п. „а“ при необходимости могут быть допущены...“ следует поставить одно слово „допускаются“.

В § 32 и 35 дается ссылка на „нормальную среду“, но без пояснений, что следует понимать под „нормальной средой“. В § 13 имеется указание на помещения с „повышенным содержанием пыли в воздухе“, но также нет пояснений, какие помещения следует относить к этой категории.

В § 50 следует разъяснить, что надо понимать под „мертвой зоной“ крана.

Третье положение (четвертый и пятый абзацы) близко к определению, принятому в проекте Комитета по делам мер и измерительных приборов. Однако в нем говорится не о невыполнимых бесконечно тонких проводах, а о предположениях, при которых такое определение могло бы оказаться применимым.

Первые три (указанные выше) положения вполне общедоступны и свободно могут быть включены в наши учебники физики для средней школы. Эти три положения дают учащимся достаточно полное определение абсолютного ампера.

Положения четвертое и пятое (предпоследний и последний абзацы) соответствуют требованиям, указываемым С. В. Горбачевичем — они дают „программу действия для установления эталона единицы“. Первое из них выражает тот дифференциальный закон, интегральные следствия которого служат основанием для проведения всех возможных опытных установлений ампера, в том числе и опытов с электродинамическими весами. Последнее (пятое) положение еще раз подчеркивает общий характер определения абсолютного ампера и его независимость от конкретных условий проведения эксперимента, указанного во втором положении.

В § 8 в определении „пыленепроницаемого шинопровода“ остается непонятным сказанное про контакты, которые „в условиях нормальной эксплуатации хорошо закрыты“ и одновременно „могут быть без специальных приспособлений доступны для обдува и чистки“. Трудно представить себе такие контакты, которые и закрыты, и одновременно доступны для чистки.

В § 27 говорится об ответвлениях от „шинопроводов малой мощности (до 100 а)*“. В скобках следует сослаться не на ток, а на мощность.

„Правила“ требуют более строгого отношения к терминологии, чего, к сожалению, нет.

Ограничимся некоторыми замечаниями.

Устройство, ограждающее шинопровод от внешней среды, в разных пунктах «проекта Правил» названо: кожухом, корпусом и коробом. Такое различное наименование одного и того же элемента является недостатком. Надо везде сохранить только одно наименование. По нашему мнению, наиболее правильно ограждение шинопровода называть **кожухом**.

Излишним является применение иностранного слова „ревизия“ вместо более подходящего здесь русского слова „осмотр“.

В тексте применен жаргонный термин „врубить“ (§ 11) вместо термина „включать“.

Сохранен старый термин „сила тока“, который должен быть заменен термином „ток“ или, где это необходимо „величина тока“.

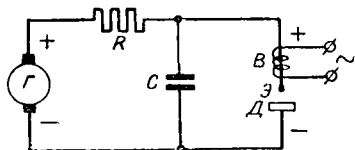
К числу вновь вводимых в «проект Правил» неудачных терминов относятся: „агрессивность среды“ (§ 30), „инструктированный персонал“ (§ 16) и „технологическое оборудование“ (§ 17, 35 и 50).

Сказанного вполне достаточно, чтобы прийти к выводу о необходимости существенной редакционной переработки текста «проекта Правил».

ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И УПРОЧНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

Один из ремонтно-механических заводов Главвостлеса освоил ремонт электроискровым способом ряда деталей автомобилей и тракторов: валов коробки передач и ведущей конической шестерни, шеек под подшипники, толкателей, клапанов и т. д.

Электроискровой способ можно применять и при изготовлении новых деталей, для исправления брака и упрочнения поверхности, а также для наплавки твердых сплавов на рабочие части металлорежущего инструмента.



Такой способ обработки основан на принципе электроэрозии. Мгновенный разряд предварительно сконцентрированной электрической энергии приводит к тому, что материал направленно выбрасывается из электродов и переносится на деталь.

Электрическая схема электроискрового аппарата приведена на рисунке. Зарядный контур состоит из источника тока G , буферного сопротивления R и конденсатора C , поддерживающего и восстанавливающего разряд определенного напряжения. Разрядный контур имеет тот же конденсатор C , электродержатель вибратора B и электрод $Э$. Электрический вибратор питается от сети переменного тока. Отрицательный полюс электрической цепи разрядного контура подключают к обрабатываемой детали $Д$, а положительный — к электроду.

Мощность установки для электроискрового упрочнения инструмента — около 0,7 квт.

Электроискровой способ дает значительную экономию трудовых затрат, что и показано в статье.

Широкое распространение электроискрового способа дает возможность снизить стоимость, повысить качество ремонта, увеличить стойкость инструмента и сэкономить большое количество твердых сплавов.

(Лесная промышленность, стр. 12, № 8, 1952, П. С. Клавич и М. С. Лебедевский)

НОВОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМОБИЛЯ „МОСКВИЧ“

НИИ Автоприборов совместно с заводом АТЭ-1 разработало новое электрооборудование для автомобиля „Москвич“ — генератор постоянного тока Г-29 с параллельным возбуждением и малогабаритный реле-регулятор.

Это оборудование заменит применявшийся трехщеточный генератор Г-28, что позволит повысить срок службы аккумулятора в 2...2,5 раза и увеличить пробег автомобиля до замены щеток генератора с 15...20 до 30...50 тыс. км.

Новый генератор Г-29 представляет собой двухполюсную электрическую машину параллельного возбуждения, предназначенную для работы с одноступенчатым реле-регулятором и имеющую нижеследующие технические данные: номинальная мощность 130 вт; номинальное напряжение 6,5 в, номинальный ток нагрузки 20 а; вес 7,4 кг и габаритные размеры по длине 255 мм и диаметр 100 мм. Для улучшения охлаждения применен вентилятор, расположенный на шкиве. Электрографитовые щетки марки ЭГ-13 обеспечивают длительный срок службы генератора.

