

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

953



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

9

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

9
1953
СЕНТЯБРЬ

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР И МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
И ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

СОДЕРЖАНИЕ

Э. С. Иохвидов и Г. В. Сербиновский — О глубоком вводе высокого напряжения в города	3
М. М. Белоусов — За увеличение расчетных пролетов линий электропередачи	9
Г. М. Розанов — Неравные пролеты линий электропередачи при выпускающих зажимах	11
И. И. Кодкин — Включение генераторов сельских электростанций на параллельную работу способом самосинхронизации	15
М. В. Грейсух — Выбор способа пуска асинхронных с короткозамкнутым ротором и синхронных электродвигателей	19
А. В. Башарин — Метод расчета результирующего полезного потока в машинах постоянного тока при нагрузках и перегрузках	24
Л. Г. Живов — Расчет регулировочных сопротивлений системы генератор—двигатель привода шахтной подъемной машины	26
Л. М. Трахтман — Метод определения колебаний напряжения в тяговых сетях	34
Б. П. Петров — Автоматическое управление электрическим подвижным составом с ионными преобразователями	38
М. М. Акодис — Влияние емкостей ионных преобразователей на погасание вентилей	43
Г. К. Нечаев и М. М. Пиневиц — Система температурной сигнализации на термосопротивлениях	48
Г. Е. Пухов — Применение методов исследования электрических цепей к решению задач изгиба плоских стержневых систем	50
В. И. Смирнов — Расчет сопротивления между электродами в некоторых потенциальных полях	55
М. Ш. Капник — Схема включения люминесцентных ламп при измерении их характеристик	61
И. Б. Негневицкий и Л. Л. Самурина — Экспериментальное исследование переходных процессов в бесконтактных магнитных реле	64
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
И. Ю. Барон — Статистические диаграммы блуждающих токов	70
ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	
Е. Л. Немировский — Гальванический элемент П. Р. Багратиона	73
ДИСКУССИИ	
К статье А. П. Щеглова и В. К. Косарева „Опыт внедрения полужамкнутых и замкнутых схем в городскую электросеть“ — В. А. Козлов. Терминология теоретической электротехники — Б. В. Грушевский, Р. А. Воронов	77 78
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Многократная наплавка машинных деталей. Шагающая землесосная установка. Амплитудный катодный анализатор. Влияние влажности на зажигание люминесцентных ламп. Радиопомехи, вызываемые высоковольтными линиями передачи. Электровоз с игнитронными выпрямителями Пенсильванской ж. д. (США).	81
ХРОНИКА	
Научно-техническая сессия по электроприводу подъемно-транспортных механизмов	88
БИБЛИОГРАФИЯ	
Г. И. Атабеков, В. С. Пантюшин и др. — Книга Е. В. Китаева и Н. Ф. Гревцева „Курс общей электротехники“	89
Н. С. Сиунов, М. М. Акодис и др. — Электротехнический справочник	93
Л. Б. Гейлер — Книга Ю. И. Аносова „Электромагнитные муфты“	96



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

0 глубоком вводе высокого напряжения в города

Инж. Э. С. ИОХВИДОВ и инж. Г. В. СЕРБИНОВСКИЙ

Москва

Коммунистическая партия и Советское правительство видят свою главную задачу в неослабной заботе о благе народа, о максимальном удовлетворении его материаль-

ных и культурных потребностей. В целях осуществления этой задачи в городах нашей страны развернуто огромное жилищное, коммунальное и культурное строительство, которое влечет за собой рост потребления электроэнергии, необходимость развития городских электрических сетей.

Городские электрические сети — крупнейший потребитель цветных металлов. Поэтому задача всемерной экономии последних при высокой надежности и экономичности работы сетей должна стоять в центре внимания всех организаций, которые занимаются планированием развития городов и проектированием городских сооружений и электрических сетей.

Одним из важнейших мероприятий по снижению расхода цветных металлов и потерь электроэнергии является максимально возможное внедрение в сети более высоких напряжений. Применительно к городским электросетям это означает устройство так называемых глубоких вводов высокого напряжения в города.

Глубокие вводы успешно применяются при электроснабжении промышленных предприятий с большими электрическими нагрузками. В городские электросети они только начинают внедряться.

В настоящее время проектные и исследовательские организации разрабатывают наиболее рациональные технические решения по их применению в городах. Однако эта работа наталкивается на ряд трудностей.

Устройство глубоких вводов затрагивает некоторые вопросы градостроительства, и правильное решение этой задачи должно явиться результатом совместной слаженной работы энергетиков и работников в области планирования и строительства городов. Однако далеко не всегда вопрос этот решается путем такой совместной работы, примером чего является книга Е. О. Штейнгауза о энергоснабжении при планировке городов¹.

В гл. XXVI книги содержится явно неверное утверждение о том, что поскольку стоимость электросетевых сооружений по сравнению с об-

Рассматривается вопрос о размещении районных подстанций и линий электропередачи на территории городов. Намечаются мероприятия по переустройству схем электроснабжения городов в связи с необходимостью широкого внедрения глубоких вводов высокого напряжения. Печатается в порядке обсуждения.

щей стоимостью планировки и сооружения города мала, вопросы устройства электрических сетей имеют явно подчиненный характер и поэтому планировщики и градострои-

тели могут не считаться в своих решениях с этими вопросами. Более того, автор книги считает возможным при планировке городов демонтировать, куда угодно переносить и как угодно переустраивать действующие сетевые сооружения. По мнению автора, размещение районных подстанций энергосистемы в зонах жилой застройки городов нецелесообразно, а устройство линий электропередачи высокого напряжения недопустимо. Подземные кабельные линии напряжением 110 кВ и выше ввиду их технической сложности и большой стоимости доступны только самым крупным городам (Москва, Ленинград). В других городах должны применяться подземные кабельные вводы напряжением не выше 35 кВ. Необходимые для жилых районов любого города электрические мощности могут быть вполне рационально подведены при напряжениях 6, 10 и 35 кВ.

Автор книги предлагает размещать районные подстанции и линии электропередачи более высоких напряжений за пределами границ зоны застройки и даже за пределами резервных территорий города. Нечего доказывать, что такая точка зрения, если с ней согласятся градостроители, может серьезно помешать осуществлению глубоких вводов высокого напряжения в города. Ввиду этого необходимо проанализировать выводы и рекомендации автора книги.

Главная ошибка Е. О. Штейнгауза заключается в том, что он сравнивает затраты на планировку и сооружение города с затратами на сооружение электросетей лишь в денежном их выражении, совершенно не учитывая затрат цветных металлов, оборудования, материалов, потерь электроэнергии и физические объемы работ, подлежащих выполнению. Такой подход на практике может привести только к перерасходу электроэнергии и материалов, создать искусственно увеличенный спрос на них и вызвать затруднения в общем сетевом строительстве.

Правильное решение вопросов устройства системы электроснабжения города зависит в каждом случае от ряда условий. Два из них являются основными для любого города — это плотность электрической нагрузки и характер источников электроснабжения города.

¹ Е. О. Штейнгауз. Вопросы энергоснабжения при планировке городов. Издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952.

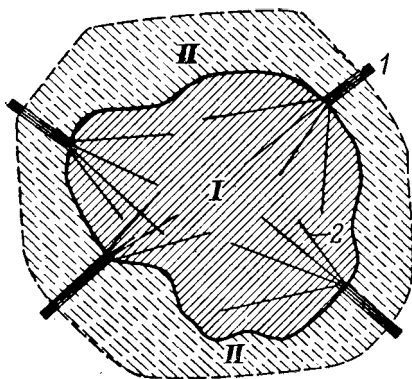


Рис. 1. Неправильное размещение районных подстанций за пределами резервной территории города.

I — застроенная территория города; *II* — резервная территория города; 1 — районная подстанция; 2 — линия электропередачи 6 или 10 кв.

В зонах многоэтажной застройки больших городов при потреблении электроэнергии только для нужд освещения и мелкомоторной нагрузки (лифты, насосные установки котельных и бойлерных, электрооборудование торговых предприятий и т. п.) плотность электрической нагрузки колеблется в пределах от 2,5 до 5 тыс. кВт на 1 км². Если учесть наружное освещение города, городской электрифицированный транспорт и небольшие промышленные и коммунальные предприятия, размещающиеся в жилых районах (швейные и обувные предприятия, прачечные, бани, мелкие предприятия местной промышленности и т. п.), то плотность электрической нагрузки возрастет до 4...10 тыс. кВт на 1 км². В будущем, когда электроэнергия будет более широко применяться для приготовления пищи, плотности электрических нагрузок возрастут до 20...25 тыс. кВт на 1 км².

Устройство районной подстанции с первичным напряжением 110 кв считается рациональным, если ее рабочая мощность не менее 30 тыс. квт. Это означает, что при современных плотностях нагрузки в зонах многоэтажной застройки больших городов такие подстанции целесообразно устраивать на каждые 3...8 км² территории застройки, а в будущем почти на каждый квадратный километр. Таким образом, уже при существующих плотностях нагрузки обойтись без размещения районных подстанций внутри районов жилой застройки практически невозможно.

Плотность электрической нагрузки возрастает от окраины к центру города. Поэтому отказ от глубокого ввода высокого напряжения в центральную часть города приведет к большому перерасходу кабелей на устройство распределительной электрической сети. Строительство районных подстанций за пределами резервных территорий города (рис. 1) увеличит этот и без того большой перерасход кабельной продукции на устройство электрической сети, а также увеличит потери электроэнергии, сделает более дорогим и усложнит устройство сети вследствие удлинения питающих линий и необходимости благоустройства резервных территорий для прокладки по

ним кабеля (вертикальная планировка, планировка будущих проездов).

Источниками электроснабжения городов являются городские теплоэлектроцентрали и сети энергетических систем, по которым электроэнергия поступает в города от расположенных в местах добычи топлива конденсационных электростанций и гидроэлектростанций.

Е. О. Штейнгауз правильно доказывает нерациональность разукрупнения тэц и размещения их в зонах жилой застройки. Но даже при размещении крупных тэц вблизи жилой застройки распределение всей их мощности на генераторном напряжении является нецелесообразным. Часть своей мощности они при более высоком напряжении передают в другие районы города. Для центральных районов городов, электроснабжение которых осуществляется полностью или в основном от тэц, последние являются внешними источниками. Энергия от этих тэц к центру города подводится не на генераторном, а на более высоких напряжениях.

Все большее увеличение роли дальних электростанций в электроснабжении делает выбор напряжения сетей энергосистем мало зависящим от нужд отдельных городов. Города часто получают электроэнергию от мимо проходящих линий энергосистем, напряжение которых значительно выше того, которое следовало бы подвести к данному городу. Поэтому проектные организации зачастую несвободны в выборе напряжения, при котором город должен снабжаться электроэнергией. Оно может быть самым разнообразным — 35, 110, 154, 220 и даже 400 кв.

Устройство глубокого ввода 35 кв в центр города следует считать безусловно целесообразным только в том случае, если и напряжение, подводимое к городу, равно 35 кв. Во всех же случаях подвода более высокого напряжения устройство ввода 35 кв, как правило, нецелесообразно. Действительно, при подводе напряжения 110 кв устройство ввода 35 кв потребовало бы дополнительной трансформации электроэнергии (110/35 и 35/6—10 кв), двойного количества трансформаторов на районных подстанциях, дополнительных распределительных устройств 35 кв на основных приемных подстанциях энергосистемы, значительного увеличения затрат проводникового материала и означало бы увеличение потерь электроэнергии.

При подводе к городу напряжения 154 или 220 кв энергосистемам очень часто приходится иметь на приемных подстанциях трансформацию электроэнергии 154/110/10—6 или 220/110/10—6 кв. В этих случаях применение для глубокого ввода напряжения 35 кв потребовало бы двух дополнительных трансформаций электроэнергии (220/110/10—110/35 или 10/35 и 35/10—6 кв). По сравнению с вводом наиболее высокого напряжения в глубь города эта система электроснабжения потребовала бы такого количества электрооборудования, которого хватило бы для трех городов.

Современная техника позволяет осуществить глубокий ввод с помощью подземных кабелей на-

пряжением до 220 кВ включительно. Однако в настоящее время кабельные линии в несколько раз дороже воздушных. Поэтому вполне закономерно стремление проектных и электроснабжающих организаций осуществить там, где это технически возможно, подвод к районным подстанциям воздушных линий высокого напряжения, в том числе и в глубь городов.

Возражения против устройства на территории города воздушных линий электропередачи высокого напряжения обосновываются опасностью этих линий для населения и нарушением архитектурного ансамбля города. Оба эти соображения имеют некоторые основания лишь при проходе линий непосредственно через зону жилой застройки. Однако для воздушных линий электропередачи в городе могут быть использованы всевозможные полосы отчуждения, санитарные разрывы между жилой и промышленной застройкой и промышленные территории. Но при необходимости линии электропередачи могут быть проложены и через зоны жилой застройки.

Следует указать, что опасность линий электропередачи для населения обычно преувеличивается. Линии электропередачи в черте города сооружаются на металлических опорах, с большими запасами прочности в опорах и проводах. При сооружении обеспечиваются необходимые габариты. Повреждения таких линий крайне редки. Сети напряжением 110 кВ и выше, как правило, работают с заземленной нейтралью. Обрыв одного провода вызывает практически мгновенное автоматическое отключение такой линии.

Применяемые на окраинах, а иногда и в центре больших городов воздушные линии напряжением 3, 6 и 10 кВ представляют большую опасность для населения, так как имеют меньшую механическую прочность и не отключаются немедленно при обрыве одного из проводов (сети этих напряжений, как правило, работают с изолированной нейтралью). Между тем планировщики и градостроители возражают против устройства таких линий только на наиболее благоустроенных проездах самых крупных городов. Во многих городах воздушные сети 3, 6 и 10 кВ продолжают развиваться.

Конечно, никто не будет настаивать на прокладке воздушных линий электропередачи вдоль основных городских проездов с напряженным людским потоком и потоком городского транспорта. Однако возможны другие решения. Пример одного из них приведен на рис. 2. Линия электропередачи, проходящая через жилые кварталы города, не нарушает архитектуру проездов, движение транспорта вдоль трассы линии отсутствует. Для прокладки линий электропередачи могут быть использованы также набережные рек, не имеющих причалов (рис. 3). Там, где невозможно построить воздушные линии, следует устраивать подземные кабельные линии высокого напряжения. Чем большее распространение будут получать кабели высокого напряжения, тем больше должна будет производиться их наша промышленность, а это, в свою очередь, повлечет за собой снижение их стоимости.

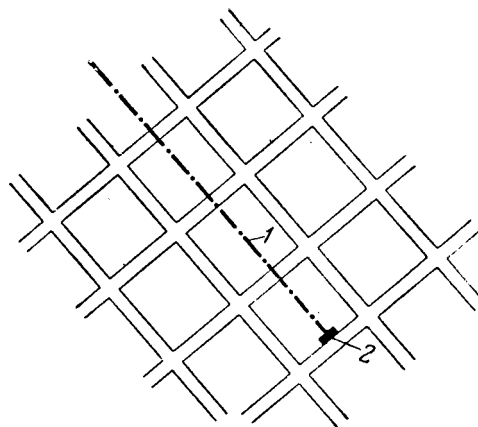


Рис. 2. Трасса воздушной линии электропередачи, проходящая через жилые кварталы города.

1 — трасса линии электропередачи;
2 — районная подстанция.

Еще менее основательны утверждения Е. О. Штейнгауза о недопустимости строительства в центральной части городов районных подстанций, которые он представляет, как сооружения с открытыми (наружными) распределительными устройствами высокого напряжения, с открытой установкой трансформаторов и подъездными железнодорожными путями. Такой вид районные подстанции имеют за городом и на промышленных территориях, устройство их требует отвода значительных площадей.

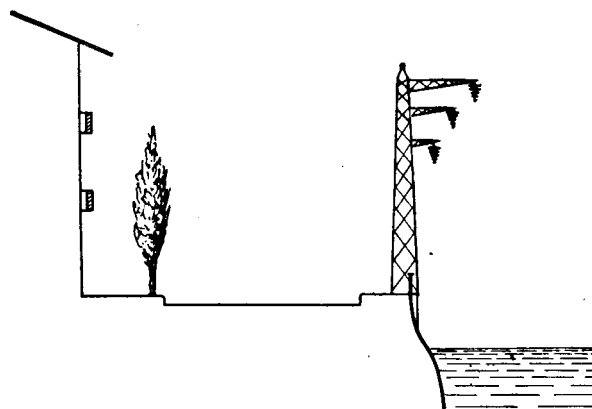


Рис. 3. Использование для устройства воздушной линии электропередачи набережной реки, не имеющей причалов.

В центральной части города должны строиться полностью закрытые районные подстанции необходимых напряжений. Такая подстанция в отношении занимаемой площади и архитектурного оформления напоминает многоэтажный дом и может быть расположена на любом городском проезде. Что же касается железнодорожных подъездных путей, то следует указать, что существует и длительно эксплуатируется значительное число мощных районных подстанций, не имеющих этих путей.

Опыт проектирования и сооружения закрытых районных подстанций большой мощности с первичным напряжением 110 кВ и со сложными схемами коммутации показал, что их стоимость практически равна стоимости подстанций открытого типа. Это объясняется компактным и рациональ-

ным размещением оборудования, малыми размерами ее территории и облегченной изоляцией оборудования. Закрытые районные подстанции могут быть приспособлены как для воздушных, так и для кабельных вводов линий высокого напряжения.

Таким образом, имеются все технические возможности устройства глубоких вводов высокого напряжения в центры городов. Однако внедрение глубоких вводов высокого напряжения тормозится не только вследствие архитектурно-планировочных соображений.

Все большее применение электроэнергии в различных отраслях промышленности, городского хозяйства и быта повышает требования к надежности электроснабжения, к его бесперебойности. Быстрое восстановление электроснабжения при повреждениях достигается резервированием всех элементов электросетей, а бесперебойность электроснабжения — автоматизацией ввода в действие их резервных элементов. В связи с этим в настоящее время в городских электросетях широко практикуется система дублирования всех их элементов во всех звеньях сетей. Эта система схематично показана на рис. 4.

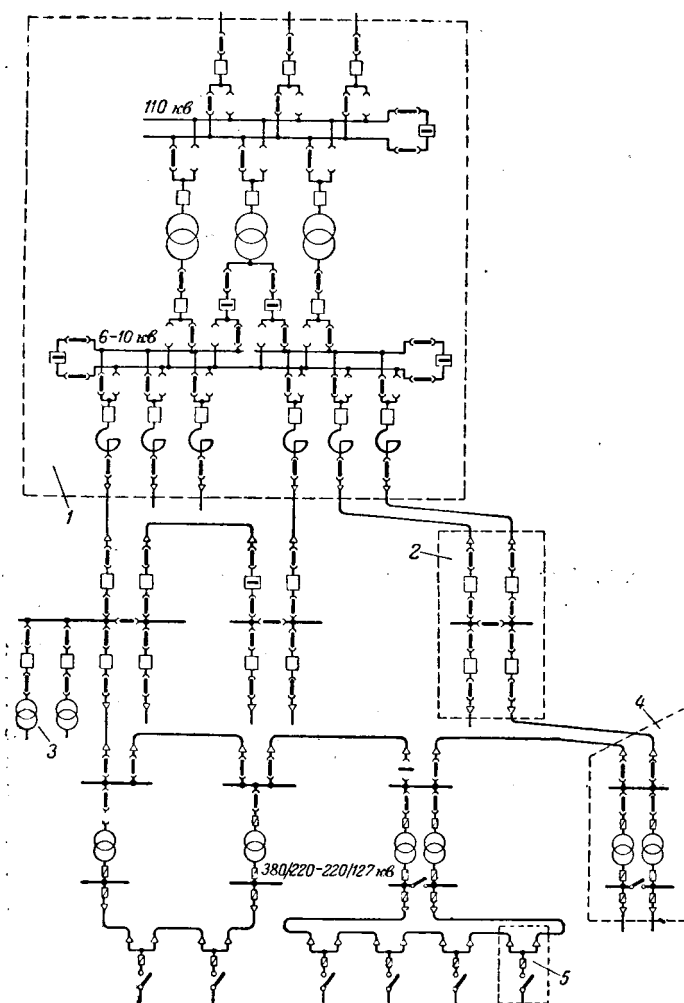


Рис. 4. Наиболее распространенная в настоящее время принципиальная схема электроснабжения района города.
1 — районная подстанция; 2 — распределительный пункт; 3 — трансформаторы потребителей с сосредоточенной нагрузкой; 4 — сетевая трансформаторная подстанция (ТП); 5 — петлевой ввод.

Из рис. 4 видно, что питание шин высокого напряжения районной подстанции осуществляется и резервируется по двум, трем или большему числу линий электропередачи. Сами сборные шины дублированы. Питание шин среднего (распределительного) напряжения осуществляется через два, три или большее число понизительных трансформаторов, взаимно резервирующих друг друга. Системы шин среднего напряжения секционируются и дублируются. Распределительные пункты городской электросети питаются по дублированным линиям или взаимно резервируются по связям. Самой простой схемой распределительных сетей является петлевая схема с возможностью выделения любого поврежденного кабельного участка и восстановления питания трансформаторных подстанций (ТП) замыканием деления сети. Сетевые трансформаторы резервируются путем их дублирования на каждой ТП или путем устройства связей низкого напряжения между трансформаторами соседних ТП. Сети низкого напряжения для питания многоэтажных домов строятся также по петлевому принципу с петлевым заходом кабеля на каждый домовый ввод.

Изображенная на рис. 4 схема еще не полностью отражает сложность резервирования всех элементов сети. В случае наиболее ответственных потребителей распределительные пункты питаются от разных районных подстанций. Автоматизация резервирования распределительных сетей среднего напряжения осуществляется с помощью их дублирования или устройства сложной замкнутой сети низкого напряжения, сети низкого напряжения также дублируются или делаются вводы из разных ТП.

Как видно, характерной особенностью этой сложной и многообразной системы является многократность резервирования, когда каждый элемент сети резервируется самостоятельно, независимо от других элементов. В результате система электроснабжения сильно усложняется, становится очень дорогой и требует затраты большого количества дополнительного проводникового материала и электротехнического оборудования.

Стремление сократить эти большие денежные и материальные затраты приводит, в частности, к сокращению числа и укрупнению мощности районных подстанций. Несмотря на усложнение схем коммутации подстанций из-за необходимости ограничения токов короткого замыкания, это мероприятие при существующей системе резервирования является экономически оправданным. Но вместе с этим оно явно противоречит идее глубокого ввода высокого напряжения в города и максимальному сокращению расхода цветных металлов на устройство городских электросетей.

Питание районных подстанций по многим высоковольтным линиям усложняет их размещение в зоне жилой застройки. Укрупнение районных подстанций повышает стоимость каждой из них и удлиняет сроки строительства. Задержка же ввода в эксплуатацию такой подстанции отрицательно сказывается на выполнении планов жи-

лищного, коммунального и промышленного строительства в городе.