Ограничение тока, отдаваемого генератором, производится в новом реле-регуляторе последовательной обмоткой регулятора напряжения. Новая конструкция контактно-колебательной системы дает хорошую и устойчивую работу регулятора напряжения. Реле обратного тока имеет одну пару серебряных контактов.

Основные данные реле-регулятора РР29: номинальное напряжение 6,5 в, номинальный ток 20 а, вес 1,1 кг. Габаритные размеры по длине 130 мм, ширине — 91 мм и высоте — 76 мм. Электрические параметры реле-регулятора в холодном состоянии при температуре окружающего воздуха 20°С: напряжение включения реле 6,0...6,5 в и обратный ток реле 0,5...5,0 а. Напряжение, поддерживаемое генератором (3000 об/мин): при $I_{нагр} = 0$ не более 8,0 в и при $I_{нагр} = 20$ а 6,2...6,8 в. Диапазон скорости вращения якоря генератора составляет 1300...7000 об/мин.

Новый комплект электрооборудования принят на серийное производство, так как эксплуатационные испытания на автомобиле „Москвич“ прошли успешно.

(Автомобильная и тракторная промышленность, № 9, 1952, Л. В. Копылов)

АВТОМАТ ДЛЯ ЗАКАТКИ КОРПУСОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ И ТРАКТОРНЫХ ФАР

На заводе „Красный Октябрь“ при изготовлении корпусов автомобильных и тракторных фар форма передней части образуется методом закатки. Закатка производится по одному корпусу системой двух роликов.

НИИ Автоприборов разработал и внедрил в производство специальный автомат для механизации этой трудоемкой работы. Цикл изготовления одной детали — 7 сек; время закатки одного корпуса — 3,5 сек. Для привода автомата использован электродвигатель мощности 4,5 квт.

Использование автомата увеличивает производительность труда в 5 раз при значительном облегчении условий труда.

(Автомобильная и тракторная промышленность, № 10, 1952, П. И. Ковалев)

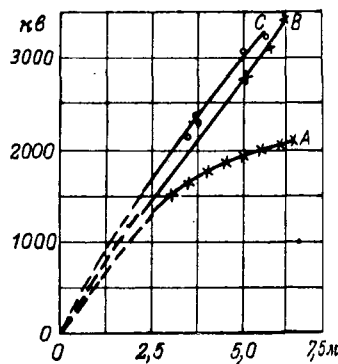
ЗА РУБЕЖОМ

РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ПРОМЕЖУТКОВ ПРИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЕ И ПРИ ИМПУЛЬСАХ

Измерения при промышленной частоте производились при помощи последовательно соединенных (по схеме каскада) пяти испытательных трансформаторов. Каждый трансформатор был изолирован на 350 кв. Рабочее напряжение всей испытательной установки 1360 кв. Исследования характеристик больших промежутков размером до 6,6 м между электродами стержень—стержень производилось при частоте 60 гц.

На рисунке показана экспериментально полученная зависимость (кривая А) разрядных напряжений от расстояний между электродами при частоте 60 гц.

Как видно из рисунка, при расстояниях между электродами около 3,8 м наступает резкое изменение крутизны характеристики разрядного напряжения, развивавшейся до этого прямолинейно. Это явление, которое до сих пор при измерениях, проводившихся при меньших расстояниях между



Зависимость разрядных напряжений от расстояний между электродами. А — при частоте 60 гц; В — при импульсах и положительной полярности; С — при импульсах и отрицательной полярности волны. Сплошные линии — экспериментальные величины; пунктирные — величины, нормированные в стандарте США.

электродами, не наблюдалось, объясняется процессом развития короны в промежутке между стержнями. При напряжении до 1000 кВ электроды были охвачены светящимся чехлом. Дальнейшее повышение напряжения вызвало быстрое нарастание тока, свечение усиливалось, после чего наблюдались сильные кистевые разряды.

Как показали измерения, средний разрядный градиент изменялся в пределах от 600 кВ/м при длине промежутка в 25,4 см до 300 кВ/м при промежутке 6,35 м.

Для испытаний импульсным напряжением применялся генератор импульсов с номинальным напряжением 5100 кВ. Наибольшая амплитуда при волне 3×50 мксек, полученная от этого генератора, достигала 3400 кВ.

Это напряжение оказалось достаточным для получения показанной на рисунке (кривые В и С) экспериментальной зависимости импульсного разрядного напряжения стержневых электродов, находящихся на расстоянии 6,35 м друг от друга. Кривая В была снята при волне положительной полярности, кривая С при волне отрицательной полярности.

В отличие от измерений при промышленной частоте, как видно из рисунка, характеристики больших промежутков при импульсах оказались прямолинейными. При этом разрядные градиенты при волне положительной полярности изменялись в пределах от 770 кВ/м при промежутке в 25,4 см до 550 кВ/м при промежутке 6,35 м.

Авторы указывают, что линейная зависимость наблюдается при расстояниях между электродами в пределах до 15 м.

На основании произведенных исследований высказывается предположение о том, что при расстояниях между электродами больше 15 м должно наступить значительное снижение разрядных градиентов и характеристика импульсного разрядного напряжения аналогично характеристике при промышленной частоте изменит свой наклон и перестанет быть прямолинейной. Это обстоятельство существенно для определения разрядных расстояний на длинных пролетах линий электропередачи.

(El. Eng. № 4, 1952 J. H. Hagenguth, A. F. Rohlf, W. J. Deguan)

Инж. А. Н. ШЕРЕНЦИС

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В течение ряда лет для исследования материалов успешно применяются ультразвуковые методы испытания, основанные на применении звуковых волн сверхвысокой частоты. Сравнительно широкое применение эти методы нашли главным образом в металлургической промышленности для испытания металлов с целью обнаружения в них скрытых дефектов. В последнее время проведены исследования, посвященные использованию этих методов для целей испытания электроизоляционных изделий и материалов, в первую очередь керамических.