Между тем при рассмотрении схемы рис. 4 возникает законный вопрос: зачем нужно резервировать данный элемент, если резервированием последующего элемента он и без того резервируется. Например, зачем резервировать сборные шины распределительного напряжения районной подстанции, если все питающие линии, отходящие от разных ее секций, взаимно резервируют друг друга в городе и это резервирование автоматизировано. Не лучше ли повсеместно расщепить все последовательно включенные элементы системы и устроить автоматическое резервирование только в низших звеньях распределительной сети. Такой путь приведет нас к иному построению системы электроснабжения города, принципиальная схема которого изображена на рис. 5.

Как видно из рис. 5, основой электроснабжения города являются несколько опорных районных подстанций, которые расположены на окраинах города и к которым подходят линии электропередачи энергосистемы. Опорные подстанции связаны между собой короткими линиями, образующими кольцо или цепочку. По этим коротким линиям осуществляются синхронная связь дальних станций и взаимное резервирование питания опорных подстанций, к ним присоединяются линии подстанций городских тэц.

Опорные подстанции, кроме трансформации энергии для питания близлежащих потребителей, являются одновременно распределительными пунктами всей системы электроснабжения города. От шин высокого напряжения этих подстанций в глубь территории города отходят в зависимости от местных условий воздушные или кабельные линии высокого напряжения, питающие внутригородские однострансформаторные районные подстанции небольшой мощности (10...30 тыс. *кВА* при напряжении 110 *кВ* и 5...15 тыс. *кВА* при напряжении 35 *кВ*). Однострансформаторные подстанции присоединяются односторонне по схеме линия—трансформатор или с помощью отпайек от магистральных линий. При одностороннем присоединении подстанции ее трансформатор со стороны высокого напряжения может не иметь выключателя. При присоединении отпайкой выключатель необходим.

Распределительные устройства низшего напряжения однострансформаторных подстанций имеют одинарную систему шин и представляют собой мощный распределительный пункт сети среднего напряжения. От них отходят линии 6 или 10 *кВ* распределительной сети города.

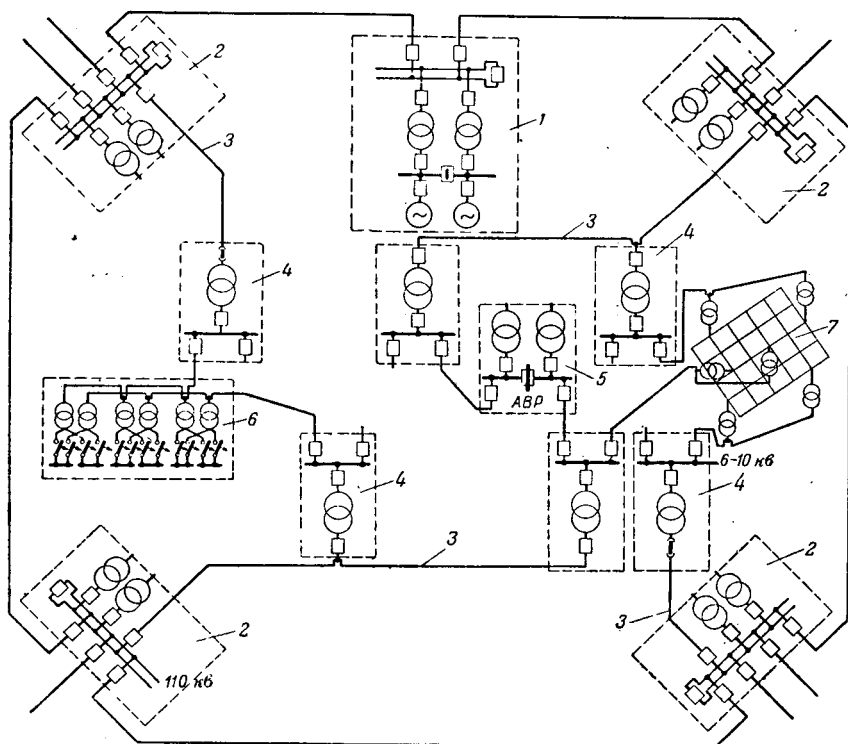


Рис. 5. Принципиальная схема электроснабжения города с глубокими вводами и однострансформаторными подстанциями высокого напряжения, с автоматическим резервированием в сетях среднего напряжения.

1—тэц; 2—опорные районные подстанции; 3—глубокие вводы высокого напряжения; 4—однострансформаторные подстанции глубокого ввода; 5—подстанция промышленного потребителя; 6—секционированная распределительная сеть с АВР на низком напряжении; 7—сетка низкого напряжения.

Потребители с сосредоточенной нагрузкой (промышленные предприятия, тяговые подстанции и т. п.) получают питание по двум линиям от разных подстанций, которые в свою очередь питаются от разных линий высокого напряжения. Переключение нагрузки потребителя с одной линии на другую осуществляется автоматически.

Питание коммунальных потребителей осуществляется путем захода в каждую секционированную сетевую подстанцию (ТП) двух линий от разных районных подстанций с отдельным присоединением трансформаторов и взаимным их автоматическим резервированием на низком напряжении или путем питания смежных ТП от разных линий, идущих от разных районных подстанций, с взаимным автоматическим резервированием с помощью замкнутой сети низкого напряжения.

Такая система электроснабжения обеспечивает автоматическое резервирование, а следовательно, бесперебойность электроснабжения всех без исключения потребителей города от разных опорных пунктов сети. Вместе с тем из схемы исключены все промежуточные звенья резервирования, что максимально упрощает и удешевляет ее. Преимущества такой системы могут быть пояснены на следующем примере.

На рис. 6 показана схема питания двух больших территориально смежных участков города, которая соответствует обычной в настоящее время системе электроснабжения городов, изображенной на рис. 4. На рис. 7 показана схема

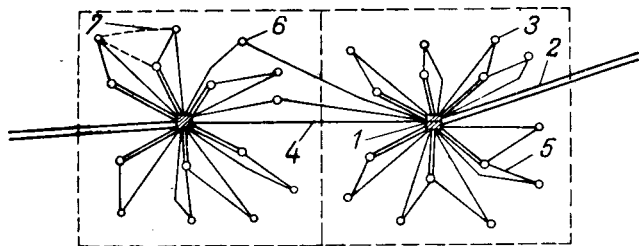


Рис. 6. Система электроснабжения двух смежных районов города от двух районных подстанций.

1—районные подстанции 110/6—10 кв; 2—линии, питающие районные подстанции; 3—распределительные пункты; 4—связь между районными подстанциями; 5—связь между распределительными пунктами; 6—подстанция ответственного потребителя; 7—распределительная сеть 6 или 10 кв.

питания тех же участков, соответствующая системе электроснабжения, изображенной на рис. 5. Из сопоставления этих схем нетрудно видеть преимущества новой системы электроснабжения.

Число линий, питающих подстанции в результате перехода к новой системе, сократилось с четырех до трех с увеличением числа переключек между подстанциями с одной до трех. Суммарная протяженность линий либо сохранилась без изменения, либо уменьшилась. Число высоковольтных выключателей уменьшилось с 14 до 6. Не стало по существу распределительных устройств высокого напряжения. Намного упростились и удешевились распределительные устройства среднего напряжения. Реакторы на отходящих линиях и мощные выключатели стали не нужны. В результате взаимного резервирования подстанций всем потребителям распределительной сети обеспечено двустороннее питание от разных подстанций с автоматическим переключением. Однако это не вызвало дополнительных затрат кабеля, так как расстояния от районных подстанций до потребителей значительно уменьшились. Распределительные пункты в сети среднего напряжения стали излишни. Это полностью компенсирует дополнительные затраты на автоматизацию резервирования в распределительной сети.

Расчеты, произведенные графически, показали, что общие затраты проводникового материала на устройство распределительной сети снижаются в 1,2...1,6 раза. Резко снижаются потери электроэнергии в сети. Автоматизация резервирования в распределительной сети позволяет отказаться от дежурного персонала на разукрупненных подстанциях и этим снизить расходы по эксплуатации.

При обсуждении новой системы электроснабжения высказываются опасения, что ликвидация всех промежуточных ступеней резервирования слишком ослабляет схему. При этом особое внимание обращается на высоковольтные кабельные линии, ремонт которых может затянуться и другие звенья сети на длительное время останутся без резерва. В связи с этим можно предложить прокладку одной резервной жилы с тем, чтобы иметь возможность заменить ею любую из трех основных жил кабельной линии 110 кв, а также производить пофазный ремонт кабеля. В случае кабельных линий 35 кв можно предложить осуществ-

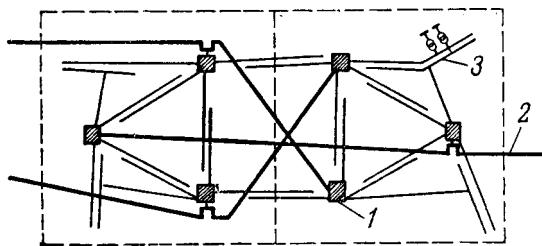


Рис. 7. Система электроснабжения двух смежных районов города от шести однотрансформаторных подстанций с секционированными и автоматизированными распределительными сетями.

1—однотрансформаторные районные подстанции; 2—линии, питающие районные подстанции; 3—секционированная распределительная сеть.

лять питание однотрансформаторных подстанций двоякими линиями с тем, чтобы при необходимости ремонта одного из кабелей обеспечивалось резервирование 50...65% потребителей подстанции.

Наконец, можно предложить иметь резервный понизительный трансформатор для переброски его в случае необходимости на любую однотрансформаторную подстанцию, на которой произошло повреждение основного трансформатора. Эти мероприятия целесообразны, хотя они несколько и удорожают схему.

Технико-экономическое сравнение по укрупненным показателям схемы рис. 6 с усложненной такой схемой рис. 7 показало, что в денежном выражении вторая оказалась дороже первой примерно на 5...7%. Если в схеме рис. 4 автоматизировать резервирование в распределительной сети, то денежные затраты окажутся одинаковыми. Однако по затратам цветных металлов и потерям электроэнергии схема с однотрансформаторными подстанциями имеет больше преимуществ.

Трудность осуществления системы электроснабжения с однотрансформаторными районными подстанциями заключается в отставании распределительных сетей среднего напряжения в отношении повсеместной автоматизации их резервирования. Объясняется такое отставание тем, что эти сети зачастую строятся, эксплуатируются и реконструируются различными организациями. Однако это свидетельствует только о том, что к вопросу реконструкции и автоматизации городских распределительных электросетей существует явно неправильное отношение.

Рассматривая автоматизацию распределительных городских сетей как средство только повышения надежности электроснабжения, отдельные проектные и эксплуатационные организации обычно считают это мероприятие излишним или во крайней мере преждевременным. Они не учитывают при этом тех возможностей, которые открываются в результате автоматизации для главной системы электроснабжения города в отношении создания простейших однотрансформаторных подстанций глубокого ввода.

Из изложенного следует, что правильный выбор системы электроснабжения города может быть сделан только на основе комплексного рассмотрения и технико-экономического сравнения

различных вариантов построения всей системы электроснабжения, начиная от тэц и опорных подстанций и кончая сетью низкого напряжения. Очевидно, при таком сравнении варианты с глубоким вводом высокого напряжения с простейшими подстанциями и автоматизацией распределительных сетей во многих случаях окажутся наиболее рациональными.

Это обязывает организации, планирующие города, и организации, проектирующие их электроснабжение, уже на начальных стадиях планировки городов детально и комплексно прорабатывать все устройство системы электроснабжения. Результаты этой проработки должны самым

серьезным образом учитываться при решении планировочных и архитектурных вопросов. Совершенно неправилен сделанный Е. О. Штейнгаузом вывод о том, что размещением районных подстанций оканчивается взаимосвязь между планировкой и электроснабжением города, так как он приводит к разрыву между проектированием системы внешнего электроснабжения города и устройством распределительных сетей, к созданию нерациональных систем электроснабжения городов, к большим перерасходам цветных металлов и затруднениям в строительстве и реконструкции городов.

[6.5.1953]



За увеличение расчетных пролетов линий электропередачи

Инж. М. М. БЕЛОУСОВ

Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория МЭСЭП

При расчете сталеалюминиевых проводов по общепринятому методу без учета неупругих деформаций допускаемое напряжение для проводов серии АС при температуре -5° получается равным 10,0...10,2 кг/мм². Временное сопротивление провода составляет

28,4...29,4 кг/мм². Таким образом, механический коэффициент запаса прочности равен 2,84...2,88. В то же время для медных проводов, временное сопротивление которых составляет 90...92 % суммы временных сопротивлений отдельных проводов, этот коэффициент фактически равен 1,8...1,85. Однако практика эксплуатации доказывает, что запас прочности медных проводов вполне достаточен. При расчете сталеалюминиевых проводов серии АС по их действительным характеристикам и при сохранении допускаемого напряжения в алюминии на прежнем уровне при температуре -5° допускаемое напряжение в проводе получается равным 12,5...13,2 кг/мм². Механический запас прочности при этом составит 2,23...2,29.

Таким образом, расчет сталеалюминиевых проводов по действительным характеристикам их материалов при действующих нормах позволяет существенно повысить тяжение провода. Новый метод расчета имеет и другие преимущества: он более точен; при расчете по этому методу отпадает необходимость в «перетяжке» проводов при монтаже, что повышает качество монтажа; уточняется расчет стрел провеса провода, что при длинных пролетах имеет существенное значение.

Указываются преимущества расчета сталеалюминиевых проводов по действительным характеристикам их материалов. Приводится примерная экономия, которую даст переход на новый метод расчета и связанное с этим переходом увеличение расчетного пролета линий электропередачи при неизменной высоте опор. Рассматривается вопрос о надежности эксплуатации линии с увеличенными пролетами и о борьбе с вибрационным износом проводов, имеющих повышенное статическое эксплуатационное напряжение в своих материалах. Печатается в порядке обсуждения.

Расчет по действительным характеристикам дает возможность использовать сталеалюминиевые провода, в особенности — провода серии АСУ, для длинных переходных пролетов, которые в настоящее время выполняются бронзовыми проводами.

Однако наиболее важная особенность расчета по действительным характеристикам состоит в увеличении расчетного тяжения провода при сохранении установленного действующими нормами допускаемого напряжения в алюминии и, следовательно, в увеличении расчетного пролета при неизменной высоте опор. Для проводов серии АС увеличение пролета составляет от 14 до 18 % в зависимости от сечения провода и от района климатических условий. Даже для провода АСО-480, у которого отношение сечения алюминия к сечению стали необычно велико, увеличение пролета составляет 11 % (для I и II районов).

Расчеты деревянных опор для линии 110 кв во II районе климатических условий с проводом АС-120, с выпускающими зажимами, показали, что с увеличением расчетного пролета с 205 до 235 м расход леса на одну промежуточную опору увеличивается на 6,5 %, на анкерную — на 5,5 %, а в среднем на одну опору — на 6 %. Таким образом, экономия леса при расчете этой линии по новому методу составила бы $(1 - \frac{106}{115}) \cdot 100 = 8\%$.

экономия изоляторов и арматуры — $(1 - \frac{100}{115}) \times 100 = 13\%$. Кроме того, имела бы место экономия стоимости строительно-монтажных работ, соответствующая уменьшению числа опор.

¹ М. М. Белоусов. Расчет сталеалюминиевых проводов по их действительным характеристикам, Электричество, № 4, 1953.

При металлических опорах экономия будет не меньше, в особенности на линиях с выпускающими зажимами. Возможно, что в некоторых случаях оптимальным решением вопроса явится не сохранение неизменной высоты опор, а некоторое уменьшение их высоты с одновременным небольшим увеличением длины пролета.

При огромных масштабах строительства линий электропередачи в Советском Союзе переход на метод расчета проводов по действительным характеристикам даст многомиллионную экономию и сэкономит для народного хозяйства многие тысячи тонн металла и кубометров леса.

Рассмотрим вопрос о надежности эксплуатации линий с повышенным тяжением. Как мы видели выше, механический коэффициент запаса прочности сталеалюминиевых проводов при новом методе расчета снижается с 2,8...2,9 до 2,2...2,3, но остается более высоким, чем у медных проводов. Такое снижение механического коэффициента запаса прочности следует признать вполне допустимым. Эксплуатационный коэффициент запаса, как показал И. А. Лопатин², не может служить убедительным критерием для суждения о надежности эксплуатации. Однако еще довольно широко распространено и противоположное мнение. Примерные расчеты показали, что и этот коэффициент при переходе на новый метод расчета снижается, но остается много выше, чем у медных проводов соответствующих сечений, рассчитанных по обычному методу. Это проверено для эксплуатационного коэффициента запаса в любом его виде (в виде, предложенном проф. А. А. Глазуновым, в виде, принятом в немецких нормах 1930 г. и в других).

Предложение И. А. Лопатина относить коэффициенты запаса к пределу текучести алюминия, чтобы избежать остаточных деформаций, неприемлемо, так как действительный предел текучести алюминия ниже указанного в нормах и уже при существующих расчетных напряжениях имеют место значительные остаточные деформации. Нельзя также согласиться с его предложением рассчитывать провод на работу одного только стального сердечника. Если почему-либо алюминиевые повивы будут оборваны, то стальной сердечник перегорит от рабочего тока; пока алюминиевые повивы не оборваны, они несут свою долю механической нагрузки.

Таким образом, механическая прочность сталеалюминиевых проводов при переходе на новый метод расчета и при сохранении действующих норм все еще выше прочности медных проводов.

Особое внимание следует уделить вопросу о вибрационном износе проводов. Если провод подвержен вибрации, то, повышая статическое эксплуатационное напряжение в материале провода, можно в некоторых случаях ускорить вибрационный износ материала провода и тем самым понизить надежность эксплуатации, что, конечно, недопустимо.

Решение Технического управления быв. МЭС обязывает строительные и эксплуатационные организации подвешивать гасители вибрации на проводах всех линий, рассчитанных по действующим нормам при следующих сечениях проводов: в I районе климатических условий — М-35, АС-35 и более; во II районе климатических условий — М-50, АС-95 и более.

Гаситель вибрации, как показал опыт, вполне успешно работает не только при тяжениях, соответствующих средней эксплуатационной температуре ($+10^\circ$), но и при низких температурах, т. е. при тех тяжениях, которые будут иметь место как средние эксплуатационные при переходе на новый метод расчета. Таким образом, гаситель вибрации предоставляет нам возможность безопасного увеличения эксплуатационного напряжения в проводе, и следует эту возможность использовать для увеличения длины пролета.

В I районе практически для всех линий передачи, а во II районе — для линий с проводами сечением АС-95 и более, защищаемых гасителями, сохранение действующих норм при переходе на новый метод расчета не может вызывать возражений по условиям опасности вибрационных повреждений. С другой стороны, в IV районе климатических условий, даже после перехода на новый метод расчета, эксплуатационные напряжения в алюминии получаются настолько низкими, что не может быть и речи о повреждениях от вибрации. Например, для провода АС-120 при пролете 165 м и расчетном напряжении при гололеде $\sigma = 12,5 \text{ кг/мм}^2$ после первого растяжения до расчетной нагрузки при повышении температуры до $+10^\circ$ напряжение в алюминии падает до $1,0 \text{ кг/мм}^2$. Даже в первый период эксплуатации (первое лето после монтажа) до того, как провод подвергнется значительным тяжениям, напряжение в алюминии при $+10^\circ$ не превысит $3,2 \text{ кг/мм}^2$. Таким образом, в IV районе сохранение действующих норм при переходе на новый метод расчета также не может вызвать возражений.

Лишь для III района и для линий с проводами сечением АС-70 и менее во II районе вопрос требует дополнительного изучения. Для этой группы линий электропередачи необходимо произвести технико-экономическое сравнение вариантов с обычными пролетами без гасителей вибрации и с увеличенными пролетами при обязательной защите проводов гасителями вибрации.

В результате рассмотрения может выявиться, что при переходе на новый метод расчета целесообразно установить для той категории линий, для которой защита проводов гасителями вибрации будет признана экономически невыгодной, дополнительное условие, ограничивающее значение среднего эксплуатационного напряжения.

Тогда возникнут два класса линий передачи: а) линии, защищенные гасителями вибрации, у которых среднее эксплуатационное напряжение нормами не ограничивается; б) линии, у которых гасителей вибрации не будет; у этих линий среднее эксплуатационное напряжение не должно превышать определенного устанавливаемого нормами значения.

² Электричество, № 6, 1953.

Возможны и другие решения вопроса, применение других средств борьбы с повреждениями от вибрации. В частности, предварительная перегрузка провода во время монтажа может обеспечить работу провода с самого начала эксплуатации на обратной ветви механической характеристики — при малых напряжениях в алюминии.

Итак, переход к расчету по действительным характеристикам при сохранении действующей

нормы допускаемого напряжения в алюминии не вызывает снижения надежности эксплуатации. Напротив, уменьшение числа опор обусловит некоторое повышение надежности эксплуатации, так как уменьшится число точек, в которых возможно повреждение или перекрытие изоляции, повреждение арматуры или конструкций.

[17.11.1952]



Неравные пролеты линии электропередачи при выпускающих зажимах

Кандидат техн. наук, доц. Г. М. РОЗАНОВ

Москва

Неравенство пролетов при расстановке опор в большинстве случаев обусловлено рельефом местности. При большой разности в длинах смежных пролетов возникает сомнение в возможности применения для подвески проводов выпускающих зажимов.

Автору известен случай, когда для одной из линий электропередачи 220 кв (II район гололедности) с выпускающими зажимами в местах с большой разностью в длинах смежных пролетов были применены глухие зажимы, что потребовало предусмотреть промежуточную опору новой конструкции, более тяжелую по весу. Естественно, введение некоторого числа более тяжелых промежуточных опор увеличивает стоимость сооружения линии.

Вопрос о возможности применения выпускающих зажимов при неравных смежных пролетах не освещен в технической литературе. Автор проанализировал ряд случаев неравных пролетов и пришел к определенным выводам, основной из них тот, что наибольшее отклонение гирлянд изоляторов не соответствует наибольшей разности в смежных пролетах.

Прежде чем перейти к изложению сущности вопроса, укажем на метод, использованный автором для определения отклонения гирлянд изоляторов при переходе от одних климатических условий к другим [Л. 1].

Для приведенного пролета

$$l_0 = \sqrt{\frac{l_1^3 + l_2^3 + \dots + l_n^3}{l_1 + l_2 + \dots + l_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n l_i^3}{\sum_{i=1}^n l_i}}, \quad (1)$$

где l_1, l_2, \dots, l_n — длины пролетов между опорами (m), находятся напряжения провода при раз-

Приводится метод определения отклонений гирлянд изоляторов при неравных пролетах. Доказывается, что наибольшей разности в длинах смежных пролетов не соответствуют наибольшие отклонения гирлянд изоляторов. Подвергается сомнению необходимость применения в местах с большой разницей в длинах смежных пролетов глухих зажимов, вызывающих утяжеление промежуточных опор и увеличивающих стоимость сооружения линии.

личных возможных температурах в условиях его монтажа, а именно при ϑ , равном $-20,0^\circ\text{C}$ и $+40^\circ\text{C}$. Напряжения провода определяются также при $\vartheta = -5^\circ\text{C}$ (наибольшая нагрузка) и $\vartheta =$

-40°C . Затем используется система уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n - \frac{l_1^2 g_n^2}{24\beta z_n^2} &= \sigma_m - \frac{l_1^2 g_m^2}{24\beta z_m^2} - \frac{\alpha}{\beta} (\vartheta_n - \vartheta_m) + \frac{\Delta l_1}{l_1 \beta}, \\ \sigma_n - \frac{l_2^2 g_n^2}{24\beta z_n^2} &= \sigma_m - \frac{l_2^2 g_m^2}{24\beta z_m^2} - \frac{\alpha}{\beta} (\vartheta_n - \vartheta_m) + \frac{\Delta l_2}{l_2 \beta}, \\ \sigma_n - \frac{l_n^2 g_n^2}{24\beta z_n^2} &= \sigma_m - \frac{l_n^2 g_m^2}{24\beta z_m^2} - \frac{\alpha}{\beta} (\vartheta_n - \vartheta_m) + \frac{\Delta l_n}{l_n \beta}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где σ_n и σ_m — напряжения в проводах, кг/мм^2 ;
 l_1, \dots, l_n — длины пролетов между опорами, m ;
 g_n и g_m — удельные нагрузки проводов, $\text{кг/м} \cdot \text{мм}^2$;

α и β — коэффициенты температурного линейного удлинения и растяжения;

ϑ_n и ϑ_m — температуры воздуха, $^\circ\text{C}$;

$\Delta l_1, \dots, \Delta l_n$ — изменения длины пролетов, m .

В системе (2) рассматривается каждый действительный пролет в отдельности и определяются Δl — изменения длин пролетов при изменении климатических условий. В правые части уравнений системы (2) подставляются значения σ_m , g_m и ϑ_m , соответствующие принятым условиям монтажа провода, в левые — значения σ_n , g_n и ϑ_n , при которых

определяются изменения пролета Δl , т. е. при θ , равном -40°C , $+40^\circ\text{C}$ и -5°C (наибольшая нагрузка). Отрицательному значению Δl соответствует сокращение длины пролета, положительному — его увеличение.

Длина анкерного пролета остается неизменной и должна быть $\Sigma \Delta l = 0$.

Отклонения гирлянд изоляторов:

$$\left. \begin{aligned} \delta_1 &= \Delta l_1, \\ \delta_2 &= \Delta l_1 + \Delta l_2, \\ \delta_n &= \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_{n-1}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

значения Δl введены со своими знаками — минусом или плюсом.

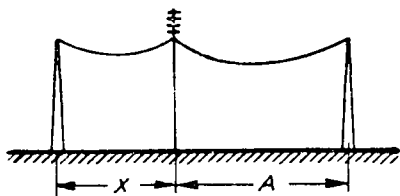


Рис. 1.

Для упрощения решения задачи рассмотрим сначала два неравных пролета X и A (рис. 1), пусть из них изменяется только X . Приведенный пролет

$$Y = \sqrt{\frac{X^3 + A^3}{X + A}}. \quad (4)$$

Функция (4) имеет минимум. Дифференцируя функцию (4) и приравнявая ее нулю, находим, что наименьший приведенный пролет имеет место тогда, когда пролет $X = \frac{A}{2}$.

Далее возьмем два неравных пролета, монтированных сталеалюминиевыми проводами, в одном случае марки АС-120 с пролетом $A = 250$ м, в другом — проводами марки АСУ-400 с пролетом $A = 450$ м. Будем изменять пролет X . Район гололедности — II. Значения приведенных пролетов в зависимости от длины пролета X приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что действительно наименьшее значение приведенного пролета соответствует пролету X , равному половине пролета A (125 и 225 м).

Определение отклонения гирлянд при различных условиях монтажа проводов и сочетаниях

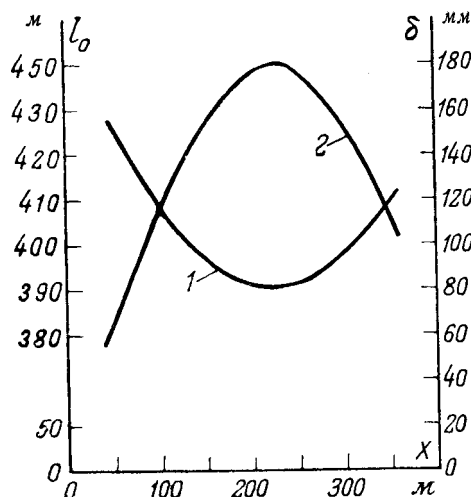


Рис. 2. Приведенный пролет l_0 и отклонение гирлянды изоляторов δ .

внешних нагрузок показало, что наибольшие отклонения гирлянд имеют место при $+40^\circ\text{C}$, если монтаж производился при температуре -20 и 0°C , или -40°C в случае, когда температура при монтаже была $+40^\circ\text{C}$.

Отклонения гирлянд изоляторов при условиях монтажа -20°C , 0°C и $+40^\circ\text{C}$ для проводов марок АС-120 и АСУ-400 и пролетов согласно табл. 1 приведены в табл. 2.

Анализируя табл. 2, можно сделать следующие выводы:

1) Наибольшие отклонения гирлянд изоляторов бывают не при наибольшей разности в дли-

Таблица 1

Приведенный пролет Y (м) в зависимости от длины пролета X

Провод АС-120						
Пролет X	25	50	100	125	150	200
Приведенный пролет	238	229	217	216	217	229

Провод АСУ-400						
Пролет X	45	90	180	225	270	360
Приведенный пролет	428	412	392	390	392	412

Таблица 2

Отклонение гирлянд изоляторов при температуре монтажа -20°C , 0°C и $+40^\circ\text{C}$

Длина пролета X , м Температура монтажа, $^\circ\text{C}$	Провод АС-120						Провод АСУ-400					
	25	50	100	125	150	200	45	90	180	225	270	360
-20	34	47	69	76	69	47	48	90	128	139	128	90
0	22	31	48	53	48	31	35	51	90	97	90	51
$+40$	37	58	92	97	92	58	58	105	168	182	168	105

из смежных пролетов, а при наименьшем значении приведенного пролета ($X = \frac{A}{2}$).

2. При температуре монтажа $+40^\circ\text{C}$ отклонения гирлянд изоляторов большие, а при температуре монтажа 0°C — меньшие.

Для провода марки АСУ-400 на рис. 2 даны приведенные пролеты и наибольшие отклонения гирлянд при температуре монтажа $+40^\circ\text{C}$.

Посмотрим, как изменяются отклонения гирлянд в зависимости от увеличения числа больших (50, 450 м), одинаковых пролетов.

Температуру монтажа примем $+40^\circ\text{C}$. Общее число пролетов между анкерными опорами возьмем равным 2, 5, 9 и 17. Числом небольших пролетов зададимся — одним и двумя. Пользуясь вышеприведенным способом, были определены длины небольших пролетов, при которых получаются наименьшие значения приведенных пролетов (табл. 3).

Таблица 3

Длина небольших пролетов, соответствующая минимуму приведенных пролетов

Число пролетов между анкерами		2	5	9	17
Небольшие пролеты	При одном пролете	$\frac{A}{2}$	$\frac{A}{1,81}$	$\frac{A}{1,78}$	$\frac{A}{1,75}$
	При двух пролетах	—	$\frac{A}{1,95}$	$\frac{A}{1,8}$	$\frac{A}{1,77}$

Числовые значения небольших пролетов и наибольшие отклонения гирлянд в зависимости от числа пролетов между анкерными опорами для

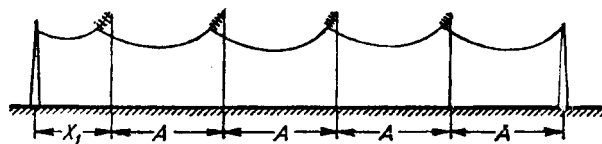


Рис. 3.

проводов марок АС-120 и АСУ-400 приведены в табл. 4.

Как следует из табл. 4, с увеличением числа пролетов между анкерными опорами от 2 до 17 отклонения гирлянд увеличиваются на 14...20%. Абсолютные значения отклонений гирлянд изоляторов при двух небольших пролетах больше, чем при одном пролете, приблизительно в 2 раза.

Рассмотрим еще один случай.

Возьмем пять пролетов между анкерными опорами (рис. 3) и будем последовательно изменять число небольших пролетов, принимая их одинаковыми. Длины постоянных пролетов A оставляем те же: для провода АС-120 — 250 м, для провода АСУ-400 — 450 м. Для данного случая минимумы приведенных пролетов получаются при значениях небольших пролетов X , указанных в табл. 5.

Наибольшие отклонения гирлянд изоляторов в зависимости от числа небольших пролетов для проводов марок АС-120 и АСУ-400 приведены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что с увеличением числа небольших пролетов отклонения гирлянд изоляторов сначала возрастают, затем уменьшаются. И в данном случае наибольшее отклонение гирлянд изоляторов не соответствует наибольшей разности в смежных пролетах.

Таблица 4

		Число пролетов между анкерами	2	5	9	17
Провод АС-120	Длина небольших пролетов, м	При одном пролете	125	138	140	143
		При двух пролетах	—	128	139	141
	Наибольшие отклонения гирлянды, мм	При одном пролете	97	114	118	119
		При двух пролетах	—	207	220	236
Провод АСУ-400	Длина небольших пролетов, м	При одном пролете	225	249	253	257
		При двух пролетах	—	230	250	254
	Наибольшие отклонения гирлянды, мм	При одном пролете	182	208	212	216
		При двух пролетах	—	376	408	428

Таблица 5

Длина небольших пролетов, соответствующая минимуму приведенных пролетов

Сочетание пролетов		$X_1 + 4A$	$2X + 3A$	$3X_2 + 2A$	$4X_4 + A$
Длина небольших пролетов, м	Провод АС-120	138	128	66	30
	Провод АСУ-400	249	230	118	54

Таблица 6

Наибольшие отклонения гирлянд изоляторов в зависимости от числа небольших пролетов
(монтаж при $\vartheta = +40^\circ \text{C}$, внешние условия $\vartheta = -40^\circ \text{C}$)
Провод АС-120

Сочетание пролетов, м	138+4,250	2,128+3,250	3,66+2,250	4,30+250
Наибольшие отклонения гирлянд, мм . .	114	207	202	128

Провод АСУ-400

Сочетание пролетов, м	249+4,450	2,230+3,450	3,118+2,450	4,54+450
Наибольшие отклонения гирлянд, мм . .	208	380	380	244

Определим углы отклонений α .

Предполагаем, что провод марки АС-120 монтирован на линиях напряжением 35 и 110 кВ с длинами гирлянд изоляторов соответственно $\lambda_{35} = 95 \text{ см}$, $\lambda_{110} = 145 \text{ см}$; провод марки АСУ-400 монтирован на линии 220 кВ с длиной гирлянды изоляторов $\lambda_{220} = 275 \text{ см}$.

Угол α (табл. 7) получим из соотношения

$$\sin \alpha = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (5)$$

где δ — отклонение гирлянды (табл. 4); λ — ее длина.

Таблица 7

Угол отклонения гирлянд изоляторов

Напряжения, кВ . . .	35	110	220
Угол	14°25'	9°25'	9°

Полученные углы отклонения значительно меньше угла, характерного для работы выпускающих зажимов (30—40°).

Рассмотреть все случаи сочетаний больших и малых пролетов, которые могут встретиться в практике проектирования, очевидно, не представляется возможным, но и из разобранных выше случаев можно сделать следующие выводы.

Выводы. 1. Наибольшее отклонение гирлянды изоляторов не соответствует наибольшей разности в длинах смежных пролетов.

2. Наибольшее отклонение гирлянд изоляторов имеет место при температуре монтажа проводов $+40^\circ \text{C}$ и внешних условиях $\vartheta = -40^\circ \text{C}$.

3. Стремясь уменьшить отклонения гирлянд, следует монтаж проводов производить ближе к 0°C .

4. Абсолютные отклонения гирлянд изоляторов получаются настолько небольшими, что вызывают сомнение в необходимости применения глухих зажимов, утяжеляющих промежуточные опоры. Во всяком случае для разобранных примеров применять глухие зажимы не следует.

В заключение для иллюстрации метода определения отклонений гирлянд изоляторов разберем один несложный числовой пример.

Пример. Для участка линии 220 кВ, состоящего из трех пролетов между анкерными опорами, с проводами марки АСУ-400 (рис. 4), требуется определить наибольшие откло-

нения гирлянд изоляторов. Климатические условия местности, где будет сооружаться линия, соответствуют II району гололедности.

Для провода АСУ-400 имеем: удельные нагрузки провода $g_1 = 3,71 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м/мм}^2$; $g_7 = 5,92 \cdot 10^{-3}$; коэффициенты температурного линейного расширения и растяжения $\alpha_t = 18,43 \cdot 10^{-6}$; $\beta_0 = 113 \cdot 10^{-6}$; наибольшее фиктивное напряжение при $\vartheta = -5^\circ \text{C}$, $\sigma = 10,4 \text{ кг/мм}^2$; критический пролет $l_k = 354 \text{ м}$.

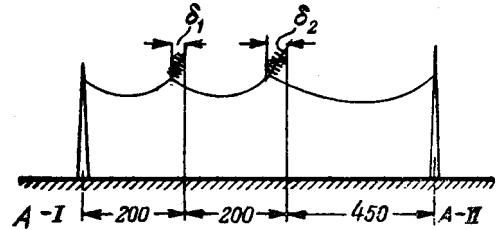


Рис. 4.

Определим приведенный пролет:

$$l_o = \sqrt{\frac{200^3 + 200^3 + 450^3}{200 + 200 + 450}} = 355 \text{ м}.$$

Найдем напряжения провода при $\vartheta = -40^\circ \text{C}$ и $\vartheta = +40^\circ \text{C}$:

$$\sigma_{-40} = \frac{355^2 \cdot (3,71 \cdot 10^{-3})^2}{24 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma_{+40}^2} = 10,4 - \frac{355^2 \cdot (5,92 \cdot 10^{-3})^2}{24 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot 10,4^2} -$$

$$- \frac{18,43 \cdot 10^{-6}}{113 \cdot 10^{-6}} (-40 + 5),$$

$$\sigma_{-40} \approx 8,95 \text{ кг/мм}^2,$$

$$\sigma_{+40} = \frac{355^2 \cdot (3,71 \cdot 10^{-3})^2}{24 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma_{+40}^2} = 10,4 - \frac{355^2 \cdot (5,92 \cdot 10^{-3})^2}{24 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot 10,4^2} -$$

$$- \frac{18,43 \cdot 10^{-6}}{113 \cdot 10^{-6}} (40 + 5); \quad \sigma_{+40} \approx 5,95 \text{ кг/мм}^2.$$

Определим наибольшие отклонения гирлянд изоляторов при температуре монтажа проводов $+40^\circ \text{C}$. Наибольшие отклонения гирлянд изоляторов будут при наступлении температуры $\vartheta = -40^\circ \text{C}$.

Пользуясь системой уравнений (2), найдем изменение длины первого пролета.

Пролет 200 м ($\vartheta = -40^\circ \text{C}$):

$$8,95 - \frac{200^2 \cdot (3,71 \cdot 10^{-3})^2}{24 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot 8,95^2} = 5,95 - \frac{200^2 \cdot (3,71 \cdot 10^{-3})^2}{24 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot 5,95^2} -$$

$$- \frac{18,43 \cdot 10^{-6}}{113 \cdot 10^{-6}} (-40 - 40) + \frac{\Delta l_1}{200 \cdot 113 \cdot 10^{-6}}.$$

Решая уравнение, находим $\Delta I_1 = -0,155$ м. Во втором пролете получим также $\Delta I_2 = -0,155$ м.

Определим изменение пролета $I_3 = 450$ м, пользуясь одним из уравнений системы (2).

Пролет 450 м ($\theta = -40^\circ$ С):

$$8,95 - \frac{450^2 \cdot (3,71 \cdot 10^{-3})^2}{24 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot 8,95^2} = 5,95 - \frac{450^2 \cdot (3,71 \cdot 10^{-3})^2}{24 \cdot 113 \cdot 10^{-6} \cdot 5,95^2} -$$

$$-\frac{18,43 \cdot 10^{-6}}{113 \cdot 10^{-6}} (-40 - 40) + \frac{\Delta I_3}{450 \cdot 113 \cdot 10^{-6}}.$$

Решая уравнение, находим $\Delta I_3 = 0,316$ м.

Произведем проверку:

$$\Sigma \Delta I = -0,155 - 0,155 + 0,316 \approx 0.$$

Отклонение гирлянды изоляторов на первой промежуточной опоре: $\delta_1 = \Delta I_1 = -0,155$ мм. Отклонение гирлянды изоляторов на второй промежуточной опоре: $\delta_2 = \Delta I_1 + \Delta I_2 = -0,155 - 0,155 = -0,31$ м. Наибольшее отклонение гирлянды изоляторов получили равным 310 мм.

Угол α определим из соотношения:

$$\sin \alpha = \frac{\delta_2}{\lambda_{220}} = \frac{310}{2750} = 0,1125,$$

$$\alpha = 6^\circ 30'.$$

Литература

1. Н. П. Виноградов, Метод расстановки опор по профилю линии электропередачи в случае применения подвесных изоляторов. Электричество, № 1, 1931.

[2. 12. 1952]



Включение генераторов сельских электростанций на параллельную работу способом самосинхронизации

Кандидат техн. наук И. И. КОДКИНД

Всесоюзный научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ)

Включение генераторов на параллельную работу до сих пор являлось одной из наиболее сложных и ответственных эксплуатационных операций на электростанциях. Операция проводилась способом «точной синхронизации» и ее сложность заключалась в том, что к моменту включения генератора необходимо было подогнать его режим с большой точностью к режиму сети по трем параметрам: по частоте, величине и фазе напряжения.

На сельских электростанциях в ряде случаев отсутствуют автоматические регуляторы скорости, отдельные крупные электродвигатели у потребителя бывают соизмеримы с мощностью электростанций, в результате частота колеблется даже в нормальных режимах, что затрудняет подгонку частоты и фазы включаемого генератора к частоте и фазе напряжения сети. На ряде электростанций отсутствует дистанционное включение выключателей, что также осложняет правильный выбор момента включения генератора на параллельную работу.

Включение генераторов на параллельную работу способом точной синхронизации тормозит автоматизацию сельских электростанций, так как для подгонки режима генератора к режиму сети по трем параметрам необходима сложная и дорогая аппаратура. Указанные недостатки включения генераторов на параллельную работу исключаются при проведении этой операции способом самосинхронизации.

Способ самосинхронизации генераторов заключается в том, что генератор включается на

Рассмотрены вопросы включения на параллельную работу генераторов сельских электростанций. Показано, что в условиях эксплуатации сельских электростанций целесообразно широко внедрение способа самосинхронизации. Показано, что внедрение способа самосинхронизации не лимитируется толчками тока и понижениями напряжения. Приведены результаты экспериментальных исследований и схемы внедряемых устройств.

сеть невозбужденным, примерно при синхронной скорости, по включению генератор возбуждается и сам втягивается в синхронизм. Включение генератора возможно при разности частот генератора и сети до нескольких герц.

Помимо исключения необходимости в тщательном выборе момента включения генератора достоинством способа самосинхронизации также является и то, что он позволяет применить простейшую аппаратуру для автоматизации операции включения генератора на параллельную работу, реагирующей только на один параметр — разность частот.

При включении генератора на параллельную работу способом самосинхронизации неизбежны толчки тока и кратковременное понижение напряжения сети. Величина толчков тока и степень понижения напряжения, как и сам процесс самосинхронизации, зависят от параметров и режимов включаемого и работающих генераторов и связи между ними.

При подключении генераторов на сборные шины, самосинхронизация широко рекомендовалась при условии, если периодическая составляющая тока, подсчитанная по переходной продольной реактивности, не более чем 3,5-кратна номинальному току генератора. Работы ВИЭСХ показали, что для генераторов, устанавливаемых на сельских электростанциях мощностью от нескольких десятков до нескольких тысяч киловатт, способ самосинхронизации можно рекомендовать вне зависимости от величины возможного толчка тока включения [Л. 4]. Толчок тока включения полу-

чается менее 3,5-кратного номинальному и самосинхронизация может быть рекомендована для всех генераторов сельских электростанций, так как мощность включаемого генератора соизмерима с мощностью работающих генераторов или подключение производится через повысительные трансформаторы.

В приводимой таблице указаны значения переходной продольной реактивности X'_d генератора для различных схем подключения, при которых наибольший толчок тока самосинхронизации достигает $3,5 I_{ном}$.

Переходная продольная реактивность X'_d , при которой толчок тока равен $3,5 I_{ном}$

Схема подключения генератора	Число работающих генераторов, каждый равный по мощности подключаемому		
	1	2	3
Через повысительный трансформатор	0,093	0,141	0,164
Непосредственно	0,143	0,191	0,214

Переходная продольная реактивность подавляющего большинства генераторов сельских электростанций больше 0,2...0,25, что превосходит табличные значения.

Для приближенной оценки величины и длительности понижения напряжения в начальный период самосинхронизации включение генератора можно рассматривать как короткое замыкание в точке подключения генератора на реактивное сопротивление, которое в момент включения равно продольной переходной реактивности генератора X'_d и возрастает с постоянной времени переходного процесса по продольной оси генератора при замкнутом статоре T'_d до синхронной реактивности генератора X_d . Проведенные, исходя из этого положения, расчеты дают понижения напряжения, меньшие по сравнению с возможным в действительности.

Для генераторов сельских электростанций постоянная времени переходного процесса по продольной оси генератора при разомкнутом статоре T'_{d0} составляет 1...2 сек. Применительно к самосинхронизации постоянная времени переходного процесса при замкнутом статоре получается равной от 0,2 до 0,6 сек, таким образом, реактивное сопротивление включаемого генератора через время порядка не более 0,5 сек доходит до значения около 0,7 X_d .

Наименьшие напряжения на шинах включаемого генератора получаются при его самосинхронизации на генератор равной мощности через длинную линию электропередачи. Приближенные расчеты для включения способом самосинхронизации генераторов 250 и 1000 кВа через линию 6 кв длиной 20 км на генератор равной мощности показали, что напряжение на шинах включаемого генератора, спустя не более 0,5 сек, восстанавливается до значений, превосходящих 0,7 номинального.

ВИЭСХ провел исследование процесса самосинхронизации на ряде действующих сельских электростанций. Осциллографировался процесс самосинхронизации при включении различных типов генераторов мощностью от 30 до 250 кВа на генераторы соизмеримой мощности и на мощную энергосистему. Включения производились в условиях: а) когда включаемый генератор подключался на общие шины с работающими; б) при связи между ними в виде линий длиной от 6 до 27 км на 6 кв. При самосинхронизации использовались различные схемы гашения поля возбуждателя и непосредственного гашения поля генератора.

Анализ осциллограмм показал, что наибольшее время восстановления напряжения при самосинхронизации генераторов получается при включении на генераторы соизмеримой мощности через линию электропередачи в тех случаях, когда на включаемом генераторе использовались схемы гашения поля возбуждателя. Время полного восстановления напряжения, как правило, не превышало 6 сек. В этих условиях на время восстановления напряжения существенно влияет скорость нарастания возбуждения на включаемом генераторе. Вводя при самосинхронизации форсировку возбуждения, удалось снизить время полного восстановления напряжения до 2...3 сек. На рис. 1 дана типичная осциллограмма самосинхронизации генератора при использовании гашения поля возбуждателя без форсировки возбуждения, а на рис. 2 — то же с форсировкой возбуждения.