Принципиально ультразвуковые методы испытаний можно разделить на три основные группы: методы „прозвучивания“, резонансные методы и импульсные методы. Для выбора того или иного метода ультразвукового испытания решающее значение имеет конфигурация и состояние поверхности испытываемых образцов. Методы, относящиеся к первым двум группам, требуют параллельности стенок испытываемых образцов, в то время как импульсные методы применимы при любой форме изделий, в том числе и цилиндрической. Таким образом, этот метод является наиболее подходящим для испытания, например, керамических изоляторов.

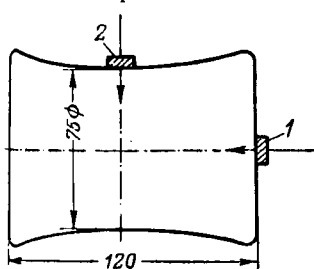


Рис. 1. Испытуемый образец фарфора при продольном и поперечном прозвучивании.

1 — кварцевая головка при продольном прозвучивании; 2 — то же, при поперечном прозвучивании.

Принцип такого испытания заключается в следующем. К изолятору прикладывается кварцевая головка, генерирующая ультразвуковые колебания с частотой порядка 0,5...5 мГц в виде кратковременного импульса. Этот импульс проникает через изолятор, отражается от задней стенки и воспринимается той же кварцевой головкой, служащей, таким образом, как в качестве датчика, так и в качестве приемника ультразвуковых волн. Принятая головкой отраженная волна воспроизводится на экране катодного осциллографа. Эти отражения продолжают до тех пор, пока материал не поглотит всю звуковую энергию.

Если в изоляторе имеются структурные дефекты (трещины, пустоты, раковины и т. п.), то звуковой импульс, отражаясь от этих мест (ультразвуковые волны не проходят через воздух и пустоты), приводит к появлению на экране добавочных отраженных импульсов, расположенных между посылаемым импульсом и импульсом, отраженным от задней стенки образца. При этом отраженный от задней стенки импульс имеет пониженную амплитуду вследствие уменьшения звуковой энергии. Исходя из скорости распространения ультразвука в испытуемом материале, можно точно определить месторасположение дефекта. Чувствительность ультразвуковых измерений достаточно велика, чтобы определить дефектные места, сечение которых не менее 1 мм².

Ультразвуковые испытания позволяют также выявить изоляторы с повышенной пористостью. Это оказывается возможным благодаря тому, что в таком изоляторе наблюдается снижение скорости распространения ультразвуковых волн и повышение поглощения звуковой энергии по сравнению с нормально обожженным изолятором. Таким образом, при испытании изолятора с повышенной пористостью отраженные импульсы будут, во-первых, запаздывать по сравнению с нормальным изолятором и, во-вторых, будут иметь пониженную амплитуду. При очень большой пористости поглощение материалом звуковой энергии может оказаться настолько большим, что на экране будут вообще отсутствовать импульсы, отраженные от задней стенки.

На рис. 1 показана форма и размеры подвергнутых ультразвуковым испытаниям образцов изоляторного фарфора, „прозвучивание“ которых производилось как в продольном, так и в поперечном направлениях при частоте 4 мГц. На рис. 2, 3 и 4 приведены образцы полученных осциллограмм.

Осциллограммы рис. 2 и 3 соответствуют фарфору с нормальной пористостью. Эти осциллограммы позволяют, исходя из расстояния между переданным импульсом Π и первым отраженным от задней стенки импульсом O_1 , установить скорость распространения ультразвуковых волн в фарфоре, равной 5500 м/сек. В то же время у фарфора с повышенной пористостью эта скорость снижается до 4350 м/сек, что следует из резкого увеличения расстояния между переданным и отраженным импульсами (рис. 4). Уменьшению скорости распространения соответствует повышенное поглощение звуковой энергии и, следовательно, уменьшение амплитуды отраженных от задней стенки импульсов, что ясно видно из сравнения осциллограмм рис. 4 с осциллограммами рис. 2 и 3а.

Сравнение испытываемого образца рис. 3, имеющего нормальную пористость, с образцом рис. 2 показывает, что при его „прозвучивании“ в продольном направлении

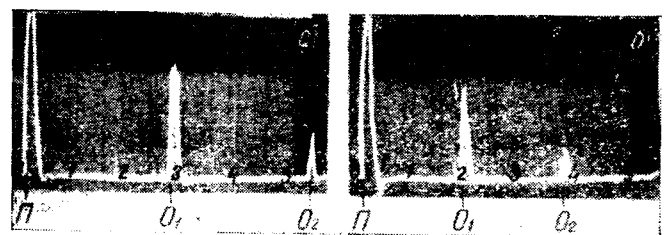


Рис. 2. Прозвучивание фарфорового образца без дефектов. а — продольное прозвучивание; б — поперечное прозвучивание; П — передаваемый импульс, O_1 и O_2 — отраженные от задней стенки импульсы.

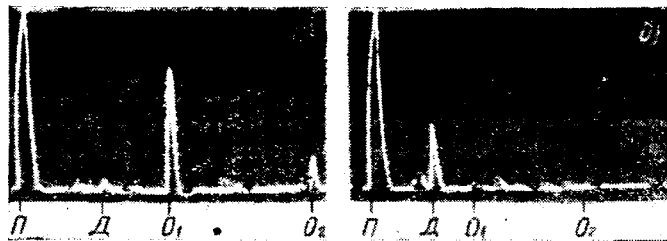


Рис. 3. Прозвучивание фарфорового образца с раковинами. а — продольное прозвучивание; б — поперечное прозвучивание; П — передаваемый импульс, O_1 и O_2 — отраженные от задней стенки импульсы, Д — добавочный импульс, отраженный от дефектного места (раковина).

возникает дополнительное отражение Д (рис. 3,а), состоящее из нескольких колебаний малой амплитуды. При поперечном прозвучивании этого образца обнаруживается существенный дефект в виде крупной усадочной раковины (рис. 3,б).

Из осциллограммы следует, что раковина расположена примерно в середине испытуемого объекта; большая амплитуда отраженного от дефектного места импульса Д привела к тому, что ультразвуковая энергия, отраженная от задней стенки, чрезвычайно мала и соответствующие отраженные импульсы O_1 и O_2 едва различимы (рис. 3,б). Месторасположение дефектных мест в продольном и поперечном направлениях можно точно

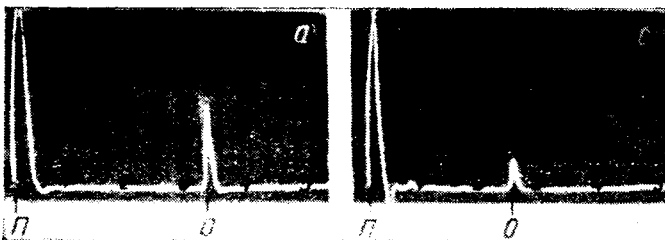


Рис. 4. Прозвучивание фарфорового образца с повышенной пористостью.

а — продольное прозвучивание; б — поперечное прозвучивание; П — передаваемый импульс; О — отраженный от задней стенки импульс.

определить по градуированной шкале. Если к тому же произвести сравнение амплитуд отраженных от дефектных мест импульсов при различных местах приложения кварцевой головки, то возможно точное выявление дефектов по величине и расположению.

Указанным методом было произведено испытание нескольких тысяч изоляторов. Во всех случаях, когда при ультразвуковом испытании обнаруживался дефект внутри изолятора, последующее его разрушение и осмотр полностью подтверждали полученные при испытании результаты.

Проведенные исследования показывают, что ультразвуковые испытания являются ценным средством, позволяющим обнаружить дефекты не разрушая изоляторы. Применение этих методов испытаний, несомненно, окажется полезным и в других областях электротехники.

Литература

1. G. Revery. ETZ, № 14 стр. 451, изд. А, 1952.
2. H. Barthelt, A. Lutsch. Siemens—Z., № 3, стр. 141, т. 26, 1952.
3. O. Rüdiger. Masch.—Schaden, стр. 29, т. 24, 1951.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

ИНДУКТИВНОЕ ВЛИЯНИЕ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Заземление нулевой точки сети 220 кВ Рурской области заострило вопрос о влиянии такой системы на линии связи. На одной из высоковольтных линий были произведены поэтому соответствующие исследования.

Для измерений был выбран участок железнодорожной линии связи, смонтированной на обычном расстоянии от полотна железной дороги (рисунк).

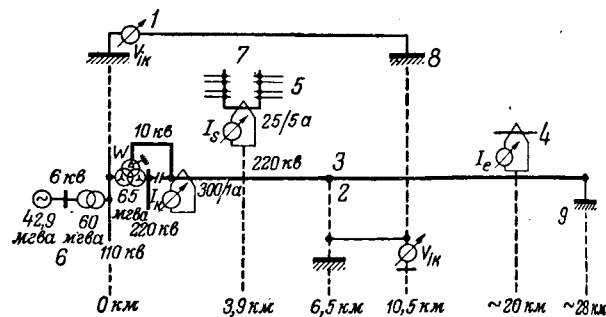


Схема опытного участка.

1 — железнодорожная линия связи; 2 — линия связи почтово-телеграфного ведомства; 3 — линия передачи трехфазного тока 220 кВ; 4 — защитный трос; 5 — рельсовые пути; 6 — электростанция Иббенбюрен; 7 — при подходе к станции Лагенбек; 8 — станция Вельпе; 9 — станция Люстринген.

Линия передачи 220 кВ, отходящая от электростанции Иббенбюрен, на протяжении первых полуторакилометров проходит параллельно железной дороге на среднем расстоянии 300 м. Далее она пересекает железнодорожную линию и идет параллельно ей на расстоянии около 100 м еще на протяжении 2 км. На дальнейших 10 км линия передачи проходит от железной дороги на среднем расстоянии порядка 850 м. Затем расстояние между линией передачи и железной дорогой быстро возрастает.

Как видно из схемы рисунка, на протяжении 4 км параллельно железнодорожной линии связи проходит линия почтово-телеграфного ведомства.

При производстве измерений один из агрегатов электростанции питал участок линии передачи через обмотку трансформатора 10 кВ. Одна фаза линии передачи была заземлена на электростанции, вторая — в 28 км от нее, вблизи подстанции Люстринген. Получившаяся петля нагружалась от агрегата током до 400 а. Измерялись во время опыта ток короткого замыкания на электростанции, индуктированное напряжение в линиях связи, сумма токов в рельсах железной дороги около станции Лагенбек и ток в защитном тросе.

Результаты некоторых измерений сведены в таблицу

№ измерения	Ток в линии передачи, а		Ток в рельсах		Индуктированное напряжение в линиях связи			
	Ток в линии передачи, а		Ток в рельсах		железнодорожной		почтово-телеграфного	
	а	% от тока линии	а	% от тока линии	измеренное, в	расчетное на т. к. з. 335 а, в	измеренное, в	расчетное на т. к. з. 335 а, в
2	90	—	—	—	9,0	336	—	—
3	210	20	9,5	—	21,0	336	5	79
4	270	28	10,6	—	26,3	329	9	112,3
5	230	18	7,8	—	23,2	338	6	87,5
7	409	28	6,9	—	40,0	328	11	90,4
10	110	—	5,5	5,0	11,2	341	—	—
11	218	—	12,0	5,5	21,5	331	—	—
В среднем		8,7	—	5,25	—	334	—	89

Примечание. Расчетное индуктированное напряжение при токе в линии 335 а равно: в железнодорожной линии связи — 861 в, в линии связи почтово-телеграфного ведомства — 203 в.