В тех случаях, когда мощность включаемого генератора значительно меньше мощности работающих и связь между ними относительно жесткая, что характерно для сельских электросистем, время полного восстановления напряжения составляло 2...3 сек и практически не зависело от скорости нарастания возбуждения включаемого генератора.

Из анализа большого числа осциллограмм также следует, что в подавляющем большинстве

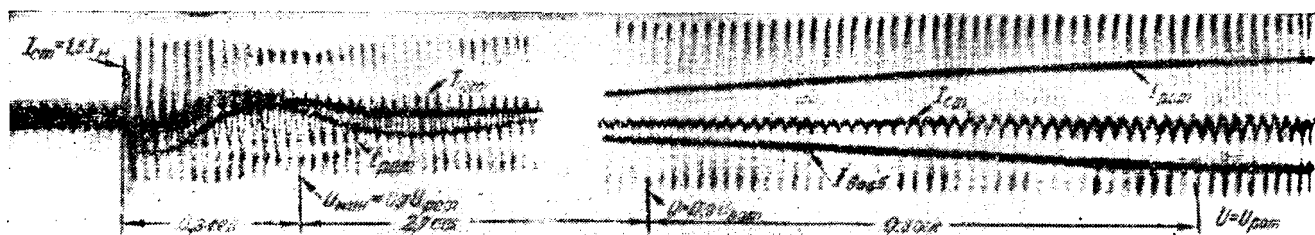


Рис. 1.

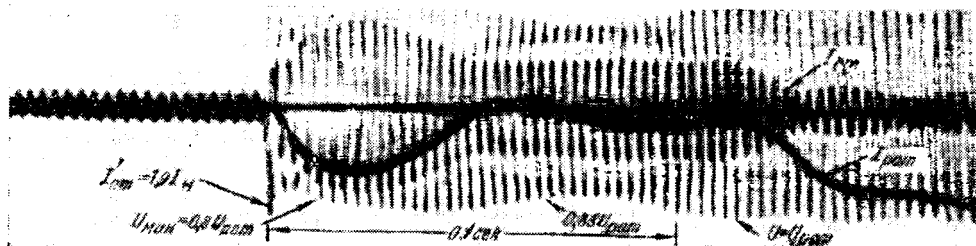


Рис. 2.

случаев наименьшие напряжения на шинах генератора при его самосинхронизации составляют 0,7...0,8 рабочего. Такое напряжение наблюдается в интервале не более 0,5 сек после включения. Только в двух случаях из 50 наименьшее напряжение достигло 0,58 и 0,6 рабочего, причем оно установилось до 0,75 рабочего через 0,5 сек. Таким образом, экспериментальные данные дают тот же порядок понижения напряжения при самосинхронизации, что и приближенные расчеты.

Для анализа поведения электродвигателей при понижении напряжения, вызванного процессом самосинхронизации, использована отобранная из многочисленных испытаний кривая восстановления напряжения, дающая наименьшие напряжения и наибольшую длительность восстановления напряжения до 0,7...0,75 рабочего (включение генератора 150 кВА на генератор равной мощности через линию 6 кВ длиной 16 км). Был рассмотрен наиболее тяжелый режим работы электродвигателя — привод механизма с постоянным противодействующим моментом. Расчеты показали, что к моменту восстановления напряжения до 0,7 номинального выбег электродвигателя прекращается, скольжение к этому моменту не достигает критического. Таким образом, в условиях эксплуатации сельских электроустановок самосинхронизация генераторов не приводит к нарушению устойчивой работы электродвигателей. ВИАЭСХ в 1950—1951 гг. на ряде сельских электростанций внедрил ручную и полуавтоматическую самосинхронизацию.

На рис. 3 дана схема ручной самосинхронизации низковольтных генераторов на двухагрегат-

ной сельской гэс. В качестве измерителя разности частот использована лампа на 26 в, включенная на напряжения биений между частью напряжения сети и остаточным напряжением генератора, включаемого на параллельную работу. Схема измерения разности частот при самосинхронизации помощью низковольтных ламп (6, 12, 26 в) может быть применена на всех низковольтных генераторах, когда их остаточное напряжение составляет величину порядка 5...30 в. Порядок проведения ручной самосинхронизации по схеме рис. 3 следующий:

1. Перед пуском генератора выключатель схемы самосинхронизации КСС ставят в положение «включено», маховичок шунтового реостата — в положение, обеспечивающее напряжение возбuditеля, равное от 1,1 до 1,5 напряжения возбuditеля, соответствующего рабочему напряжению генератора в режиме холостого хода¹.

2. Открывая направляющий аппарат турбины, медленно разворачивают агрегат и при частоте миганий лампы менее 1...3 в секунду убеждаются по вольтметру, что генератор не возбужден. После этого включают рубильник генератора. В течение нескольких секунд генератор втягивается в синхронизм.

3. Выключатель схемы самосинхронизации ставят в положение «отключено» и производят загрузку генератора активной и реактивной мощностью обычным порядком.

На рис. 4 дана схема полуавтоматической самосинхронизации, выполненная ВИАЭСХ на одной из двухагрегатных сельских электростанций. С незначительными изменениями и применительно к установленному оборудованию аналогичные рис. 4 устройства выполнены на ряде сельских электростанций. В качестве измерителя разности частот в схеме использовано реле разности частот типа ИРЧ². Проведенные ВИАЭСХ подробные испытания этого реле показали, что оно в полной мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым при работе в устройствах полуавтоматической и автоматической самосинхронизации на генераторах сельских электростанций. Последующая длительная эксплуатация устройств с реле этого типа подтвердила результаты испытания и

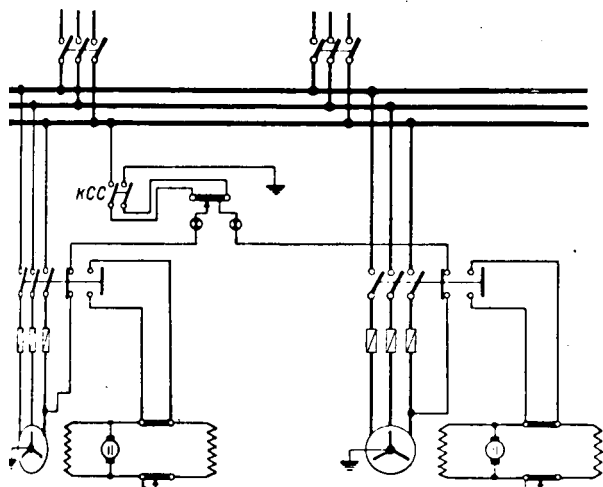


Рис. 3.

¹В зоне рабочих частот, которая принята для данной установки. Когда включение на параллельную работу может проводиться в большом диапазоне рабочих частот и напряжений, тогда рекомендуется намечать несколько уставок, соответственно разным частотам.

²Реле разработано ЦНИЭЛ МЭС на базе реле ИМБ-171/1 [Л. 3] и выпускается электропромышленностью под маркой ИРЧ-01.

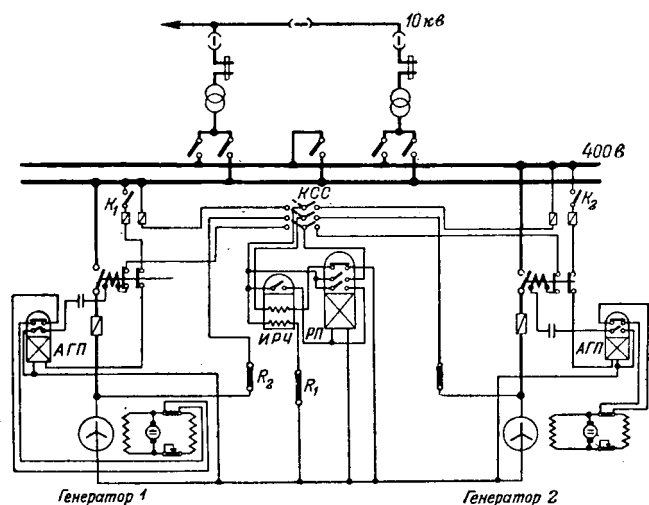


Рис. 4.

показала безотказную и надежную работу устройств. Так, за 1950—1951 гг. отдельные устройства успешно сработали по несколько сот раз.

На сельских электростанциях, где выполнены устройства по схеме рис. 4, включение генераторов проводилось ранее вручную. Для возможности автоматизации операции самосинхронизации к ручным приводам типа КАМ были выполнены грузовые устройства, а к автоматам — пружинные устройства, позволяющие производить однократное дистанционное включение после ручного завода устройства.

Операция самосинхронизации на выполненных устройствах производится в следующей последовательности. Переключатель КСС ставится в положение «самосинхронизация» генератора 1 или 2. Маховичок шунтового реостата ставится в положение в соответствии с указаниями, данными при рассмотрении схемы 3 ручной самосинхронизации. Заводится грузовое устройство ручного привода КАМ или пружинное устройство автомата. Медленно открывая направляющий аппарат турбины, разворачивают агрегат. Когда скорость вращения генератора достигнет значений, при которых его частота будет отклоняться от частоты сети не более чем 0,5...1 гц, реле ИРЧ замкнет контакты, сработает реле РП, генератор включится в сеть³. Одновременно сработает реле АГП,

³ При наличии обычного дистанционного управления коммутационной аппаратурой в цепь включения выключателя генератора необходимо ввести дополнительно импульсное реле, чтобы в случае срабатывания релейной защиты в момент самосинхронизации не произошло повторного включения выключателя генератора.

генератор возбуждётся и войдет в синхронизм. Далее переключатель КСС ставят в нейтральное положение и загружают генератор.

Выводы. 1. Для включения на параллельную работу генераторов сельских электростанций может быть рекомендован в качестве основного способ самосинхронизации генераторов. Эксплуатационные преимущества этого способа по сравнению со способом точной синхронизации на сельских электростанциях выявляются еще резче, чем на мощных электростанциях.

2. Проведенные расчеты и значительное число экспериментальных данных показывают, что для генераторов сельских электростанций способ самосинхронизации можно рекомендовать без проведения проверки величины возможного толчка тока.

3. Анализ процесса самосинхронизации на действующих сельских электростанциях генераторов разных типов, включаемых на параллельную работу в различных условиях, показывает, что: а) время полного восстановления напряжения при самосинхронизации не превышает 5...7 сек и его можно снизить до 2...3 сек введением форсировки возбуждения при самосинхронизации; б) наименьшее напряжение при самосинхронизации генераторов составляет 0,6...0,8 рабочего, причем оно восстанавливается до значений, не меньших 0,75...0,8, через 0,5 сек после включения генератора на параллельную работу. В этих условиях электродвигатели сохраняют устойчивую работу.

4. На сельских электростанциях, где генераторы включаются простыми рубильниками, рекомендуется осуществлять ручное включение по способу самосинхронизации, используя для замера разности частот лампы на напряжение 6, 12, 26 в.

5. В устройствах полуавтоматической и автоматической самосинхронизации рекомендуется в качестве датчика-измерителя использовать реле разности частот типа ИРЧ-01.

Литература

1. Л. Г. Мамиконян и И. А. Сыромятников. Включение синхронных генераторов на параллельную работу по способу самосинхронизации. Эл. станции, № 2, 1949.
2. А. Г. Крит и Л. Г. Мамиконян. Включение синхронных генераторов на параллельную работу по методу самосинхронизации. Сборник „Автоматизация и телемеханизация гидроэлектростанций“. Госэнергоиздат, 1950.
3. М. Г. Портной и Ю. М. Элькинд. Реле разности частот индукционного типа для самосинхронизации генераторов. Электричество, № 9, 1951.
4. Брошюра „Самосинхронизация синхронных генераторов мощностью до 3 000 квт“. Госэнергоиздат, 1952.

[5. 5. 1951]



Выбор способа пуска асинхронных с короткозамкнутым ротором и синхронных электродвигателей

Инж. М. В. ГРЕЙСУХ

ГПИ „Тяжпромэлектропроект“

Для огромного большинства нерегулируемых приводов — насосы, компрессоры, вентиляторы, воздухоудовки, мельницы и т. д. — широко применяются асинхронные электродвигатели с коротко-

замкнутым ротором, а в ряде случаев — синхронные двигатели с асинхронным пуском. Ограничением для применения этих двигателей являются большие пусковые токи, вызывающие перегрузку генераторов и трансформаторов и колебания напряжения в сети, влияющие на работу других потребителей, а при питании от сети ограниченной мощности — возможное снижение напряжения на зажимах пускаемого двигателя, при котором не обеспечивается его запуск.

Вместо непосредственного включения на полное напряжение сети, являющегося самым простым и надежным способом пуска, обеспечивающим наименьший нагрев обмотки двигателя, без достаточных оснований часто применяют пуск при пониженном напряжении, требующий установки дополнительного оборудования и усложняющий эксплуатацию. В ряде же случаев при мощности двигателя, соизмеримой с мощностью трансформатора или генератора, устанавливают асинхронные двигатели с фазным ротором, более сложные в изготовлении и менее надежные в эксплуатации, или отказываются от использования тихоходных синхронных двигателей, чем ухудшаются энергетические показатели установки.

Отсюда понятно, насколько важно иметь метод, позволяющий для заданных условий быстро и достаточно правильно определять допустимость непосредственного включения двигателя, а если прямой пуск недопустим, то выяснить, можно ли ограничиться реакторным пуском или необходимо применить более сложный способ пуска — автоматический.

При выборе способа пуска должны быть удовлетворены следующие условия:

1. Колебание напряжения в сети при пуске двигателя не должно влиять на нормальную работу присоединенных к той же сети потребителей.

2. Перегрузка трансформатора пусковыми токами не должна превышать определенного наперед заданного значения, зависящего от коэффициента заполнения графика, числа пусков в сутки и их длительности.

Предлагается метод выбора способа пуска двигателей в зависимости от значения «условной пусковой мощности», при котором для заданных параметров сети допустим прямой пуск, и выбора значения «максимальной пусковой мощности», при котором допустим реакторный пуск. Приводятся формулы и номограммы для случая питания двигателя от мощного источника.

3. Напряжение на зажимах пускаемого двигателя должно обеспечить, чтобы в процессе пуска его момент был больше момента сопротивления приводимого механизма и чтобы избыточный (дина-

мический) момент обеспечил длительность пуска, при которой нагрев обмотки двигателя не превосходил допускаемого значения.

Согласно данным трансформаторного завода им. Куйбышева при коэффициенте заполнения графика нагрузки 0,5...0,7, среднегодовой температуре окружающего воздуха до 12,5°С и трех пусках в сутки, длительностью каждый максимум 30 сек (что соответствует обычным условиям эксплуатации мощных агрегатов), допускается трех-четырёхкратная перегрузка трансформатора.

Таким образом, по условиям нагрева трансформатора, как правило, нет нужды ограничивать пусковой ток двигателя, так как пусковая мощность двигателя с короткозамкнутым ротором редко больше трехкратной номинальной мощности предварительно нагруженного трансформатора. При питании же двигателя от ненагруженного трансформатора допустимая его перегрузка пусковыми токами практически не ограничена.

Перегрузка трансформатора иногда ограничена необходимостью обеспечить селективную работу защиты сети. Однако, как правило, защита должна проектироваться с учетом максимально возможных пусковых токов короткозамкнутых двигателей большой мощности.

Для заданных параметров сети напряжение на зажимах и, следовательно, начальный момент двигателя, пропорциональный квадрату этого напряжения, при прямом пуске являются максимальными, и требуемый для разворачивания приводимого механизма динамический момент при прямом пуске двигателя, как правило, обеспечивается. Поэтому проверка начального момента двигателя необходима только при большой реактивности сети или при пуске через добавочное сопротивление.

Таким образом, основным условием, чаще всего ограничивающим применение прямого пуска двигателя, является сохранение на шинах питания уровня напряжения, достаточного для продолжения работы присоединенных к этим шинам потребителей и зависящего от характера присо-

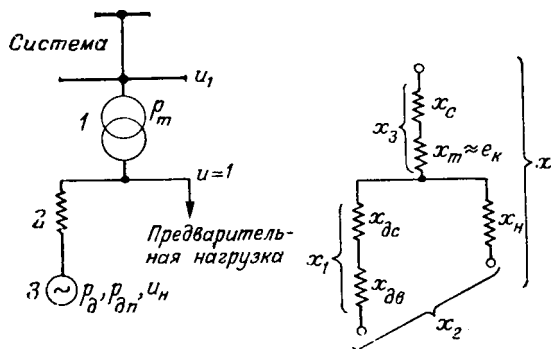


Рис. 1. Схема пуска двигателя от предварительно нагруженного трансформатора.

1 — понижительный трансформатор; 2 — добавочное сопротивление; 3 — электродвигатель.

единенных потребителей, частоты и длительности пуска двигателя.

Предел допустимого остаточного напряжения на шинах питания при раздельном питании силовой и осветительной нагрузок может быть принят равным 70...80% от номинального напряжения, а при совместном питании — 90% при частых пусках и 85% при редких и кратковременных пусках.

Для мощных быстроходных двигателей возможность прямого пуска иногда ограничивается тем, что возникающие при прямом пуске электродинамические усилия могут повредить лобовые части обмотки двигателей. Допустимый при пуске предел максимального напряжения на зажимах быстроходных двигателей указывается в каталогах или согласуется с заводом-изготовителем, при этом необходимо добиваться, чтобы этот предел был задан максимально возможным.

В статье рассматривается выбор способа пуска двигателя, питающегося от мощного источника, напряжение на шинах которого при включении двигателя практически остается постоянным.

Все расчеты произведены в относительных единицах. В качестве базисной принята номинальная мощность трансформатора, к которому присоединяется двигатель.

Пусковая мощность двигателя, отнесенная к мощности трансформатора,

$$p = \frac{P_{дн}}{P_m} \cdot \left(\frac{U_m}{U_n} \right)^2, \quad (1)$$

где $P_{дн}$ — пусковая мощность двигателя, ква;

P_m — номинальная мощность трансформатора, ква;

U_m — напряжение холостого хода трансформатора со стороны, к которой приводятся все сопротивления;

U_n — номинальное напряжение двигателя.

Рассмотрим общий случай пуска двигателя, питающегося от предварительно нагруженного трансформатора. Активными сопротивлениями всех элементов сети, мало влияющими на конечный результат расчетов, пренебрегаем. Схемы включения и замещения для этого случая показаны на рис. 1.

Эквивалентное сопротивление параллельно включенных пускаемого двигателя с добавочным сопротивлением и предварительной нагрузки трансформатора

$$x_2 = \frac{1}{\frac{1}{x_{дс} + \frac{1}{p}} + n_p}, \quad (2)$$

где $x_{дс}$ — добавочное реактивное сопротивление, включенное последовательно с двигателем и состоящее из постоянно включенных сопротивлений — реактора, линии передачи, блок-трансформатора и т. д.; n_p — реактивная составляющая предварительной нагрузки трансформатора:

$$n_p = \frac{P_n}{P_m} \sin \varphi_n.$$

При прямом пуске $x_{дс} = 0$, и формула (2) примет вид:

$$x_2' = \frac{1}{p + n_p}. \quad (3)$$

Общее сопротивление сети при пуске двигателя

$$x = x_2 + x_m + x_c = x_2 + x_3, \quad (4)$$

где $x_m \approx e_k$ — реактивное сопротивление трансформатора;

$x_c \approx \frac{P_m}{P_c}$ — реактивное сопротивление системы;

P_c — мощность короткого замыкания на шинах первичной стороны подстанции, от которой питается двигатель, ква.

Как указывалось выше, выбор способа пуска двигателя определяется тремя условиями.

Условие 1 будет удовлетворено, если остаточное напряжение на шинах при пуске двигателя будет не ниже заданной величины u' , выраженной в долях единицы. Напряжение на шинах источника питания u_1 будет выше напряжения u на шинах вторичной стороны подстанции, принимаемого равным единице, на величину падения напряжения в трансформаторе и сети

$$u_1 = 1 + x_3 \sin \varphi_n. \quad (5)$$

Значения u_1 при $\cos \varphi_n = 0,8$ для разных значений x_3 следующие [Л. 1]:

x_3	0	0,05	0,075	0,1	0,15	0,20	0,25
u_1	1	1,03	1,04	1,06	1,09	1,13	1,16

Для большинства нормальных трехфазных трансформаторов средней мощности с первичным напряжением 3 ... 35 кВ реактивное сопротивление $x_m = 0,055 \dots 0,065$, а сопротивление системы $x_c = 0,02 \dots 0,01$, поэтому среднее значение напряжения u_1 можно принять равным 1,04.

По условию 1 остаточное напряжение на шинах при пуске двигателя должно быть не ниже u' :

$$1,04 \frac{x_2}{x_2 + x_3} \geq u'.$$

Отсюда эквивалентное сопротивление, удовлетворяющее условию (1),

$$x'_2 = \frac{u'}{1,04 - u'} x_3. \quad (6)$$

По условию 2 кратность тока в трансформаторе при включении двигателя должна быть не выше заданной величины i

$$\frac{1,04}{x} \leq i.$$

Следовательно, условие 2 будет удовлетворено, если

$$x'_2 \geq \frac{1,04}{i} - x_3. \quad (7)$$

Подставляя значения x_2 из (6) и (7) в формулу (3), получим значения "условной пусковой мощности" (p_0), для которой при заданных параметрах сети допустим прямой пуск двигателя:

для условия 1

$$p_{01} = \frac{1,04 - u'}{u'} \cdot \frac{1}{x_3} - n_p; \quad (8)$$

для условия 2

$$p_{02} = \frac{1}{\frac{1,04}{i} - x_3} - n_p. \quad (9)$$

При $p_{01} < p_{02}$ способ пуска двигателя следует выбирать, исходя из условия 1, а при $p_{01} > p_{02}$ — из условия 2.

Прямой пуск двигателя допустим в том случае, если его пусковая мощность p меньше или равна условной пусковой мощности:

$$p \leq p_{01} \quad \text{или} \quad p \leq p_{02}.$$

Если двигатель присоединен к шинам через линию с реактивностью x_a и на питающей линии установлен реактор с реактивностью x_p , то условная пусковая мощность $p_{01(02)}$, при которой допустим прямой пуск двигателя,

$$p'_{01(02)} = \frac{1}{\frac{1}{1 - x'_{\partial c}} - x'_{\partial c}}, \quad (10)$$

где $x'_{\partial c}$ — сумма сопротивлений линии и реактора.

Если пусковая мощность двигателя p больше условной пусковой мощности $p_{01(02)}$, определенной по формулам (8) или (9), то для ограничения пускового тока последовательно с двигателем необходимо включить добавочное реактивное сопротивление $x_{\partial c}$, значение которого должно быть выбрано с таким расчетом, чтобы сумма сопротивлений двигателя и добавочного сопротивления удовлетворяла следующему условию:

$$\begin{aligned} x_{\partial c} + x_{\partial a} &\geq \frac{1}{p_{01(02)}}, \\ x_{\partial c} &\geq \frac{1}{p_{01(02)}} - \frac{1}{p}. \end{aligned} \quad (11)$$

Из двух значений условной пусковой мощности p_{01} и p_{02} принимается меньшее.