Измеренное индуктированное напряжение в линиях связи составляет только 40...45% расчетного (расчет производился при средней проводимости грунта $200 \frac{1}{\text{мком см}}$ и защитном коэффициенте рельсов 0,8). Большая разница между измеренными и расчетными величинами объясняется, с одной стороны, повышенной проводимостью грунта в день измерений из-за предшествующих дождей, с другой стороны, общим малым сопротивлением грунта вследствие наличия мощных и протяженных пластов угля.

В условиях измерения можно было ожидать хорошего защитного коэффициента рельсов. На электростанцию, где была заземлена одна фаза, продолжена железнодорожная ветка. Главная часть тока замыкания на землю в районе электростанции распространялась по рельсам этой ветки, повышая их компенсирующее действие как раз в районе большего сближения. На линии почтово-телеграфного ведомства, которая попадает в сферу влияния дальше от электростанции, компенсирующее действие рельсового тока сказывается меньше.

Если распространить процентное отношение тока в рельсах, указанное в таблице, на всю длину линии связи, то индуктированное напряжение от рельсов должно было бы составить 50 в/км, т. е. равняться для железнодорожной

линии связи 525 в и для линии почтово-телеграфного ведомства—200 в. Расчетное индуктированное напряжение при отсутствии рельсов составило бы для первой линии $861 : 0,8 = 1\,080$ в и для второй $203 : 0,8 = 254$ в, и результирующие напряжения должны были равняться соответственно 555 и 54 в.

Измерения в целом показали, что в данном случае нет необходимости прибегать к дорогостоящим защитным мероприятиям.

Измерения выявили, что при заземленном нуле и наличии железнодорожного пути на территории электростанции опасность индуктивного воздействия на линии связи, проходящие вдоль железной дороги, значительно меньше, чем это определяется обычным расчетом. Однако измерения не позволяют рекомендовать какой-либо защитный коэффициент, так как все же не представляется возможным учесть в расчете все факторы, в особенности значительные изменения тока вдоль рельсов.

При проектировании сближений, при которых можно ожидать значительного снижения индуктированного напряжения против расчетного, рекомендуется поэтому производить предварительные измерения.

(Electrotechnische Zeitschrift, стр. 477, № 15, 1952, R. Buckel и др.)

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВОГО КОНТАКТНОГО ПРОВОДА

В некоторых городах сталеалюминиевая сеть осталась в военное время, в других—были специально оборудо-

ваны опытные участки. Основные результаты двухлетних наблюдений приведены в таблице.

Средний удельный износ контактных проводов на опытных участках

Участок	Тип тяги	Тип контактного провода	Удельный износ провода в мм ² на 10 000 проездов токоприемника		Примечание
			средний	наибольший	
А. Сталеалюминиевый провод					
Столярзовице I	Трамвай	Военного времени	1,425	3,16	—
Горзув I	"	То же	0,745	1,19	—
Горзув II	"	"	1,172	2,09	—
Столярзовице II	"	T-80/173	0,801	2,41	—
Гдыня	Троллейбус	T-80/173	Около 0,01	0,05	Отрицательный полюс Средняя величина для обоих полюсов
Варшава	"	T-80/173	0,120	0,586	
Б. Медный провод					
Гдыня	Троллейбус	80 мм ²	0,109	0,448	Положительный полюс Рядом со сталеалюминиевым проводом Перед сталеалюминиевым проводом За сталеалюминиевым проводом
Варшава I	"	80 "	0,498	1,309	
Варшава II	"	80 "	0,416	0,545	
Варшава III	"	80 "	0,560	1,875	

Как видно из таблицы, применение сталеалюминиевого провода в трамвайных и троллейбусных контактных сетях вполне целесообразно; предполагается поставить опыты по

применению его на электрифицированных железных дорогах.

(Przegląd Elektrotechniczny, № 1, стр. 43, 1952 J. O. Wyniki.)

Н. А.



Профессор Н. А. Карякин

К 50-летию со дня рождения

25 ноября 1952 г. исполнилось 50 лет со дня рождения известного советского прожекториста, лауреата Сталинской премии, доктора технических наук, профессора Николая Алексеевича Карякина.

С 1917 г. Н. А. Карякин начал работать на Машиностроительном заводе им. Калинина. Одновременно он учился на вечернем отделении рабочего факультета Московского государственного университета. В 1929 г. он окончил Электротехнический факультет МВТУ.

Еще до окончания МВТУ Н. А. Карякин с 1926 г. приступил к работе в фотометрической лаборатории Государственного экспериментального электротехнического института (ныне ВЭИ им. Ленина). Вся дальнейшая деятельность Николая Алексеевича тесно связана с развитием советской светотехники и особенно прожекторостроения. По инициативе и под руководством Н. А. Карякина во Всесоюзном электротехническом институте им. Ленина была создана специализированная прожекторная лаборатория.

Применив и развив метод элементарных отображений, предложенный выдающимся русским электротехником конца XIX в. В. Н. Чиколевым, Н. А. Карякин разработал стройную теорию формирования световых пучков для всех возможных светооптических систем. Работы Николая Алексеевича в этой области широко известны советским светотехникам и послужили надежной основой для расчета и конструирования прожекторов различных типов в нашей промышленности. Большое значение имеют его работы в области расчета линзовой оптики, в том числе и прессованных линз.

Многочисленные исследования Н. А. Карякина по электрическим дуговым лампам с угольным электродом раскрыли физический смысл эффекта дуги высокой интенсивности и показали ошибочность теорий ряда зарубежных ученых. Н. А. Карякиным по этим вопросам были написаны статьи в журнале «Электричество». Его монография «Угольная дуга высокой интенсивности» является капитальным трудом в этой области техники.