Выбранное для условия 1 или 2 добавочное сопротивление $x_{\partial c}$ должно удовлетворять также условию 3. Следовательно,

$$u'_n \geq \sqrt{\frac{m_{нач}}{m_{снач}}}, \quad (12)$$

где $m_{нач}$ — кратность начального момента двигателя;

$m_{снач}$ — начальный момент сопротивления механизма.

Так как при пуске напряжение на зажимах двигателя

$$u_{\partial n} = u' \frac{x_{\partial a}}{x_{\partial c} + x_{\partial a}} = 1,04 \frac{x_2}{x_2 + x_3} \cdot \frac{x_{\partial c}}{x_{\partial c} + x_{\partial a}},$$

то

$$1,04 \frac{x_2}{x_2 + x_3} \cdot \frac{x_{\partial c}}{x_{\partial c} + x_{\partial a}} \geq u'_n.$$

После преобразований получаем величину добавочного сопротивления $x_{\partial c3}$, удовлетворяющую условию 3,

$$x_{\partial c3} \leq \frac{\frac{1,04}{u'_n \cdot p} - x_3}{1 + x_3 n_p} - \frac{1}{p}. \quad (12)$$

Приравняв определенные по формулам (11) и (12) значения $x_{\partial c}$, получим максимальную пусковую мощность двигателя p_m , при которой для заданных параметров сети еще допустим реакторный пуск,

$$p_m \approx \frac{1}{u'_n \left(\frac{1}{p_{01(02)}} + x_3 \right)}, \quad (13)$$

причем в формуле (13) принимается меньшее из значений p_{01} и p_{02} . Если пусковая мощность двигателя $p > p_m$, то реакторный пуск недопустим и необходимо применить пуск с помощью автотрансформатора. При автотрансформаторном пуске пусковая мощность двигателя

$$p_{am} = u_{am}^2 p, \quad (14)$$

где u_{am} — напряжение на ответвлении автотрансформатора.

Так как p_{am} должна быть не выше пусковой мощности $p_{01(02)}$, при которой еще допустим прямой пуск (реактивным сопротивлением автотрансформатора можно пренебречь),

$$u_{am}^2 \cdot p \leq p_{01(02)},$$

то напряжение автотрансформатора

$$u_{am} \leq \sqrt{\frac{p_{01(02)}}{p}}; \quad (15)$$

в формулу (15) подставляется меньшее из значений p_{01} и p_{02} , определяемых по формулам (8) и (9).

Если между двигателем и шинами включены реактор и линия, то вместо $p_{01(02)}$ берется значение $p'_{01(02)}$, определяемое по формуле (10)

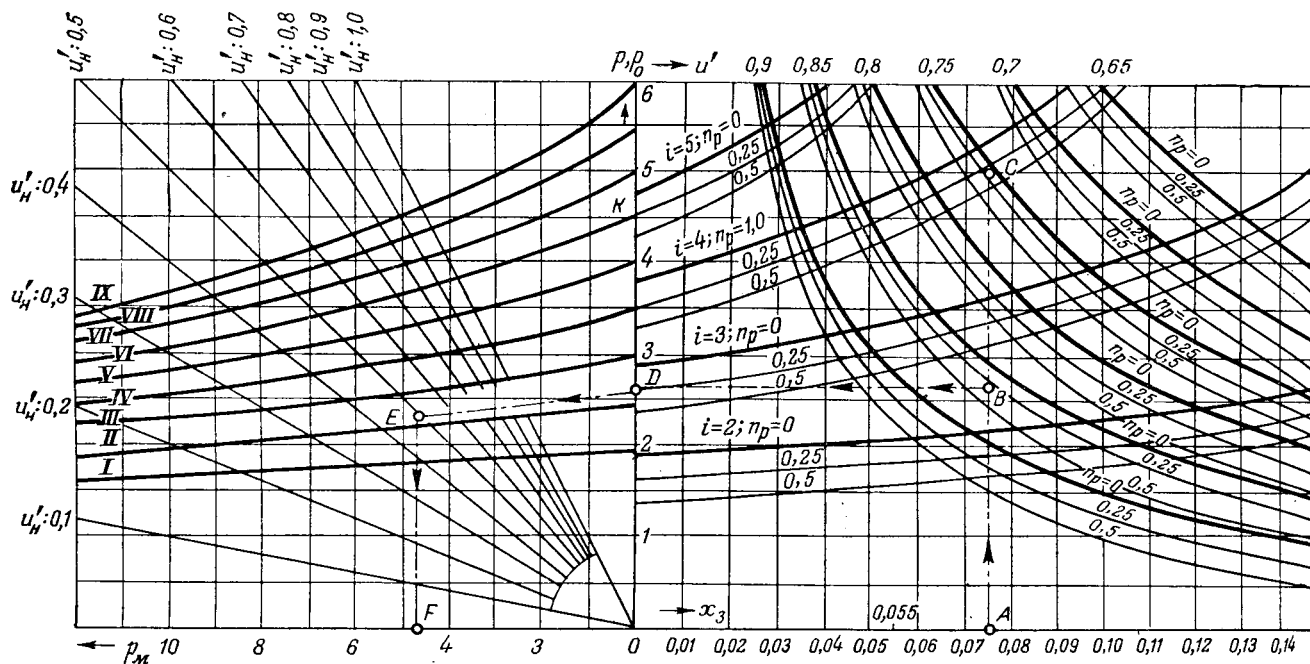


Рис. 2. Номограмма для выбора способа пуска двигателя.

На рис. 2 дана номограмма для выбора способа пуска двигателя, построенная по приведенным выше формулам. Порядок пользования номограммой выясним на примере.

Пример 1. Синхронный двигатель 6 кв, 500 квт питается от трансформатора 35/6,3 кв, 1 000 кв, $e_k = 0,065$, реактивная нагрузка которого равна 30%. Пусковая мощность двигателя равна 4 100 кв, а отнесенная к мощности трансформатора

$$p = \frac{4\,100}{1\,000} \cdot \left(\frac{6,3^2}{6}\right) = 4,5.$$

Начальный момент двигателя равен 1,2, а начальный статический момент приводимого механизма 0,3, так что напряжение на зажимах двигателя при пуске должно быть не ниже $\sqrt{\frac{0,3}{1,2}} = 0,5$.

Мощность короткого замыкания на шинах первичной стороны подстанции равна 100 000 кв, следовательно, сопротивление системы составляет $\frac{1\,000}{100\,000} = 0,01$, а общее сопротивление системы и трансформатора 0,075.

Следует выбрать способ пуска двигателя, если остаточное напряжение на шинах 6 кв при пуске двигателя u' должно быть не ниже 0,85, а нагрузка трансформатора i — не выше 4.

Решение. В точке A, соответствующей $x_3 = 0,075$, восстанавливаем перпендикуляр до пересечения в точке B с кривой $u' = 0,85$, $n_p = 0,3$ и в точке C с кривой $i = 4$; $n_p = 0,3$. Из нижней точки B проводим горизонтальную линию до пересечения в точке D с осью ординат, на которой нанесены значения пусковой мощности двигателя p и условной пусковой мощности p_o .

Точка D соответствует значению $p_o = 2,7$, которое меньше $p = 4,5$, и прямой пуск недопустим.

Для определения допустимости реакторного пуска из точки D проводим линию, параллельную кривой II, до пересечения с лучом $u'_H = 0,5$ в точке E. Из точки E опускаем перпендикуляр до пересечения с осью абсцисс в точке F, соответствующей максимальной мощности $p_m = 4,8$.

Так как $p_m > p$, то реакторный пуск допустим. По формуле (11) реактивность реактора в относительных единицах

$$x_{dc1} = \frac{1}{p_{01}} - \frac{1}{p} = \frac{1}{2,7} - \frac{1}{4,5} \approx 0,15$$

или

$$x_{dc1} = x_{dc1} \cdot \frac{u_m^2}{p_m} \cdot 10^3 = 0,15 \cdot \frac{6^2}{1\,000} \cdot 10^3 = 5,4 \text{ ом.}$$

Для пуска низковольтных двигателей вместо реактивного часто применяется активное сопротивление.

Формулы для определения значений p_{01} , p_{02} и p_m для этого случая мало отличаются от приведенных выше формул.

Величина же активного сопротивления

$$r_{dc} \approx \sqrt{\frac{1}{p_{01(02)}^2} - \frac{1}{p^2}}. \quad (16)$$

На рис. 3 дана номограмма для определения p_{01} , p_{02} и p_m для случая пуска низковольтного двигателя через активное сопротивление. Реактивностью высоковольтной сети x_c в этом случае можно пренебречь; реактивность трансформатора принята 0,055.

Пример 2. Двигатель с короткозамкнутым ротором 380 в 50 квт питается от трансформатора 6 000/400 в, 100 кв, предварительная реактивная нагрузка которого в относительных единицах 0,3.

Пусковая мощность двигателя 540 кв, а отнесенная к мощности трансформатора $p = \frac{540}{100} \left(\frac{400^2}{380^2}\right) = 6,0$.

Начальный момент двигателя 1,4, начальный статический момент механизма 0,35, так что напряжение на зажимах двигателя при пуске должно быть не ниже $\sqrt{\frac{0,35}{1,4}} = 0,5$.

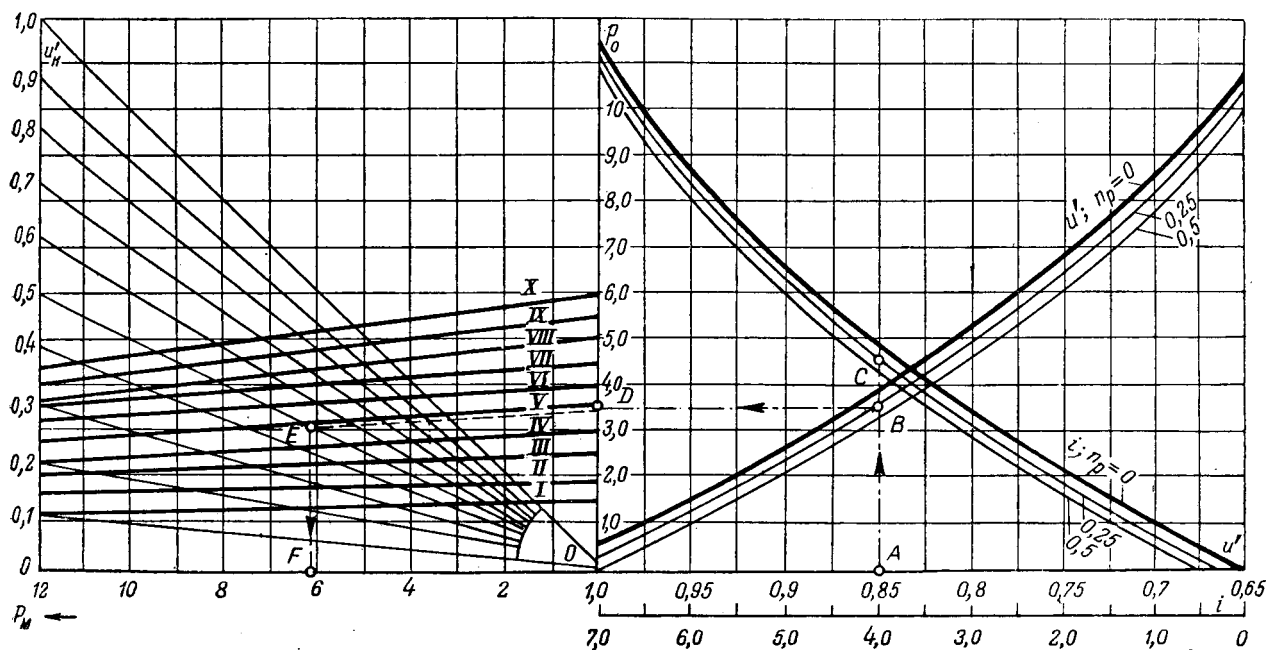


Рис. 3. Номограмма для выбора способа пуска низковольтного двигателя (пуск через активное сопротивление).

Следует выбрать способ пуска двигателя для тех же условий, что в примере 1.

Решение. В точке A, соответствующей $u' = 0,85$ и $i = 4$, восставляем перпендикуляр до пересечения в точке B с кривой $u' = 0,85$; $p_p = 0,3$ и с кривой $i = 4$; $p_p = 0,3$ в точке C.

Из нижней точки B проводим горизонталь до пересечения с осью ординат в точке D, соответствующей условной пусковой мощности $p_{01} = 3,57$. Так как $p > p_{01}$, то прямой пуск недопустим.

Для определения допустимости пуска путем последовательного включения с двигателем активного сопротивления из точки D проводим линию, параллельную линии V, до пересечения с лучом $u'_n = 0,5$ в точке E. Из этой точки опускаем перпендикуляр до пересечения с осью абсцисс в точке F, соответствующей максимальной мощности $p_m = 6,1$. Так как $p_m > p$, то пуск через активное сопротивление допустим.

По формуле (16) величина добавочного сопротивления

$$r_{dc} = \sqrt{\left(\frac{1}{3,57}\right)^2 - \left(\frac{1}{6,0}\right)^2} = 0,226$$

или

$$r_{dc} = 0,226 \cdot \frac{0,42}{100} \cdot 10^3 = 0,327 \text{ ом.}$$

С учетом активного сопротивления кабеля добавочное активное сопротивление

$$r_{dc} = 0,327 - 0,25 \cdot 0,5 \approx 0,2 \text{ ом,}$$

где 0,5 — активное сопротивление в омах 1 км кабеля $3 \times 35 \text{ мм}^2$.

Литература

И. А. Сыромятников. Режимы работы асинхронных двигателей, Госэнергоиздат, 1950.

[5.9.1952]



Метод расчета результирующего полезного потока в машинах постоянного тока при нагрузках и перегрузках

Кандидат техн. наук, доц. А. В. БАШАРИН

Ленинградский электротехнический институт им. Ленина

Вопросу расчета результирующего полезного магнитного потока в машинах постоянного тока

с учетом размагничивающего действия поперечной реакции якоря посвящен ряд работ. Задача заключается в том, чтобы найти зависимость среднего значения результирующего полезного магнитного потока, пронизывающего якорь машины, от тока якоря.

Рекомендуемые различными авторами методы либо громоздки, либо пригодны для вполне определенных интервалов изменения нагрузки. Известный графический метод Арнольда [Л. 1] требует кропотливого построения криволинейных треугольников и последующего планиметрирования. Графоаналитический метод „глазомерной“ замены криволинейных треугольников прямолинейными с последующим аналитическим вычислением результирующего потока, предложенный В. Т. Касьяновым [Л. 2], также требует достаточно большого количества различных графических построений для малых и больших нагрузок. Метод Г. Н. Петрова [Л. 3] удобен, но применим для случаев малых нагрузок.

Аналитический метод, предложенный Л. М. Шильдинером [Л. 4], применим только в случае больших перегрузок и требует также некоторых графических построений. Метод дает достаточно точные результаты, если точка холостого хода лежит на насыщенной части характеристики холостого хода (или переходной характеристики).

Предлагаемый ниже метод расчета результирующего полезного потока, пронизывающего якорь, не уступает по точности предложенным ранее, более прост и пригоден для любых нагрузок как малых так и больших.

Для рассмотрения метода и вывода основных соотношений воспользуемся переходной характеристикой машины — зависимостью индукции B_δ в воздушном промежутке δ от суммарной н. с. $F_{z+\delta}$ зубцов и воздушного промежутка на один полюс. В дальнейшем для удобства будем пользоваться зависимостью потока Φ от $F_{z+\delta}$. Допустим, что задано значение потока Φ_0 при холостом ходе.

Предлагается метод расчета результирующего полезного потока в машинах постоянного тока с учетом размагничивающего действия поперечной реакции якоря.

а также известна соответствующая ему н. с. F_0 в зубцовом слое и воздушном промежутке.

Предположим, что требуется проследить изменение величины результирующего полезного потока при изменении н. с. реакции якоря в пределах от нуля до F_a . На переходной характеристике этот интервал определится точками b и c (рис. 1).

Эти точки отстоят от точки F_0 (точка q) на $\frac{F_a}{2}$.

Под F_a следует понимать часть полной н. с. поперечной реакции якоря, действующей под полюсным наконечником, и определяемую соотношением

$$F_a = \alpha F_{aq} = Ab_i, \quad (1)$$

где b_i — расчетная длина полюсной дуги;

$A = \frac{NI_a}{\pi D \cdot 2a}$ — линейная нагрузка якоря.

В этом случае линия bac определит закон распределения магнитного потока под полюсом.

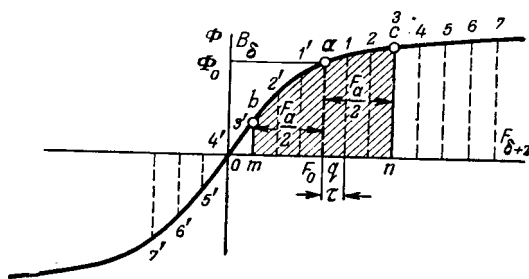


Рис. 1.

Принимая точку q (ордината aq), соответствующую $F = F_0$ ($F_a = 0$), за начало отсчета, разобьем участки ac и ab на ряд равных интервалов числом n по оси абсцисс так, чтобы длина каждого интервала

$$\tau = \frac{on - oq}{n} = \frac{oq - om}{n}.$$

Площадь, ограниченная участком bac переходной характеристики, вертикалями bm и cn и осью абсцисс, пропорциональна Φ — результирующему по-

ному потоку и может быть представлена двумя интегралами:

$$\int_0^{n\tau} f(x) dx + \int_{-n\tau}^0 f(x) dx = \int_{-n\tau}^{+n\tau} f(x) dx,$$

где n — число интервалов на участках ba и ac .

При данном значении F_a среднее значение ординаты этой площади, определяющее средний результирующий поток, будет:

$$\bar{f}(x) = \frac{1}{2n\tau} \int_{-n\tau}^{+n\tau} f(x) dx = \frac{1}{2n\tau} \left(\int_0^{+n\tau} f(x) dx + \int_{-n\tau}^0 f(x) dx \right). \quad (2)$$

Если через $\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ обозначить значения функции $f(x)$ (в нашем случае потока возбуждения Φ) соответственно при значениях аргумента $x = x_0; x_1 = x_0 + \tau; x_2 = x_0 + 2\tau; \dots; x_n = x_0 + n\tau$ (в нашем случае $x_0 = F_0$, а $x_1 = F_0 + \Delta F_a$ и т. д.), а через $\Phi'_0, \Phi'_1, \Phi'_2, \dots, \Phi'_n$ — значения функции $f(x)$ соответственно при значениях аргумента $x = x'_0; x'_1 = x_0 - \tau; x'_2 = x_0 - 2\tau; \dots; x'_n = x_0 - n\tau$, то, пользуясь формулой трапеции, для каждого из интегралов уравнения (2) можно написать следующее выражение для определения результирующего потока:

$$\Phi_{рез} = \frac{1}{2n\tau} \int_{-n\tau}^{+n\tau} f(x) dx \approx \frac{1}{2n} \left[\Phi_0 + \Phi_1 + \Phi'_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi'_n + \Phi_n \right]. \quad (3)$$

Формула (3) — расчетная.

Вычисляя последовательно интеграл по уравнению (3) для значений $n = 1; n = 2; n = 3$ и т. д., получаем выражения для промежуточных точек, позволяющие вычислить и построить зависимость $\Phi_{рез} = f(F_a)$. Например, при $n = 1$

$$\Phi_{рез} = \frac{1}{2} \left[\Phi_0 + \frac{1}{2} (\Phi_1 + \Phi'_1) \right]. \quad (3a)$$

в полученных выражениях: Φ_0 — значение потока в точке a ; $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_n$ — значения потока в точках $1, 2, 3, \dots, n$; $\Phi'_1, \Phi'_2, \Phi'_3, \dots, \Phi'_n$ — значения потока в точках $1', 2', \dots, n'$.

Следует иметь в виду, что значения $\Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_n$ всегда положительны, а значения функции $f(x)$ от некоторого значения Φ'_k до Φ'_n могут принимать отрицательные значения и должны

подставляться в формулы с отрицательным знаком, если интервал интегрирования bc будет иметь нижний предел (точку b) на отрицательной части переходной характеристики. На рис. 1 $\Phi'_4 = 0$, а Φ'_5, Φ'_6 и т. д. отрицательные.

Изложенное позволяет предложить следующий метод определения результирующего полезного потока с учетом размагничивающего действия поперечной реакции якоря, т. е. построения зависимости $\Phi_{рез} = f(F_a) = \varphi(I_a)$:

1. Строится переходная характеристика для рассматриваемой машины. Для приближенных расчетов можно пользоваться характеристикой холостого хода машины.

2. От точки холостого хода, принимаемой за начало, вправо и влево проводится на равных расстояниях друг от друга ряд вертикалей до пересечения с переходной характеристикой.

3. Полученные значения для потока в точках пересечения подставляются последовательно в формулы (3a) и подобные ей и вычисляются значения $\Phi_{рез}$ для различных значений F_a .

По найденным точкам строится зависимость результирующего потока от тока якорной цепи, который легко определяется из формулы (1). Полученной кривой в дальнейшем легко пользоваться для учета размагничивающего действия поперечной реакции якоря как при рассмотрении стационарных, так и переходных процессов.

Приложение. Для иллюстрации и сравнения был произведен расчет зависимости результирующего полезного потока от тока якоря для машины постоянного тока серии ПН-68 тремя методами: а) предлагаемым, б) методом В. Т. Касьянова и в) Л. М. Шильдинера (для больших перегрузок). Данные машины: ПН-68; $U_n = 220$ в; $I_n = 35$ а; $P_n = 6,5$ кВт; $n_n = 1550$ об/мин. Результаты расчета приведены в таблице.

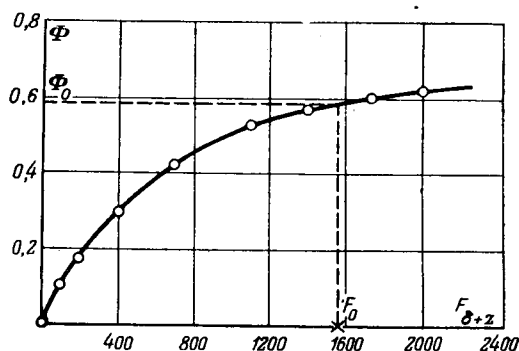


Рис. 2. Переходная характеристика электродвигателя.

На рис. 2 приведена принятая к расчету переходная характеристика машины ПН-68 (по данным завода «Электросила»), а на рис. 3 — кривые зависимостей $\Phi_{рез} = \varphi(I_a)$.

Метод	I_a, a	0	12,8	25,6	38,4	44,8	57,6	70,5	77	83,5	89,6	96	102	108	115	128	140,5	166	182
Предлагаемый	Результирующий поток, 10^6 макс	0,585	0,583	0,57	0,547	0,53	0,48	0,425	0,397	0,372	0,35	0,326	0,31	0,293	0,288	0,251	0,24	0,195	0,17
Касьянова		0,585	0,581	0,571	0,555	0,529	0,485	0,415	0,4	0,382	0,358	0,328	0,324	0,288	0,277	0,262	0,231	0,198	0,172
Шильдинера		—	—	—	—	—	—	—	0,551	0,498	0,454	0,422	0,387	0,36	0,336	0,301	0,269	0,223	0,193

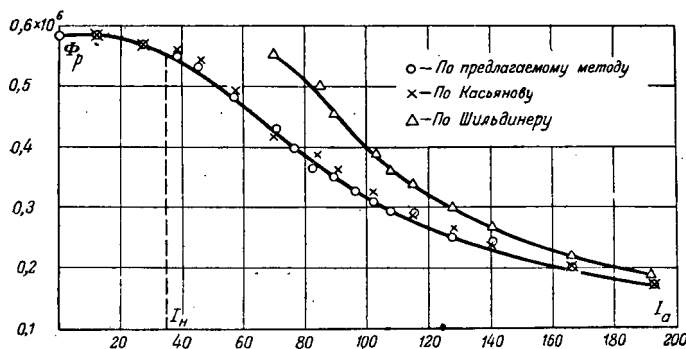


Рис. 3.

построенные по расчетным данным. Эксперимент не проводился в связи с тем, что отправные пункты для всех трех методов одинаковы (переходная характеристика машины).

Следует отметить, что время, затрачиваемое на расчет по предлагаемому методу, в несколько раз меньше, чем во всех остальных случаях, при одновременно большей простоте операций построения и вычислений.

Литература

1. Э. Арнольд и Н. Ла-Кур. Машины постоянного тока, т. 1, стр. 127, ГНТИ, 1931.
2. Г. Н. Петров. Расчет размагничивающего действия поперечной реакции якоря машины постоянного тока. ВЭП, стр. 15, № 10, 1944.
3. В. Т. Касьянов. Реакция машин постоянного тока. ВЭП, стр. 9, № 2, 1940.
4. Л. М. Шильдинер. Аналитический метод учета размагничивающего действия поперечной реакции якоря при больших перегрузках. Электричество, стр. 46, № 10, 1949.

[9.6. 1950]



Расчет регулировочных сопротивлений системы генератор—двигатель привода шахтной подъемной машины

Кандидат техн. наук, доц. Л. Г. ЖИВОВ

Расчетная производительность действующей подъемной установки может быть обеспечена только при соблюдении заданных (расчетных) ускорений. Следовательно, регулировочные сопротивления в цепи возбуждения генератора необходимо так рассчитать, чтобы скорость, ускорение и путь, проходимый системой, максимально приближались к заданным. Значение сопротивления на каждой ступени и число ступеней командоаппарата, выключающего ступени сопротивлений, являются основными параметрами, от которых зависит качество работы электропривода подъемной установки в период разгона и замедления.

Приведены методы расчета переходных режимов системы генератор—двигатель в приводе шахтной подъемной машины. Приведены методы определения сопротивлений и числа их ступеней в контуре возбуждения генератора. Даны рекомендации, пользуясь которыми можно обеспечить заданную производительность подъемной установки.

В литературе отсутствует обоснование методики выбора числа ступеней и величины сопротивлений для электропривода шахтной подъемной установки. Число ступеней

выбирают на основе опыта эксплуатации. Существует мнение, что с увеличением числа ступеней сопротивлений в контуре возбуждения генератора разгон привода происходит более плавно. В настоящей работе показано, что число ступеней строго ограничено и незначительно и что только этому определенному числу ступеней соответствует наилучшее приближение действительных значений ускорения и замедления привода к расчетным.

Расчетная скорость обычно следует прямолинейному закону $v = at$. Влияние электромагнитной T_2 и электромеханической θ постоянных времени на характер кривой действительной скорости приводит к ее отклонению от расчетной.

Разобьем полное время разгона T_p (рис. 1) на ряд равных отрезков $t_1 = t_2 = t_3 = \dots = t_k$, которым соответствуют заданные скорости $v_1 = at_1$, $v_2 = 2at_1$, $v_3 = 3at_1$, ..., $v_k = kat_1$. В каждом своем отрезке кривые действительной скорости пройдут через эти значения скорости, если этим отрезкам будут соответствовать только вполне определенные установившиеся скорости: v_{o1} , v_{o2} , v_{o3} , ..., v_{ok} .

Эти скорости зависят от размера отрезка $t_1 = \frac{T_p}{q}$, где q — число ступеней. При уменьшении

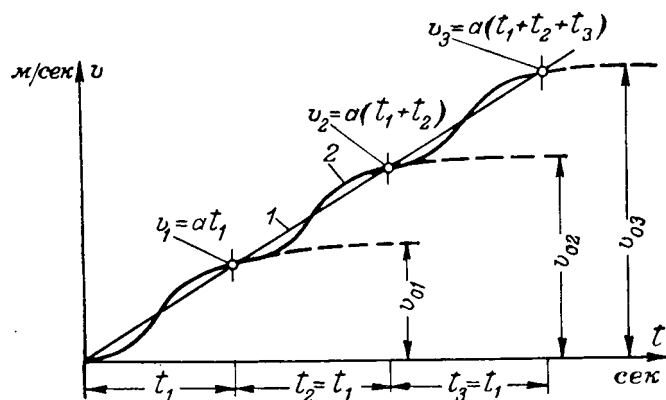


Рис. 1. Заданная 1 и действительная 2 скорости электропривода шахтной подъемной машины.

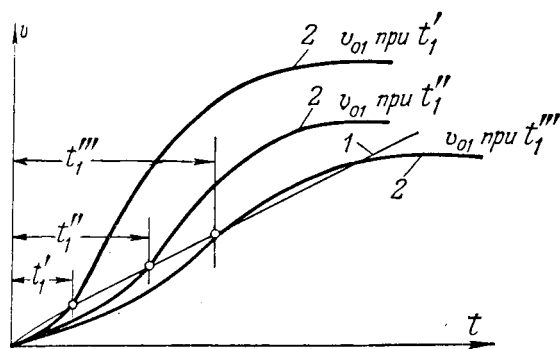


Рис. 2. v_{o1} в зависимости от величины участка t .
1—заданная; 2—установившаяся скорости.

нии t_1 скорость v_o будет увеличиваться вследствие специфичности S-образной кривой скорости привода в начальной ее части, на первом отрезке (рис. 2), обусловленной соотношением $\lambda = \frac{T_2}{\theta}$.

При малых t_1 необходимо иметь значительную скорость v_o , чтобы действительная скорость за t_1 достигла значения v_1 . На рис. 3 для двух значений $\lambda = \frac{T_2}{\theta} = 8$ и $\lambda = \frac{T_2}{\theta} = 2$ при $\theta = 0,5$ сек для схемы генератор — двигатель без электромашинного усилителя представлены зависимости:

$$v_{o1} = f(t_1); v_{o2} = f(t_1); a = f(t_1) \text{ и } a_{\max} = f(t_1).$$

Зависимость $v_{ok} = f(t_k)$ для отрезка времени $t_k = t_1$ (приложение 1) можно представить:

$$v_{ok} = v_k - A_{1k} e^{p_1 t} - A_{2k} e^{p_2 t}. \quad (1)$$

Для первого участка

$$v_{o1} = \frac{v_1}{1 + B_{11} e^{p_1 t} + B_{21} e^{p_2 t}}. \quad (2)$$

Для рис. 3 v_{o1} определялось по (2) для значений $t_1 = 0,2; 0,4; 0,6$ сек и т. д. Кривая $v_{o1} = f(t_1)$ имеет минимум для определенного λ ; минимальное значение v_{o1} соответствует только одному значению отрезка t_1 . Дифференцируя v_{o1} по t_1 и приравняв производную нулю, найдем минимум (2):

$$t_1 = \frac{1 + B_{11} e^{p_1 t_1} + B_{21} e^{p_2 t_1}}{p_1 B_{11} e^{p_1 t_1} + p_2 B_{21} e^{p_2 t_1}}. \quad (3)$$

Уравнение (3) представим в виде двух:

$$y_1 = t_1, \quad (3a)$$

$$y_2 = \frac{1 + B_{11} e^{p_1 t_1} + B_{21} e^{p_2 t_1}}{p_1 B_{11} e^{p_1 t_1} + p_2 B_{21} e^{p_2 t_1}}, \quad (3б)$$

совместно графическое решение которых дает минимальное значение v_{o1} и ей соответствующее t_1 . Так как значение максимального ускорения на каждом участке для данного привода

$$a_{\max} = \frac{v_{o1}}{\theta} \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^{\frac{1}{\lambda}-1} = \frac{b}{\theta_1} v_{o1} = f(v_{o1}),$$

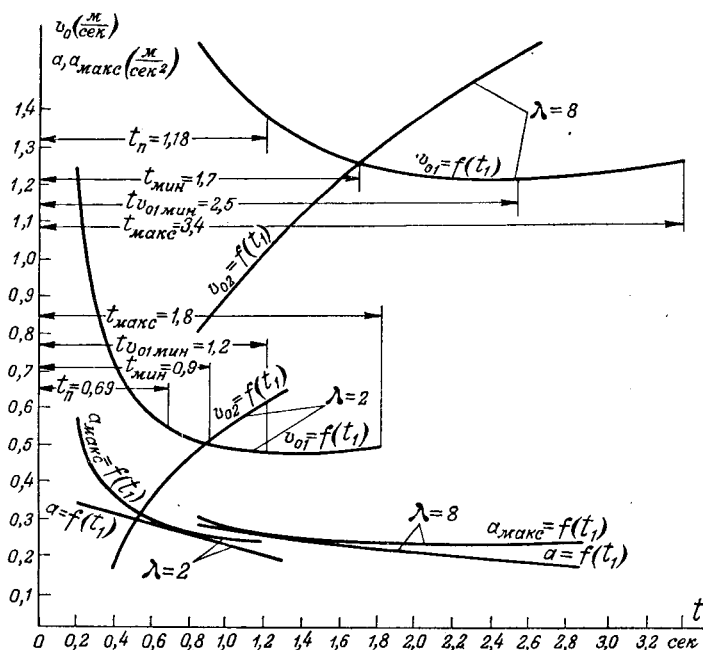


Рис. 3. Установившиеся скорости ускорения в зависимости от величины отрезка t_1 при $\theta = 0,5$ сек.

а значение максимального пика тока (приложение 1)

$$i_{\max} = Da_{\max} + SF_c, \quad (4)$$

то минимальным значениям v_{o1} , найденным из (3), будут соответствовать минимальные пики тока и ускорения на участке t_1 .

Установившаяся скорость v_{o2} для следующего, второго отрезка времени $t_2 = t_1$ должна при разгоне всегда быть больше v_{o1} — установившейся скорости первого отрезка, что, однако, может быть только при определенном значении t_1 . На рис. 3 это показано.

При определенном t_1 скорость v_{o1} равна v_{o2} . Если приравнять уравнения для второго (1) и первого участка (2), то после преобразований будем иметь:

$$t = \frac{1}{p_2} \ln \frac{v_1 + A_{11} e^{p_2 t_1} + A_{12} e^{p_2 t} - A_{22} e^{p_1 t}}{A_{21}}, \quad (5)$$

которое решается таким же образом, как и (3), и дает минимальное значение $t_1 = t_{\min}$.

Из только что сказанного необходимо сделать вывод, что при $t_1 < t_{\min}$ на втором участке надо для соблюдения заданного графика скорости не выключать, а включать в контур возбуждения сопротивления, т. е. меньше t_{\min} участка не может быть. Это объясняется тем обстоятельством, что время наступления максимальной пика ускорения для данного привода

$$t_n = \theta \frac{\lambda}{\lambda - 1} \ln \lambda = \text{const.}$$

Поэтому при $t_1 < t_n$ ускорение в конце участка меньше a_{\max} , но наступает раньше, чем дости-

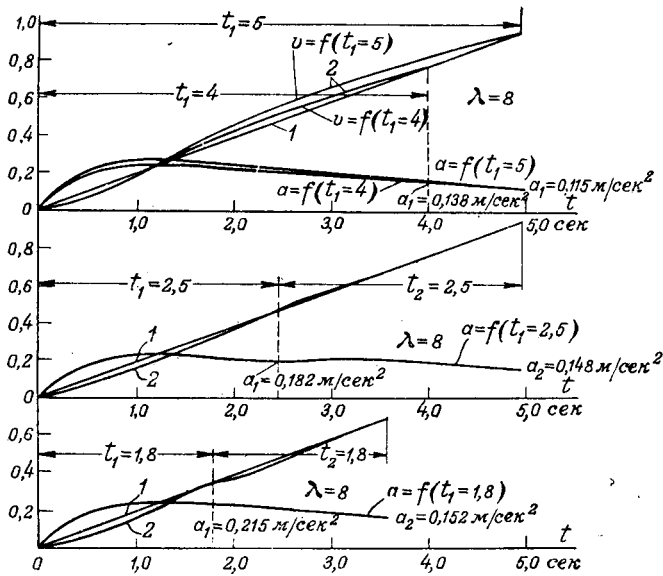


Рис. 4. Влияние отрезка t_1 на скорость электропривода при разгоне системы ($\theta = 0,5$ сек). 1 — заданная; 2 — действительная скорости.

гается a_{\max} . Лишь на участке, где $t_1 > t_{\min} > t_n$, ускорение в конце участка во времени достигает своего расчетного значения позже a_{\max} и меньше его по величине, поэтому $v_{o2} > v_{o1}$.

Следовательно, минимальное время участка

$$t_{\min} = \beta t_n, \quad (6)$$

где $\beta > 1$ и легко определяется из рис. 3.

Влияние отрезка t_1 показано на рис. 4, где для $\lambda = 8$ взяты отрезки t_1 несколько больше t_{\min} :

$$t_1 = t_{vol\min}; \quad t_1 = 1,6 t_{vol\min} \quad \text{и} \quad t_1 = 2 t_{vol\min}.$$

На втором участке при $t_1 = t_{vol\min}$ действительная скорость совпадает с заданной. При значениях $t_1 > 2 t_{vol\min}$ действительная скорость начинает заметно отклоняться от заданной.

Расчеты показывают, что максимальным t_1 , обеспечивающим еще надежное совпадение результатов с заданными, является $t_1 = 2 t_{\min}$ (рис. 3). Таким образом, оптимальный участок лежит между $t_1 = t_{\min}$ и $t_1 = 2 t_{\min}$. Можно принять $t_1 = t_{vol\min}$. Оптимальное число ступеней командоаппарата будет $\frac{T_p}{t_{vol\min}}$. В этих же пределах для

шахтных подъемных машин с приводом генератор — двигатель обычно лежит постоянная времени

$$R = \frac{k_2 U_1 \beta_1 \omega_1}{C_e' [v_o + \Delta v_c - \Delta v_{cs} k_y \pm (\Delta v_{es} + \Delta v_e - \Delta v_{ey})]} - r, \quad (9)$$

T_2 . С некоторой погрешностью поэтому можно выбирать участок, равный T_2 .

На рис. 5 даны кривые для определения отрезка t_1 .

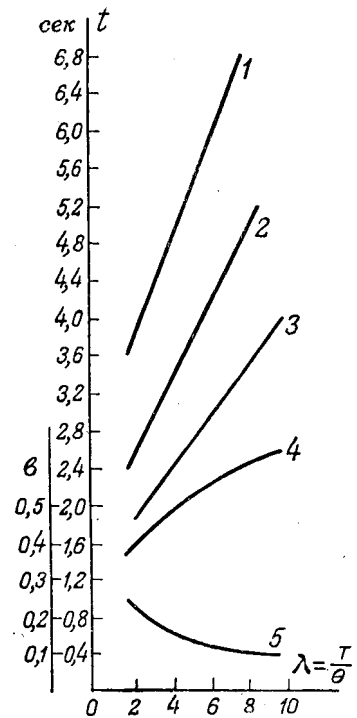


Рис. 5. Отрезок t_1 в зависимости от

$$\lambda = \frac{T}{\theta} \quad \text{при} \quad \theta = 1,0 \text{ сек.}$$

$$1 - t_{\max}; \quad 2 - t_{vol \min}; \quad 3 - t_{\min}; \quad 4 - t_n; \quad 5 - b = f(\lambda).$$

Сопротивление ступени (приложение 1)

$$R_k = \frac{U_1^2 \beta_1 \omega_1 k_2}{C_e' (v_c + \Delta v_c \pm \Delta v_{es} \pm \Delta v_e)} - r, \quad (1)$$

$$C_e' = C_e \frac{30 \varphi}{\pi R \theta} = C_e a, \quad (8)$$

где C_e — постоянная двигателя по э. д. с.;

φ — передаточное число привода;

$\Delta v_c = \frac{\Delta n_c}{\alpha}$ — перепад скорости от нагрузки;

$\Delta v_{es} = \frac{\Delta e_s k_2}{C_e'}$ — приращение скорости от остаточной э. д. с. возбудителя;

Δv_e — приращение скорости от остаточной э. д. с. генератора; знак плюс относится к разгону, минус — к замедлению системы.

При включении электромашинного усилителя v_{ok} и отрезок t_1 определяются по формулам, аналогичным вышеприведенным (приложения 2 и 3).

В случае включения в схему усилителя с критическим самовозбуждением сопротивление ступени командоаппарата (рис. 6, а)

где $\Delta v_{ey} = \frac{\Delta e_y k_1 k^2}{C_e'}$ — приращение скорости от остаточной э. д. с. усилителя.

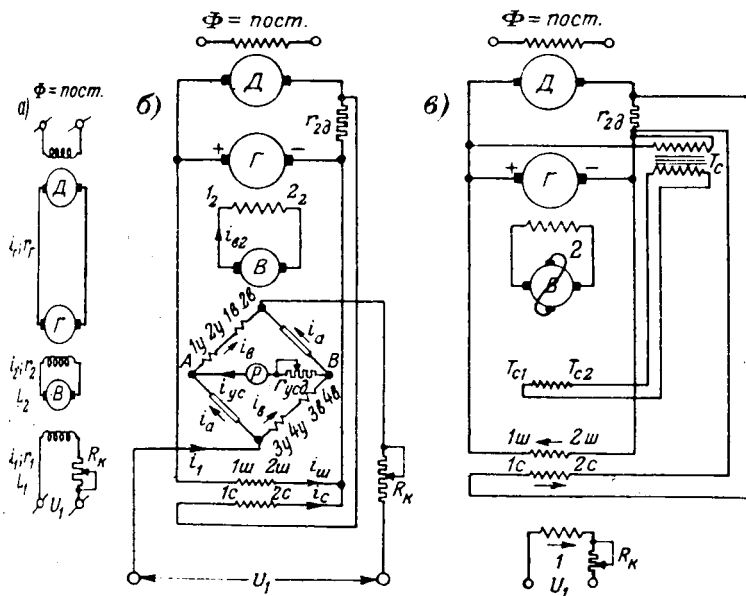


Рис. 6. Системы генератор-двигатель.

а — без машинного усилителя; б — при наличии усилителя с критическим самовозбуждением; в — с поперечным полем.

В случае включения усилителя с поперечным полем (рис. 6,б) сопротивление ступени командоаппарата

$$R_k = \frac{U_1 \beta_1 \omega_1 k_2 k_3}{C_e [v_o + \Delta v_c - \Delta v_c k_y \pm (\Delta v_{ea} + \Delta v_e)]} - r, \quad (10)$$

где

$$\Delta v_{ea} = \frac{\Delta e_a k_2}{C_e},$$

$$k_y = (\lambda k_c + k_{ш} - \lambda k_{ш}) k_2,$$

r — сумма сопротивлений, включаемых последовательно со ступенью сопротивления командоаппарата.

Выводы. 1. Доказано, что в случае ступенчатого регулирования скорости число ступеней сопротивлений в контуре возбуждения генератора должно быть строго определенным и относительно незначительным.

2. Этому числу ступеней соответствует на каждой ступени установившаяся минимальная скорость, которая обеспечивает минимальную пиковую (ускорения) на каждой ступени и наилучший режим разгона и замедления системы.

3. Положения этой работы применимы не только к электроприводу по системе генератор — двигатель шахтной подъемной машины, но и к любому электроприводу по этой системе.

Приложение 1. При прямолинейности кривых намагничивания генератора (рис. 6,а), возбуждателя и двигателя с учетом э. д. с. остаточного магнетизма действительны следующие соотношения:

$$e_2 = C_e n + I R_2 = C_e n (1 + \theta_p) + I_c R_2 \quad (1,1)$$

$$U_1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = C_e n + I_c R_2 \pm \Delta e_a k_2 \pm \Delta e,$$

или

$$U_1 \cdot \frac{k_1}{1 + T_1 p} \cdot \frac{k_2}{1 + T_2 p} \cdot \frac{1}{1 + \theta p} = C_e n + I_c R_2 \pm \Delta e_a k_2 \pm \Delta e, \quad (1,2)$$

где k_1 , k_2 и k_3 — динамические коэффициенты усиления первой и второй обмоток возбуждения и привода;

$k_1 = \frac{\beta_1 \omega_1}{r_1}$; $k_2 = \frac{\beta_2 \omega_2}{r_2}$ — статические коэффициенты усиления;

β_1 и β_2 для периода разгона и замедления при учете остаточной э. д. с. будут иметь разное значение, чем в практических расчетах можно пренебречь;

U_1 — напряжение обмотки возбуждения возбуждателя;

ω_1 и ω_2 — числа витков обмоток возбуждателя и генератора;

T_1 и T_2 — электромагнитные постоянные времени цепи обмотки возбуждения возбуждателя и генератора;

θ — электромеханическая постоянная привода;

T_1 обычно по сравнению с T_2 для приводов шахтных подъемных машин весьма мала ($T_1 = 0,03 \dots 0,05$, $T_2 = 2 \dots 4$ сек). В связи с этим пренебрегаем влиянием T_1 на переходный процесс. Нарастание скорости рассматриваем с того момента, когда ток в цепи двигателя равен току статической нагрузки (при $t=0$ $n=0$, а $i_2 = I_c$). Кроме того, будем считать, что привод под нагрузкой будет иметь установившуюся линейную скорость v_o , а без нагрузки

$$v_o + \Delta v_c \pm \Delta v_{ea} \pm \Delta v_e,$$

тогда

$$(1 + T_2 p) (1 + \theta p) \cdot v = v_o. \quad (1,3)$$

Решение (1,3) для k -той ступени:

$$v_k = v_{ok} + A_{1k} e^{p_1 t} + A_{2k} e^{p_2 t}. \quad (1,4)$$

Для любой ступени начальные условия при нахождении постоянных интегрирования A_{1k} и A_{2k} определяются как конечные условия предыдущей ступени.

Для k -той ступени

$$A_{1k} = \frac{p_2 v_{ok} + a_{k-1}}{p_2 - p_1}, \quad (1,5)$$

$$A_{2k} = \frac{p_1 v_{ok} + a_{k-1}}{p_1 - p_2}, \quad (1,6)$$

$$v_{ok} = v_{k-1} - v_{o1}; \quad (1,7)$$

ускорение

$$a_{k-1} = \frac{dv}{dt} = A_{1k-1} p_1 e^{p_1 t} + A_{2k-1} p_2 e^{p_2 t}. \quad (1,8)$$

Для первой ступени

$$v_{k-1} = 0; \quad a_{k-1} = 0 \text{ и } v_{ok} = -v_{o1}, \quad (1,7')$$

$$A_{11} = -\frac{p_2}{p_2 - p_1} v_{o1} = B_{11} v_{o1},$$

$$A_{21} = -\frac{p_1}{p_1 - p_2} v_{o1} = B_{21} v_{o1}.$$

При подстановке значений A_1 и A_2 в (1,4) и решения (1,4) относительно v_{o1} получаем (2).