Помимо разработки теоретических вопросов по дуговым лампам, Н. А. Карякин создал серию прожекторных углей высокой интенсивности на различную мощность, которые по своим электрическим и световым характеристикам значительно превосходят применявшиеся раньше прожекторные угли. За разработку и освоение производства новых прожекторных углей высокой интенсивности Н. А. Карякину в 1946 г. была присуждена Сталинская премия.

В Научно-исследовательском кинофотоинституте Н. А. Карякин работает в области светотехники кинопроизводства, которая получила большое развитие после перехода на цветное кино.

Наряду с научной работой Николай Алексеевич ведет большую педагогическую работу. С 1931 г. он является руководителем прожекторной специализации в МЭИ им. Молотова, где читает основной курс по теории прожекторов. Им написан фундаментальный курс по теории и расчету прожекторов.

За годы плодотворной научной и педагогической деятельности Николаем Алексеевичем Карякиным создана школа советских прожектористов и дано основное направление в развитии прожекторостроения. Ряд его учеников занимает руководящие посты в прожекторной промышленности и в научно-исследовательских организациях.

Н. А. Карякин принимает активное участие в научно-общественной жизни в качестве члена президиума Светотехнической комиссии Академии наук СССР и ВНИТОЗ.

В 1951 г. при организации Всесоюзного научно-исследовательского светотехнического института Н. А. Карякин был назначен на должность заместителя директора института по научной части.

Плодотворная научная деятельность Н. А. Карякина высоко оценена Правительством: он награжден орденом Ленина и орденом Трудового Красного Знамени.

М. Г. МАЛЬГИЦ, В. В. МЕШКОВ, В. В. КУЗНЕЦОВ



В. К. Крапивин

К 60-летию со дня рождения и 30-летию инженерной и научно-педагогической деятельности

Вадим Константинович Крапивин родился 29 (17) ноября 1892 г. в г. Петербурге. Закончив гимназию, он в 1911 г. поступил в Петербургский политехнический институт. Участие в первой мировой и гражданской войне помешало его обучению, и Ленинградский политехнический институт им был окончен лишь в 1924 г.

Еще будучи студентом В. К. Крапивин занялся разработкой теории и конструкции металлических ртутных выпрямителей. Его дипломный проект лег в основу производства первого советского металлического ртутного выпрямителя.

В 1924 г. В. К. Крапивин приступил к организации производства мощных металлических ртутных выпрямителей на заводе Электросила и с тех пор непрерывно руководит развитием этой новой области электротехники на заводе Электросила, на заводе Уралэлектроаппарат и во Всесоюзном ордена Ленина электротехническом институте им. Ленина.

За 30-летний период В. К. Крапивиным создано и внедрено большое число оригинальных конструкций ртутных



выпрямителей и аппаратов к ним. Созданные им ртутные выпрямители успешно работают во всех областях народного хозяйства.

Одновременно с инженерной деятельностью В. К. Крапивин вел педагогическую работу в Ленинградском политехническом институте, в 1940 г. ему было присвоено ученое звание доцента.

За 30 лет неутомимой инженерной, научной и педагогической деятельности в области ртутных выпрямителей В. К. Крапивин вырастил многочисленные кадры ученых, исследователей, производственников, монтажников и эксплуатационников для этой молодой отрасли электротехники.

Правительство высоко оценило научную и инженерную деятельность

В. К. Крапивина, наградив его в 1944 г. орденом «Трудового Красного Знамени». В 1952 г. В. К. Крапивину присуждена Сталинская премия.

Группа работников завода Уралэлектроаппарат и Всесоюзного ордена Ленина

электротехнического института им. Ленина



Совещание по электромобилям

22 октября 1952 г. Автомобильная лаборатория Института машиноведения Академии наук СССР провела совещание по аккумуляторным автомобилям (электромобилям). В совещании приняли участие представители Научно-исследовательского автомобильного института (НАМИ), Академии коммунального хозяйства им. Памфилова, ВНИТО ГЭТ, Московского авто-механического института (МАМИ), Мосгорисполкома, Управления троллейбусного транспорта Мосгорисполкома, Ленинградского почтамта и др.

Открывая совещание, акад. Е. А. Чудаков отметил огромное значение развития на основе директив XIX съезда КПСС энергетической базы СССР и указал на широкие возможности, открывающиеся в связи с этим для использования электрической энергии. Дешевая электроэнергия обеспечит широкое ее использование в разнообразных отраслях народного хозяйства и транспорта, открывая, в частности, огромные перспективы для развития электромобильного транспорта.

Инж. А. С. Резников (НАМИ) в докладе «Перспективы типажа электрических автомобилей (электромобилей)» указал, в частности, что применение щелочных аккумуляторов позволяет увеличить запас хода электромобиля с доведением его до 120—140 км на одну зарядку при одновременном снижении стоимости перевозок на 20—25%. В докладе были рассмотрены основы разработанной НАМИ серии электромобилей для грузовых перевозок и коммунального обслуживания.

В докладе «Типаж электромобильных двигателей и выбор рациональной системы управления электромобилями» инж. Д. Г. Поляк (НАМИ) предложил наиболее целесообразную шкалу мощностей электродвигателей последовательного возбуждения быстрого исполнения для электромобилей и обосновал целесообразность для их питания градиацию на-

пряжений. В целях повышения срока службы и стабильности эксплуатации докладчик рекомендовал применение тяговых двигателей закрытого исполнения. Докладчик подробно рассмотрел системы управления электромобилями, отметив возможность использования для грузовых электромобилей малоступенчатой системы управления с обязательным применением ножного привода, установив области применения систем прямого, смешанного и косвенного управления тяговыми двигателями.

Интересные результаты эксплуатации электромобилей были изложены в докладе инж. И. И. Александрова (автобаза Ленинградского почтамта) «Опыт эксплуатации электромобилей для почтовых перевозок», в котором были подведены итоги девяти-месячной эксплуатации отечественных электромобилей ЛАЗ-НАМИ в системе Ленинградского почтамта. Опытная эксплуатация электромобилей подтвердила полную целесообразность использования их для почтовых перевозок.