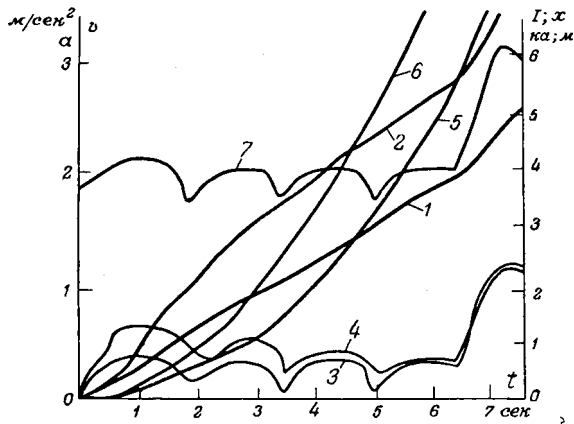


Рис. 7. Скорость, ускорение, путь и ток при ступени $t = 1,6 \text{ сек}$ и грузах $F = F_H$ и $F = 0$.

Кривые 1, 3, 5, 7 — скорость, ускорение, путь и ток главной цепи при $F = F_H$; 2, 4, 6 — скорость, ускорение и путь при $F = 0$.

В период замедления для k -той ступени

$$v = v_m - at_{1k} = v_m - v_k,$$

где v_m — максимальная установившаяся скорость, а v_{ok} определяем по (I,4).

Ток в переходном режиме

$$i = Da + SF_c,$$

где F_c — статическое усилие, кг;

$$D = \frac{30C\epsilon\varphi}{R_2 n R_6} \cdot \theta; S = \frac{R_6}{C_m \varphi \eta_z};$$

C_m — постоянная по моменту двигателя;

R_6 — радиус барабана подъемной машины, м;

η_z — к. п. д. зубчатой передачи.

Учитывая, что при $t = 0$ $x = x_{нач}$, найдем путь, который прошла система для k -той ступени:

$$x = \int v dt = x_{нач} + v_{ok} t - \frac{A_{1k}}{p_1} (1 - e^{p_1 t}) - \frac{A_{2k}}{p_2} (1 - e^{p_2 t}). \quad (I,9)$$

Уравнения (I,4), (I,7), (I,8) и (I,9) дают решение переходного режима электропривода в случае выключения ступеней сопротивления в цепи возбуждения возбудителя генератора.

На рис. 7 представлены для четырех первых ступеней разгона скорость, ускорение, путь при $F = F_H$ и $F = 0$ в зависимости от времени. Скорость значительно изменяется в зависимости от груза (приблизительно на 40%), что особенно недопустимо в период замедления подъемной машины.

Приложение 2. Рассмотрим систему при усилителе с критическим самовозбуждением (рис. 6,б). Учтявая, что постоянная времени T_y цепи обмоток 1у — 4у для электроприводов шахтной подъемной машины составляет 0,003... 0,008 сек, а постоянная времени цепей обмоток 1с — 2с и 1ш — 2ш $T_{сш} = T_c + T_{ш}$ равна 0,02... 0,08 сек, ими можно пренебречь. Установившаяся скорость под нагрузкой будет v_o , а без нагрузки

$$v_o + \Delta v_c - \Delta v_c k_y \pm (\Delta v_{ев} + \Delta v_e - \Delta v_{cy})$$

При этих условиях [Л. 1]

$$\{(1 + T_{1p})(1 + T_{2p})(1 + \theta_p) - k_y [\theta_p + (1 + \theta_p) \cdot T_{2p}]\} (1 + \theta_p) \cdot v_k = v_{ok}, \quad (II,1)$$

где

$$T_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{L_{\theta}}{2(r + R_k)} + \frac{L_{\theta}}{2(r + r_y)} \right] = \frac{T_{11} + T_{12}}{2};$$

T_{11} — постоянная времени цепи обмотки 1с — 4с при питании ее напряжением цепи управления;

T_{12} — то же, но при питании ее от усилителя;

$k_1 = \frac{\epsilon_1 w_1}{2(K_k + r)}$ — коэффициент усиления по напряжению при питании обмотки 1с — 4с напряжением цепи управления;

$r = \frac{r_{1a} + r_y}{2}$ — сопротивление плеча моста;

r_{1a} — сопротивление обмотки возбуждения 1с — 4с;

r_y — сопротивление обмотки сравнения 1у — 4у;

R_k — регулировочное сопротивление в цепи мостика при максимальной скорости двигателя;

$k_y = \frac{\beta_y w_y}{2(r + r_{yc})}$; $\beta_y = \frac{e_y}{I \cdot w}$ — соотношение, соответствующее прямолинейной части характеристики холостого хода усилителя;

w_y — витки обмотки самовозбуждения усилителя.

r_{yc} — сопротивление между точками А и Б (рис. 6,б)

Для k -той ступени общее решение уравнения (II,1) имеет вид:

$$v_k = v_{ok} + A_{1k} e^{a_1 t} + A_{2k} e^{a_2 t} + A_{3k} \cos \beta t e^{a_3 t} + A_{4k} \sin \beta t e^{a_3 t}. \quad (II,2)$$

Установившаяся скорость k -той ступени

$$v_{ok} = v_k - A_{1k} e^{a_1 t} - A_{2k} e^{a_2 t} - (A_{3k} \cos \beta t + A_{4k} \sin \beta t) e^{a_3 t}, \quad (II,3)$$

Установившаяся скорость на первой ступени, учитывая, что

$$A_{11} = B_{11} v_{o1}, \quad A_{21} = B_{21} v_{o1}, \quad A_{31} = B_{31} v_{o1}, \quad A_{41} = B_{41} v_{o1},$$

$$v_{o1} = \frac{v_1}{1 + B_{11} e^{a_1 t} + B_{21} e^{a_2 t} + (B_{31} \cos \beta t + B_{41} \sin \beta t) e^{a_3 t}}. \quad (II,4)$$

и время

$$t = \frac{1 + B_{11} e^{a_1 t} + B_{21} e^{a_2 t} + (B_{31} \cos \beta t + B_{41} \sin \beta t) e^{a_3 t}}{a_1 B_{11} e^{a_1 t} + a_2 B_{21} e^{a_2 t} + (B_{31} a_3 + \beta B_{41}) \cos \beta t e^{a_3 t} + (a_3 B_{41} - \beta B_{31}) \sin \beta t e^{a_3 t}}. \quad (II,5)$$

Ускорение системы на k -той ступени

$$a = \frac{dv}{dt} = a_1 A_{1k} e^{a_1 t} + a_2 A_{2k} e^{a_2 t} + (a_3 A_{3k} + \beta A_{4k}) \cos \beta t e^{a_3 t} + (a_3 A_{4k} - \beta A_{3k}) \sin \beta t e^{a_3 t}. \quad (II,6)$$

Путь на k -той ступени

$$x = \int v dt = x_{нач} + v_o t - \frac{A_{1k}}{a_1} (1 - e^{a_1 t}) - \frac{A_{2k}}{a_2} (1 - e^{a_2 t}) - \frac{e^{a_3 t}}{a_3^2 + \beta^2} [A_{3k} (a_3 \cos \beta t + \beta \sin \beta t) + A_{4k} (a_3 \sin \beta t - \beta \cos \beta t) + \frac{A_{4k} \beta - A_{3k} a_3}{a_3^2 + \beta^2}]. \quad (II,7)$$

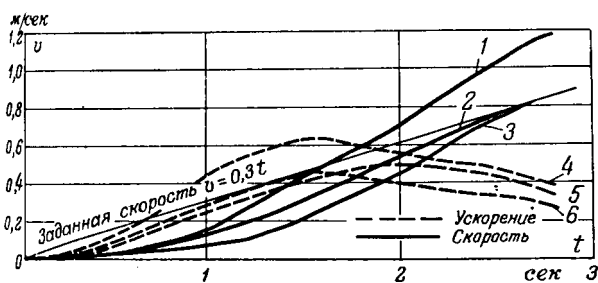


Рис. 8. Скорость и ускорение подъемной машины при времени ступени $t = 2,8$ сек.

1 и 4 — $F = 0$, $k_y = 0,6$; 2 и 6 — $F = F_n$, $k_y = 0,6$; 3 и 5 — $F = F_n$ и $F = 0$, $k_y = 1$.

Уравнения (II,1), (II,2), (II,3), (II,6) и (II,7) дают возможность исследовать ряд особенностей работы системы с усилителем с критическим самовозбуждением при различных условиях, рассчитав предварительно по (II,5) время ступени.

1. Влияние компаундирования на скорость и ускорение системы видно из рис. 8: $k_y = 0,6$ при колебаниях на-

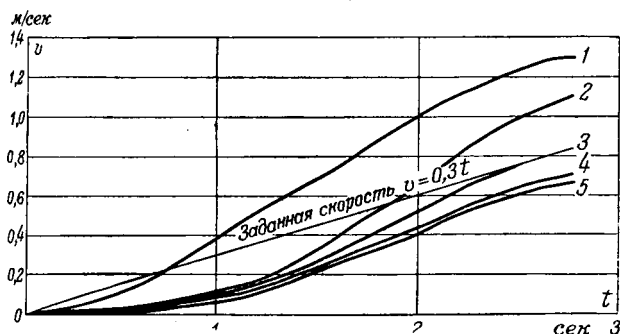


Рис. 9. Скорость подъемной машины на первой ступени при времени ступени $t = 2,8$ сек и $k_y = 0,845$.

1 — обрыв параллельной обмотки усилителя; 2 — преобладание токовой обмотки усилителя над параллельной; 3 — $(1-\lambda) k_{ш} = 0,8 k_c$; 4 — преобладание параллельной обмотки над токовой; $(1-\lambda) k_{ш} > 0,8 k_c$; 5 — обрыв токовой обмотки.

грузки не обеспечивает заданной скорости в периоды разгона и замедления. $k_y = 0,8 \dots 1,0$ обеспечивает жесткую диаграмму скорости, однако в пределах $k_y = 0,6 \dots 1,0$ размер ступени k_y не влияет.

2. О влиянии н. с. параллельной и токовой обмоток усилителя на характер кривой скорости можно судить на основании рис. 9. Кривая 4 дана для случая, когда влияние параллельной обмотки в 3 раза больше расчетного (кривая 3), кривая 2 — для случая, когда влияние токовой обмотки в 2 раза больше расчетного.

На рис. 10 представлен случай внезапного исключения усилителя. Для периода замедления при сопротивлениях, рассчитанных для схем с усилителем, переход на эту схему недопустим ввиду входа скапа в разгрузочные кривые с большой скоростью.

3. На рис. 11 показано влияние на скорость изменения частоты сети и напряжения. Рассмотрены два случая: для схемы с усилителем и без него (величина ступени соответственно $t = 2,8$ сек и $t = 1,6$ сек). Как видно, система чувствительно реагирует на колебание напряжения и частоты.

4. На рис. 12 представлены кривые скорости при внезапно возросшей на канат нагрузке на второй ступени (заедание скапа в кривых) для схемы без и с усилителем. Вследствие наличия усилителя на третьей ступени скорость становится равной заданной, при отсутствии усилителя скорость только через несколько ступеней достигает заданной.

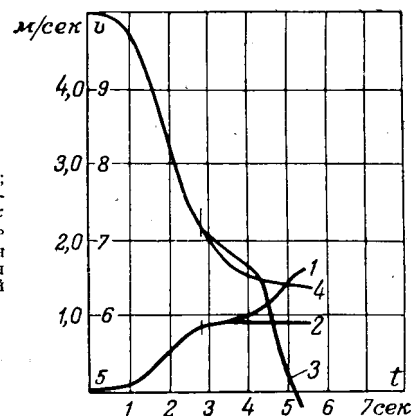


Рис. 10.

1, — скорость разгона; 3 — замедления при наличии усилителя, $t = 2,8$ сек и $k_y = 0,845$; 2 — скорость разгона, 4 — замедления при обрыве цепи якоря усилителя в начале второй ступени, $t = 2,8$ сек, $k_y = 0,845$.

5. Обычно регулировочные сопротивления для периода разгона и замедления расставляются в один ряд таким образом, что между ступенями разгона находятся ступени замедления. Методика расчета регулировочных сопротивлений показывает, что они должны работать раздельно. На рис. 13 приведены кривые скорости при совместном и раз-

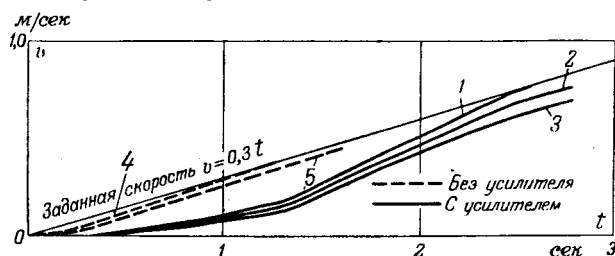


Рис. 11. Влияние частоты и напряжения сети на скорость подъемной машины.

1 и 4 — $f = f_n$ и $U = U_n$; 2 и 5 — $f < f_n$; 3 — $U < U_n$.

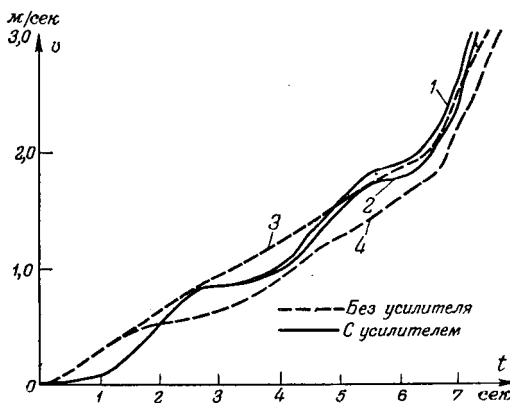


Рис. 12. Скорости при внезапно приложенной нагрузке на второй ступени ($t = 2,8$ сек).

1 и 3 — скорость при нормальном разгоне; 2 и 4 — при внезапно приложенной нагрузке.

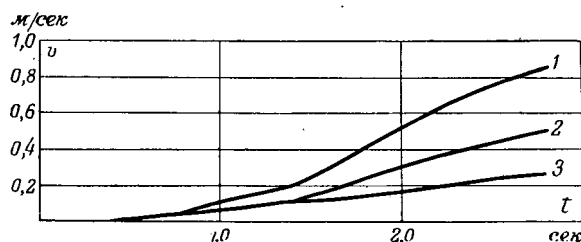


Рис. 13. Скорость подъемной машины на первой ступени. ($t = 2,8$ сек)

1 — при раздельных ступенях сопротивлений при разгоне, 2 — при совмещенных ступенях сопротивлений разгона и нерегулярном чередовании ступеней, 3 — тоже, что и 2, но при регулярном чередовании ступеней сопротивлений с интервалом 1,4 сек.

дельном расположении сопротивлений, только в последнем случае скорость соответствует расчетной.

Приведенные расчетные данные полностью подтвердились экспериментом.

Приложение 3. Для схемы с усилителем с поперечным полем (рис. 6, в) при прямолинейности кривых намагничивания и полностью скомпенсированном усилителе действенно соотношение

$$\begin{aligned} [U_1 \dot{k}_1 - IR_2 \sigma \dot{k}_c - (e_z - \lambda IR_2) \dot{k}_u - \\ - (e_z - \lambda IR_2) \dot{k}_{cm}] \dot{k}_2 \dot{k}_\theta = \\ = C_e n(1 + \theta_p) + I_c R_2 \pm \Delta e_1 \pm \Delta e_2 k_2, \end{aligned} \quad (\text{III}, 1)$$

где σ — отношение сопротивления, к которому присоединяется обмотка $Ic - 2c$, к полному сопротивлению силовой цепи;

λ — отношение сопротивления, к которому присоединяется обмотка $Iu - 2u$, к полному сопротивлению силовой цепи;

$$\dot{k}_c = \frac{k_c}{1 + T_\Sigma}, \quad \dot{k}_u = \frac{k_u}{1 + T_\Sigma}, \quad \dot{k}_{cm} = \frac{T_p}{1 + T_p}$$

— динамические коэффициенты токовой обмотки, напряжения и стабилизирующего трансформатора;

$T_\Sigma = T_1 + T_c + T_u + T_{cm}$ — сумма постоянных времени обмотки управления, токовой, напряжения и суммы постоянных времени первичной и вторичной обмоток стабилизирующего трансформатора;

$$\dot{k}_1 = \frac{\dot{k}_1}{1 + T_{1p}}, \quad \dot{k}_2 = \frac{\dot{k}_2}{1 + T_{2p}}, \quad k_u = \frac{\beta y w_u}{R_u}, \quad k_c = \frac{\beta y w_c}{R_c}$$

w_u, R_u, w_c, R_c — числа витков и сопротивления контура параллельной и токовой обмоток.

Для электроприводов шахтных подъемных машин с усилителем T_1, T_c, T_u малы и ими можно пренебречь.

После преобразований (III, 1) будем иметь:

$$\begin{aligned} \{1 + k_u k_2 + [k_u k_2 \theta (1 - \lambda) + k_2 T (k_u + 1) + \theta k_c k_2 + \theta + \\ + T_2 + T] p + [(k_u + 1) T \theta k_2 (1 - \lambda) + \sigma k_c k_2 \theta T + T \theta + \\ + T_2 \theta + T_2 T] p^2 + T_2 T \theta p^3\} v_k = v_{ok}. \end{aligned} \quad (\text{III}, 2)$$

Решение (III, 2):

$$v = v_{ok} + A_1 e^{\alpha_1 t} + [A_2 \cos \beta t + A_3 \sin \beta t] e^{\alpha_2 t}.$$

Определение времени ступени t, v_{ok}, a_k получим из формул, аналогичных формулам приложения 2.

Приложение 4. Для упрощения определения v_{ok} отметим, что при времени ступени для шахтной подъемной машины, равно примерно 1,3...3 сек, можно учитывать A_1, A_2, \dots, A_k только первой ступени (ошибка 3...6%). В этом случае для любой ступени

$$v_{ok} = \frac{v_k - v_{k-1} \left(1 - \frac{v_{k-1}}{v_{o1}}\right)}{v_{o1}} v_{o1}, \quad (\text{IV}, 1)$$

а v_{o1} определяется из (2) и (II, 3).

Приложение 5. Пример 1. Рассчитать величину ступеней сопротивлений командоаппарата на первых двух участках периода разгона для электропривода по системе генератор — двигатель шахтной подъемной машины.

Дано: $T_2 = 2$ сек; $\theta = 0,5$ сек. Соотношение постоянных $\lambda = \frac{T}{\theta} = 4$. Ускорение системы расчетное $a = 0,3$ м/сек²;

$C_e' = 53,5$; $U_1 = 220$ в; $\beta_1 = 0,0975$; $w_1 = 1,250$; $k_2 = 3,46$; перепад скорости в конце первого и второго участка

$\Delta v_c = 0,90$ м/сек; остаточная э. д. с. генератора 8 в; остаточная э. д. с. возбудителя 6 в.

Определим время ступени

$$p_1 = -\frac{1}{T_2} = -\frac{1}{2} = -0,5; \quad p_2 = -\frac{1}{\theta} = -\frac{1}{0,5} = -2;$$

$$B_1 = -\frac{p_2}{p_2 - p_1} = -1,33; \quad B_2 = -\frac{p_1}{p_1 - p_2} = 0,333.$$

$$t = \frac{1 + B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t}}{p_1 B_1 e^{p_1 t} + p_2 B_2 e^{p_2 t}} = \frac{1 - 1,33 e^{-0,5 t} + 0,333 e^{-2 t}}{0,5 \cdot 1,33 e^{-0,5 t} - 2 \cdot 0,333 e^{-2 t}}.$$

$$t = 1,6 \text{ сек.}$$

По графику рис. 5 для $\lambda = 4$ и $\theta = 0,5$ найдем $t = 1,6$ сек. Для $t = 1,6$ сек

$$v_{o1} = \frac{a \cdot t}{1 + B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t}} =$$

$$= \frac{0,3 \cdot 1,6}{1 - 1,33 e^{-0,5 \cdot 1,6} + 0,333 e^{-2 \cdot 1,6}} = 1,165 \text{ м/сек.}$$

Ускорение в конце первого участка

$$\begin{aligned} a_1 = p_1 B_1 e^{p_1 t} + p_2 B_2 e^{p_2 t} = 0,5 \cdot 1,33 e^{-0,5 \cdot 1,6} - \\ - 2 \cdot 0,333 e^{-2 \cdot 1,6} = 0,318 \text{ м/сек}^2. \end{aligned}$$

Сопротивление ступени

$$\begin{aligned} R_1 = \frac{U_1 \beta_1 w_1 k_2}{C_e' \left[v_{o1} + \Delta v_c + \frac{\Delta e_a \cdot k_2}{C_e'} - \frac{\Delta e}{C_e'} \right]} = \\ = \frac{220 \cdot 0,0975 \cdot 1250 \cdot 3,46}{53,5 \left[1,165 + 0,9 + \frac{6 \cdot 3,46}{53,5} + \frac{8}{53,5} \right]} = 664 \text{ ом.} \end{aligned}$$

Определим для второго участка v_{o2} , причем

$$v_{ok} = v_{k-1} - v_{o2} = 0,48 - v_{o2};$$

$$v_{o2} = \frac{v_2 - v_1 \left(1 - \frac{v_1}{v_{o1}}\right) + \frac{a}{p_2 - p_1} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t})}{v_1} v_{o1};$$

$$\begin{aligned} v_{o2} = \frac{0,96 - 0,48 \left(1 - \frac{0,48}{1,165}\right) + \frac{0,318}{-2 + 0,5} (e^{-0,5 \cdot 1,6} - e^{-2 \cdot 1,6})}{0,48} \cdot 1,165 = \\ = 1,43 \text{ м/сек.} \end{aligned}$$

по (IV, 1) $v_{o2} = 1,65$ м/сек.

$$A_{12} = \frac{p_2 v_{ok} + a_1}{p_2 - p_1} =$$

$$= \frac{-2 \cdot (0,48 - 1,43) + 0,318}{-2 + 0,5} = -1,48,$$

$$A_{22} = \frac{p_1 v_{ok} + a_1}{p_1 - p_2} =$$

$$= \frac{-0,5 (0,48 - 1,43) + 0,318}{-0,5 + 2} = 0,538,$$

$$\begin{aligned} a = p_1 A_{12} e^{p_1 t} + p_2 A_{22} e^{p_2 t} = 0,5 \cdot 1,48 e^{-0,5 \cdot 1,6} - \\ - 2 \cdot 0,538 \cdot e^{-2 \cdot 1,6} = 0,332 - 0,043 = 0,29 \text{ м/сек}^2. \end{aligned}$$

Сопротивление ступени

$$R_2 = \frac{U_1 \beta_1 w_1 k_2}{C_e' \left[v_{o2} + \Delta v_c + \frac{\Delta e_a k_1}{C_e'} + \frac{\Delta e}{C_e'} \right]} = \frac{220 \cdot 0,0975 \cdot 1250 \cdot 3,46}{53,5 \left[1,43 + 0,9 + \frac{6 \cdot 3,46}{53,5} + \frac{8}{53,5} \right]} = 603 \text{ ом.}$$

по (IV, 1) $R_2 = 560$ ом

Кривые переходного режима представлены на рис. 7.