В прениях по докладам кандидат техн. наук, доц. С. П. Баников (МАМИ) остановился на вопросах снижения общего веса электромобилей, высказав точку зрения о невозможности рассчитывать на значительное снижение весовых показателей аккумуляторов существующих типов, и обратил внимание на необходимость дальнейшего использования достижений науки в части изыскания новых передвижных источников электрической энергии. Кандидат техн. наук Ю. М. Галонен (Академия коммунального хозяйства им. Памфилова) отметил заслуги русских ученых в создании, на заре развития электротехники, первых тяговых электродвигателей и подчеркнул важную роль внедрения электромобильного транспорта в больших городах с целью освобождения воздуха от выхлопных газов. Рассматривая типаж электромобилей, необходимо предусмотреть также создание специализированных электромобилей для обслуживания внутриколхозных перевозок. В целях

увеличения запаса хода электромобилей их следует оборудовать сменными аккумуляторными батареями с устройствами для их механизированной установки. Необходимо снабдить электромобили электродвигателями смешанного возбуждения, обеспечивающими возможность рекуперации электроэнергии для подзаряда. Особое внимание должно быть уделено разработке экономических систем управления тяговых двигателей с безреостатным пуском. Кандидат техн. наук В. Л. Марковников (докторантура Академии наук СССР) остановился на возможностях применения электромобилей смешанного питания для городских и коммунальных перевозок. Необходимо разработать электромобиль для коммунального обслуживания: снегоуборочные машины, мусоровозы, поливочные машины. Следует использовать для электромобилей большей грузоподъемности стандартные детали автомобилей меньшей грузоподъемности. Кандидат техн. наук инж.-полковник Ю. М. Галкин констатировал, что развитие электромобильного транспорта зависит в конечном итоге от наличия рентабельной аккумуляторной батареи. Для повышения надежности и снижения стоимости электромобильных перевозок необходим переход на щелочные аккумуляторы. В целях улучшения свойств эксплуатации электромобилей желательны увеличение скорости движения и снижение мертвого веса электромобиля. Для электромобиля (не могущего заменить автомобильный транспорт) следует уточнить области наиболее эффективного применения. Применение электромобилей в больших городах относительно ограничено; следует обратить внимание на целесообразность использования электромобилей в городах среднего размера, обладающих достаточными резервами электроэнергии.

Подводя итоги совещания, акад. Е. А. Чудаков указал, что надо поставить опытную эксплуатацию электромобилей таким образом, чтобы иметь возможность систематизировать материалы и обобщить результаты эксплуатации. До получения исчерпывающих данных по опыту эксплуатации различных типов электромобилей преждевременно говорить об окончательном установлении типажа электромобилей. Безусловно, следует указать на необходимость движения вперед в части совершенствования конструкций и оборудования электромобилей. Не следует стараться

внедрить электромобиль всюду, где это только возможно. Надо стремиться к более широкому использованию электромобиля в свойственных ему областях, особенно в больших городах, что будет способствовать очищению воздуха городов. До использования электромобилей в колхозах в свое время дело, несомненно, дойдет, но не это является ближайшей задачей. Особое внимание должно быть уделено увеличению запаса хода электромобиля, как здесь предлагалось, путем применения в эксплуатации сменных аккумуляторов батарей с соответствующими механизированными устройствами для их быстрой замены. Применение аккумуляторов энергии в маховике известно давно: можно, например, накапливать кинетическую энергию в маховике при торможении автомобиля. Однако применение гироскопов для городского транспорта никак не может быть поставлено наряду с электромобильным транспортом, имеющим широкие возможности и все предпосылки для своего развития. Нужно поставить перед учеными задачу: дать практическое решение для применения на электротранспорте схем превращения химической или тепловой энергии непосредственно в электрическую. Существенное снижение веса электромобилей может быть обеспечено путем замены тяжелых аккумуляторов другими портативными источниками электроэнергии. Следует искать новых путей для электрообеспечения электромобилей.

Таким образом, электромобильный транспорт как в настоящее время, так и в будущем имеет все возможности для широкого развития.

Совещание отметило заслугу НАМИ и отечественной промышленности в деле научной разработки, проектирования и создания первой опытной партии отечественных электромобилей. В настоящее время электромобили с успехом могут быть использованы для обслуживания почтовых перевозок, торговой сети и коммунальных нужд города.

Совещание в резолюции поставило перед научно-исследовательскими организациями, министерствами и промышленностью конкретные задачи, решение которых должно способствовать развитию городского электромобильного транспорта.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН



Библиография

Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

Издания 1952 г.

Благовещенский В. П. ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ. Ред. В. С. Нелепец. 420 стр., ц. 15 руб. 50 коп. Судпромгиз.

ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ. СБОРНИК СТАТЕЙ ИНСТИТУТА ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ, под ред. К. К. Плауде и др. Вып. I, 96 стр., ц. 5 руб. 15 коп. Изд. АН Латв. ССР.

Денисов П. К. НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ (к расчету мощности тяговых подстанций). 76 стр., ц. 3 руб. Академиздат.

КЛИСТРОНЫ. Пер. с англ. под ред. Е. Д. Науменко. 266 стр., ц. 10 руб. 70 коп. «Сов. радио».

Кнорринг Г. М. и Харчев М. К. ЦЕХОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ. Вопросы построения и выполнения. 136 стр., ц. 4 руб. 90 коп. Госэнергоиздат.

Крейцер В. Л. ВИДЕОУСИЛИТЕЛИ. 416 стр., ц. 11 руб. 80 коп. «Сов. радио».

* Максвелл Джеймс Клерк. ИЗБРАННЫЕ СОЧИНЕНИЯ ПО ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ. Пер. З. А. Цейтлина. Под ред. П. С. Кузнецова. 688 стр., ц. 16 руб. 10 коп. Гостехиздат.

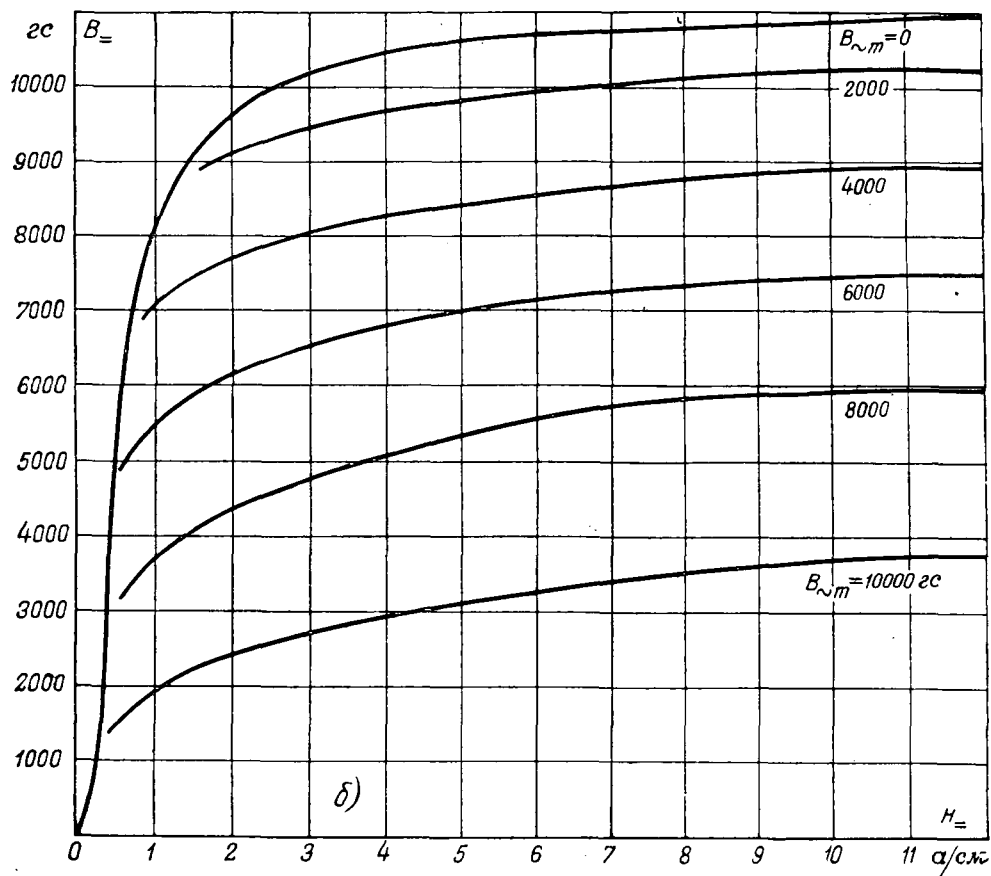
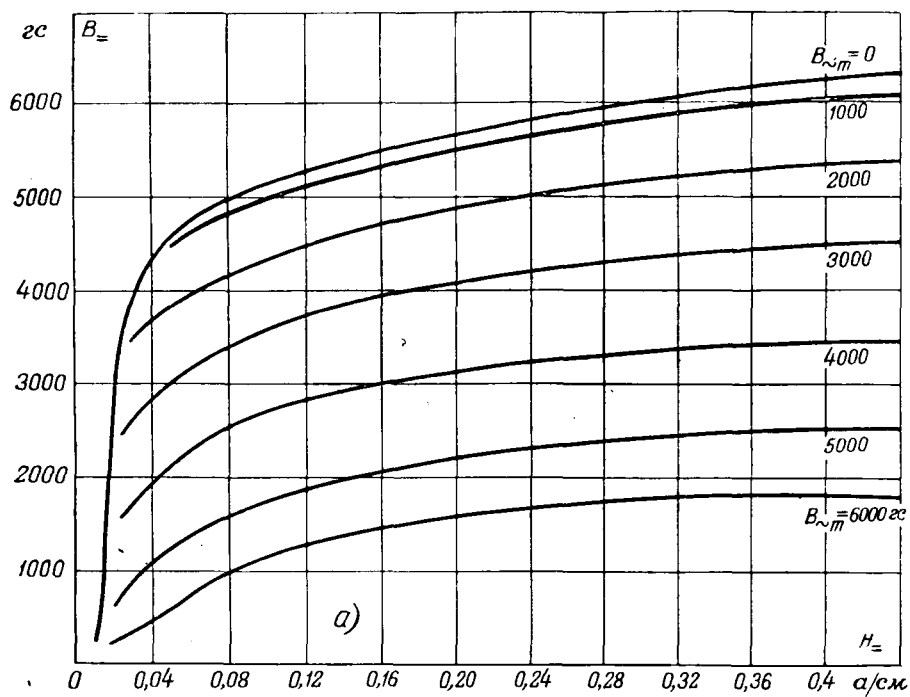
Шиповский А. Н. ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ УСИЛИТЕЛИ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ. 120 стр., ц. 2 руб. 80 коп. Госэнергоиздат.

Якуша Г. Б. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ С ПЕРСОНАЛОМ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ. 87 стр., ц. 2 руб. 75 коп. Госэнергоиздат.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается помещение рецензий.



Постоянная составляющая индукции $B_{\sim} = f(H_{\sim}; B_{\sim})$ кольцевого сердечника при одновременном намагничивании постоянным и переменным током частоты 400 гц. а—пермаллой 0,25 мм; б—сталь ЭЧА 0,35 мм (см. И. Б. Негневицкий и др. Кривые одновременного намагничивания постоянными и переменным полями. „Электричество“ № 3, 1953, стр. 63—64)



ОТК
11