Пример 2. Рассчитать величину ступеней сопротивления командоаппарата на двух первых участках периода разгона для электропривода с усилителем с критическим самовозбуждением. Основные параметры привода приведены в предыдущем примере. $k_y = 0,845$, $T_1 = 0,238$ сек, оста-

точная э. д. с. усилителя 5 в, $k_{ш} = 0,131$, $k_1 = \frac{k_y}{k_2 k_{ш}} = 1,86$.

Преобразовав уравнение (II,1), имеем:

$$T_2 \cdot \theta T_1 p^3 + (T_1 T_2 + \theta T_2 + \theta T_1 - k_y \theta T_1) p^2 + (T_2 + T_1 + \theta - k_y \theta - k_y T_2) p + 1 = 0.$$

Корни уравнения:

$$p_1 = a_1 = -2; \quad p_2 = a_2 = -2,73; \quad p_{3,4} = -0,21 \pm j1,21;$$

$$a_3 = -0,21; \quad \beta = 1,21 \text{ и по (I,7')} \quad \varphi_{o1} = -v_{o1}.$$

Для первой ступени ($a_{k-1} = 0$) постоянные коэффициенты (II,2):

$$A_{11} = \frac{p_2 p_3 p_4 \varphi_{o1}}{(p_2 - p_1)(p_3 - p_1)(p_4 - p_1)} = \frac{-2,73(-0,21 + j1,21)(-0,21 - j1,21)}{(-2,73 + 2)(-0,21 + j1,21 + 2)(-0,21 - j1,21 + 2)} (-v_o) = -1,2 \cdot v_{o1} = B_{11} v_{o1},$$

$$v_{o1} = \frac{at_1}{1 + B_{11}e^{a_1 t} + B_{21}e^{a_2 t} + (B_{31} \cos \beta t_1 + B_{41} \sin \beta t_1)e^{a_3 t_1}} = \frac{0,3 \cdot 2,8}{1 + (-1,2)e^{-2 \cdot 2,8} + 0,538 \cdot e^{-2,73 \cdot 2,8} + [(-0,338)(-0,99) + (-0,84)(-0,22)]e^{-0,21 \cdot 2,8}} = 0,658 \text{ м/сек.}$$

Ускорение в конце первой ступени по (II,6) $a = 0,292$ м/сек². Сопротивление ступени командоаппарата

$$R_1 = \frac{U_1 \beta_1 \omega_1 k_2}{C_e [v_o + \Delta v_c - \Delta v_c k_y + (\Delta e_{\theta} k_2 + \Delta e - \Delta e_y k_1 k_2)]} \frac{1}{C_e} = \frac{1730}{(0,658 + 0,9 - 0,9 \cdot 0,845 + \frac{6 \cdot 3,46 + 8 - 5 \cdot 1,86 \cdot 3,46}{53,5})} = 2340 \text{ ом.}$$

Определим постоянные коэффициенты для второй ступени:

$$A_{12} = \frac{p_2 p_3 p_4 \varphi_{ok} + [p_3 p_4 + p_2(p_4 + p_3)] a_{k-1} + (p_2 + p_3 + p_4)(a_{k-1})' + (a_{k-1})''}{(p_2 - p_1)(p_3 - p_1)(p_4 - p_1)},$$

$$A_{22} = \frac{p_1 p_3 p_4 \varphi_{ok} + [p_3 p_4 + p_1(p_4 + p_3)] a_{k-1} + (p_1 + p_3 + p_4)(a_{k-1})' + (a_{k-1})''}{(p_1 - p_2)(p_3 - p_2)(p_4 - p_2)},$$

где $\varphi_{ok} = v_1 - v_{o2}$, $a_{k-1} = 0,292$ м/сек².

Взяв первую и вторую производные от (II,6), имеем:

$$(a_{k-1})' = -0,415, \quad (a_{k-1})'' = -0,442.$$

A_{32} и A_{42} определяются аналогично первой ступени:

$$A_{12} = -1,2 v_{o2} + 0,54; \quad A_{22} = 0,53 v_{o2} - 0,226;$$

$$A_{32} = -0,338 v_{o2} + 0,526; \quad A_{42} = -0,84 v_{o2} + 0,712.$$

Установившаяся скорость второй ступени по (II,3) при $v_2 = 0,3 \cdot 2 \cdot 2,8 = 1,68$ м/сек:

$$v_{o2} = 1,68 - [-1,2 v_{o2} + 0,54] e^{a_1 t} - (0,53 v_{o2} - 0,226) e^{a_2 t} - [(-0,338 v_{o2}) + 0,526] \cos \beta t e^{a_3 t} + (-0,84 v_{o2} + 0,712) \sin \beta t e^{a_3 t} = 1,605 \text{ м/сек.}$$

по (IV,1) $v_{o2} = 1,50$ м/сек.

Ускорение в конце второй ступени
Согласно (II,6) $a = 0,40$ м/сек².
Сопротивление второй ступени

$$R_2 = \frac{1730}{1,605 + 0,9 - 0,9 \cdot 0,845 + \frac{6 \cdot 3,46 + 8 - 5 \cdot 1,86 \cdot 3,46}{53,5}} = 1028 \text{ ом.}$$

по (IV,1) $R_2 = 1095$ м/сек.

Литература

И. В. П. Бычков. Квадратичная система с применением электромашинного усилителя. Электричество, № 4, 1952.

[26.12.1952]



Метод определения колебаний напряжения в тяговых сетях

Кандидат техн. наук Л. М. ТРАХТМАН

Москва

Применяемые методы расчета напряжений тяговой сети обычно принимают нагрузку, соответствующую установившемуся режиму движения поезда или какое-либо среднее эквивалентное ее значение. При этом предполагается, что нагрузка не зависит от напряжения сети.

Эти методы не позволяют учесть действительные колебания напряжения сети, связанные с изменением нагрузки на линии в первый момент, когда скорость поезда еще не успевает измениться. Между тем определение кратковременных колебаний напряжения важно для выбора характеристик и разработки схемы электроподвижного состава, в особенности при рекуперативном торможении.

Для решения поставленной задачи, очевидно, нужно определить напряжения в разных точках сети в зависимости от нагрузки отдельных потребителей или от тока рекуперирующего поезда.

Математическая зависимость в этом случае имела бы весьма сложный вид, так как в ее основу следовало бы положить аналитическое выражение характеристик тяговых двигателей.

Более простое решение можно получить графически. Сущность способа следующая. Допустим, что на участке с двусторонним питанием имеется один поезд, работающий при тяговом режиме, а другой — при рекуперативном (рис. 1). Далее допустим, что зависимость напряжения от тока при постоянной скорости электровоза или мотор-вагонного поезда и тяговом режиме соответствует внешней характеристике двигателей с последовательным возбуждением (рис. 2, кривая 2), а при рекуперативном режиме — внешней характеристике генераторов со встречным смешанным возбуждением (кривая 1).

Полагая напряжения обеих подстанций одинаковыми, получим токи с шин подстанций:

ток с шин I подстанции

$$I_a = \frac{I_2(L - l_2) - I_1(L - l_1)}{L} = I_a'' - I_a'; \quad (1)$$

с шин II подстанции

$$I_1 = \frac{I_2 l_2 - I_1 l_1}{L} = I_b'' - I_b'. \quad (2)$$

Соотношения (1) и (2) действительны для любых значений напряжения сети в месте приложе-

Существующие методы расчета напряжений тяговой сети не учитывают зависимость режима нагрузки от напряжения. Предложен графический метод определения напряжения в различных точках сети с учетом внешних характеристик электроподвижного состава. В частности, метод позволяет легко определить колебания напряжения в тяговой сети при рекуперации на электроподвижном составе. Рассмотрены примеры.

ния нагрузки. Составляющие токов I_a' , I_a'' и I_b' , I_b'' можно изобразить в форме зависимостей $U_1 = f(I_a')$, $f(I_b')$, а также $U_2 = f(I_a'')$, $f(I_b'')$, полученные

путем деления абсцисс кривой 1 рис. 2 в отношении $\frac{l_1}{L}$ и $\frac{L - l_1}{L}$ и абсцисс кривой 2 в отношении $\frac{l_2}{L}$ и $\frac{L - l_2}{L}$.

Характеристики составляющих токов I_a' , I_b' , I_a'' , I_b'' в функции напряжений показаны на рис. 2. Эти составляющие относятся к разным напряжениям сети соответственно в точках 1 и 2.

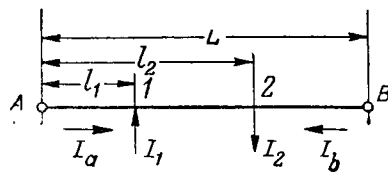


Рис. 1.

Чтобы графически решить уравнения (1) и (2) и получить зависимости $U_1 = f(I_a')$ и $U_2 = f(I_b')$ необходимо перестроить характеристики составляющих токов таким образом, чтобы они были приведены к одной и той же точке сети. Это построение показано на рис. 3. В левой части рисунка нанесены характеристики $U_1 = f(I_a')$ (кривая 1а) и $U_2 = f(I_a'')$ (кривая 2а). В правой части пока-

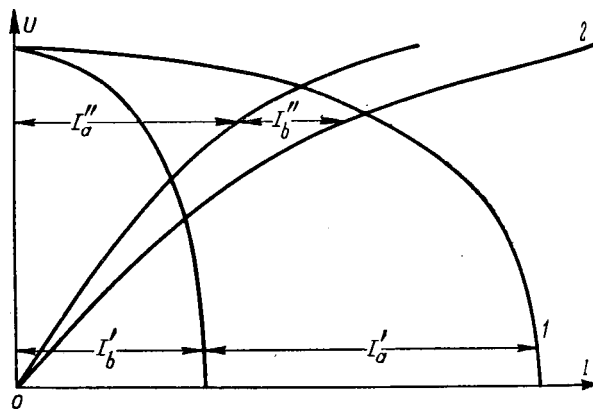


Рис. 2.

заны характеристики $U_1 = f(I'_b)$ (кривая 1b) и $U_2 = f(I''_b)$ (кривая 2b). Прямые 3a и 3b изображают падение напряжения на участке между нагрузками 1—2.

Если к ординатам функции $U_2 = f(I''_a)$, которая представлена кривой 2a, прибавить падение напряжения на участке 1—2, определяемое ординатами прямой 3a, то получим кривую 4a (рис. 3), которая дает $U_1 = f(I'_a)$ для того случая, когда других нагрузок на линии нет.

Следовательно, напряжения по кривым 1a и 4a относятся к одной и той же точке сети и всегда равны. Поэтому $U_1 = f(I_a)$ может быть получено графически, путем вычитания абсцисс характеристики 4a и 1a (кривая 5a).

Для получения зависимости $U_2 = f(I'_b)$ из ординат характеристики 1b вычитается падение напряжения на участке 1—2; в результате получается зависимость $U_2 = f(I'_b)$ (кривая 4b).

Вычитание абсцисс кривых 4b и 2b приводит к характеристике $U_2 = f(I_b)$ (кривая 5b).

Напряжения в точках 1 и 2 можно найти на пересечении зависимостей $U_1 = f(I_a)$ и $U_2 = f(I_b)$ (5a и 5b), построенных по внешним характеристикам нагрузок и прямых $U_1 = f(I_a)$ (6a) и $U_2 = f(I_b)$ (5b), наклон которых определяется падением напряжения на участках А—1 и 2—Б.

Пересечения дают точку a, отвечающую напряжению Od , и точку b, отвечающую напряжению Os .

Описанный графический метод позволяет легко определить напряжение в любой точке сети при изменении режима нагрузки на линии.

Допустим, например, что тяговая нагрузка выключена и осталась одна рекуперативная нагрузка. В этом случае кривая 5a сместится в положение 5a', и напряжение в точке 1 определится пересечением 5a' с прямой 6a в точке a' (рис. 3). Это напряжение равно Od , и, следовательно, изменение напряжения определяется отрезком dd' . Аналогично можно определить влияние любого изменения нагрузки на напряжения сети.

Указанный метод может быть применен для любой нагрузки на линии. В общем виде для нескольких нагрузок на линии порядок построения следующий:

1. В зависимости от расстояния до подстанции для каждой из нагрузок определяются составляющие токов от шин каждой подстанции в форме зависимостей $U = f(I)$.

2. Полученные зависимости $U = f(I)$ перестраиваются для режима исследуемой точки напряжения сети путем прибавления (при тяговой нагрузке или вычитания (при рекуперативной нагрузке) падения напряжения на участке сети от места приложения данной нагрузки до исследуемой точки сети.

3. Производится графическое сложение (вычитание) абсцисс кривых $U = \Sigma f(I)$, в результате определяется зависимость составляющей тока с шин подстанции от напряжения для точки сети,

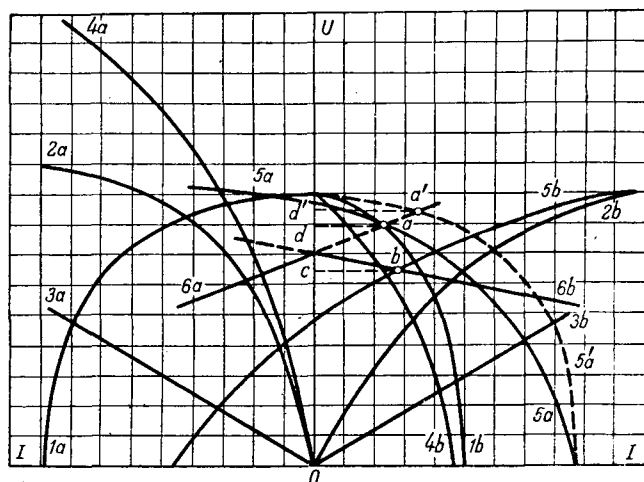


Рис. 3.

соответствующей приложению ближайшей к подстанции нагрузки.

4. Искомое напряжение находится путем пересечения полученной характеристики с прямой падения напряжения на участке сети от подстанции до данной нагрузки.

5. Режим напряжения сети для следующей, более удаленной от подстанции нагрузки можно найти графически, путем вычитания из характеристики, построенной для тока с шин подстанций, характеристики крайней нагрузки и прибавления (или вычитания) падения напряжения на следующем участке.

В приложениях рассматриваются численный пример расчета для случая трех нагрузок на линии при двустороннем питании и метод построения расчетных характеристик с учетом напряжения сети.

Приложение 1. Пример расчета напряжения при трех нагрузках на участке питания.

Рассмотрим однопутный участок с двусторонним питанием длиной 30 км при наличии трех нагрузок на линии, приложенных на расстояниях, указанных на рис. 4.

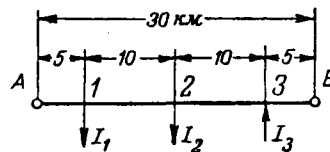


Рис. 4.

В качестве нагрузок принимаются трехсекционные мотор-вагонные поезда с двигателями ДК-105, рассчитанными на применение рекуперативного торможения. Нагрузки I_1 и I_2 — тяговые, а I_3 — рекуперативная. Сопротивление сети 0,1 ом/км.

Тогда составляющие токов, вытекающих с шин подстанций:

$$\begin{aligned} I'_a &= 0,83I_1; & I'_b &= 0,17I_1; \\ I''_a &= 0,5I_2; & I''_b &= 0,5I_2; \\ I'''_a &= -0,17I_3; & I'''_b &= -0,83I_3. \end{aligned}$$

На рис. 5 нанесены характеристики нагрузок $U = f(I)$ (кривые 1, 2, 3) и характеристики составляющих нагрузок $I'_a, I'_b, I''_a, I''_b, I'''_a, I'''_b$. Разделение нагрузок по состав-

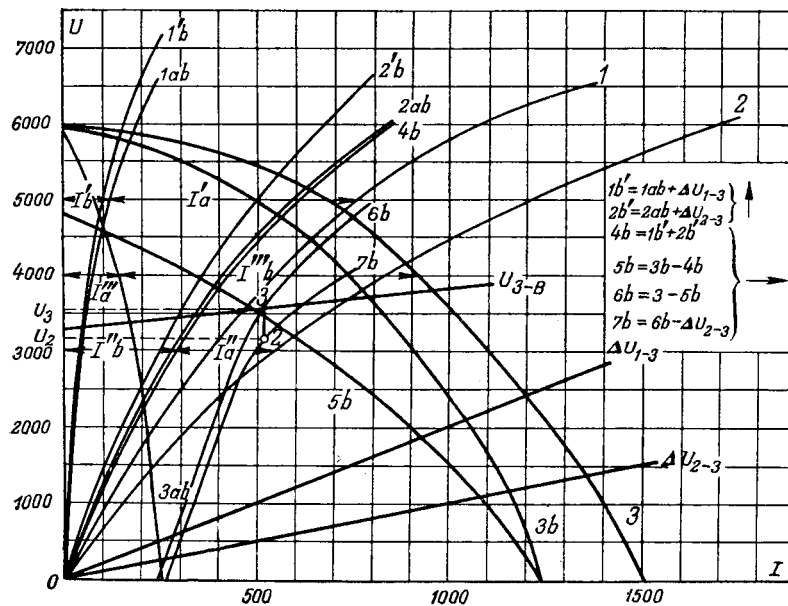


Рис. 5.

ляющим токов, вытекающих от шин подстанций А и В, определяется характеристиками $1ab$, $2ab$ и $3ab$. Для определения режима напряжения в точке 3, в месте нахождения рекуперирующего поезда, выполним приведение характеристик нагрузок в точках 1 и 2 к точке 3. Для этого к составляющим I'_b и $I''_b = f(U)$ прибавляем падение напряжения на участках сети: 1) участка 1—3 с сопротивлением 2 ом, в результате получается кривая $1b'$ и 2) участка 2—3 с сопротивлением 1 ом, что дает кривую $2b'$. Обе кривые в сумме дают составляющую тягового тока (кривая $4b$), вытекающего от подстанции В и приведенного к напряжению U_3 .

Составляющая рекуперативного тока со стороны подстанции В характеризуется зависимостью $3b$. При одинаковых напряжениях разность токов по кривым $3b$ и $4b$ даст действительный ток, который протекает на участке 3—В от рекуперирующего поезда 3 к подстанции В (кривая $5b$).

Пересечение кривой $5b$ с прямой зависимости напряжения от тока на участке 3—В в точке 3 даст искомое значение напряжения U_3 .

Для определения напряжения в точке 2 следует сначала определить зависимость тока на участке 2—3 от напряжения U_3 . Такую зависимость ($6b$) можно получить путем вычитания абсцисс кривой $5b$ из абсцисс кривой 3. Так как токи направлены от В к А, то из $6b$ следует вычесть падение напряжения на участке 2—3, в результате чего получается кривая $7b$.

Зная напряжение U_3 , можно найти значения тока I_{2-3} и напряжения U_2 по кривой $7b$.

Приложение 2. Внешние характеристики электроподвижного состава при тяговом и рекуперативном режимах для расчета нагрузок сети.

Для расчета кратковременных колебаний напряжения, как указывалось, необходимо знать внешние характеристики нагрузок $U = f(I)$ при тяговом и тормозном режимах для данной, постоянной скорости движения.

При тяговом режиме эта зависимость может быть получена при выбранной группировке двигателей на основе характеристики намагничивания $\frac{E}{\omega} = f(I)$. Более сложное построение указанной зависимости при режиме рекуперативного торможения.

Обычно в процессе рекуперативного торможения тяговые двигатели, получающие независимое возбуждение, работают в режиме со встречным смешанным возбуждением

генераторов с характеристикой по форме, аналогичной кривой 1 (рис. 2).

При постоянной скорости вращения возбудителя зависимость $U = f(I)$ можно построить известными методами [Л. 1] на основании характеристик намагничивания $\frac{E}{\omega} = f(I)$

и $\frac{e}{n} = f(i_b)$ двигателей и возбудителя.

Построение осложняется, если учесть изменение скорости вращения приводного двигателя возбудителя, обусловленное изменением нагрузки и напряжения сети и увеличивающее диапазон колебаний напряжения на двигателях.

Действительно, при повышении напряжения сети скорость вращения двигателя возбудителя растет, вместе с нею растут напряжение возбудителя и э. д. с. тяговых двигателей в генераторном режиме; при понижении напряжения сети имеет место обратный процесс.

Скорость вращения возбудителя изменяется значительно быстрее, чем скорость поезда, и потому влияние этого фактора можно учитывать, полагая скорость движения постоянной, т. е. при тех же условиях, при каких рассматриваются режимы кратковременных колебаний напряжения сети.

Всякая рекуперативная система с независимым возбудителем характеризуется определенной зависимостью между током якоря и н. с. возбудителя для данной ступени независимого возбуждения. Вид этой функции полностью определяется выбранной схемой включения возбудителя и стабилизирующего элемента.

Рассмотрим в качестве примера метод построения характеристик $U = f(I_a)$ для возбудителя с одной независимой и одной встречной обмоткой возбуждения, обтекаемой током якорей тяговых двигателей.

На рис. 6 дана скорость вращения $n = f(P)$ при различных значениях напряжения на двигателе возбудителя (кривые 1).

При постоянной н. с. независимой обмотки возбуждения для каждого значения тока I_a можно найти н. с. возбудителя и соответствующее значение $k = \frac{e}{n_0}$ для скорости вращения n_0 . Для любой другой скорости вращения n э. д. с. возбудителя $e = k \frac{n_0}{n}$. Но $e = cI_b$, где I_b — ток возбуждения тяговых двигателей. Следовательно, $P = cI_b^2 = ck \left(\frac{n}{n_0} \right)^2 = \frac{c_1}{n^2}$.

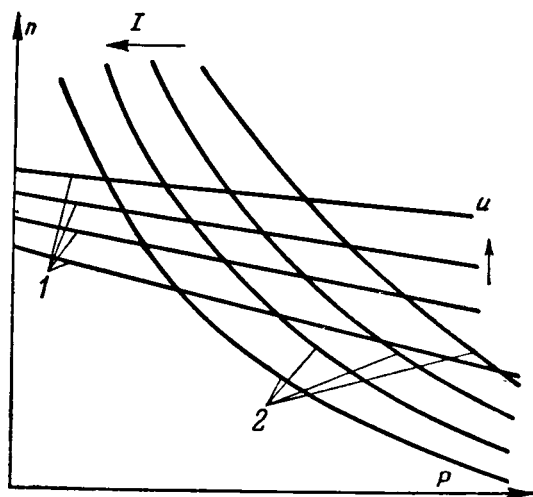


Рис. 6.

$P = f(n)$ для различных значений I_a дано на рис. 6 в виде пучка кривых 2.

Пересечения пучков 1 и 2 дают значения n , U , P и

$$I_b = \sqrt{\frac{P}{c}}.$$

При данной скорости движения для полученных значений I_b по характеристикам тяговых двигателей можно найти э. д. с. E и напряжения на тяговых двигателях $\Sigma(E - I_a r_a) = U_{\partial}$.

Результаты расчетов для различных напряжений сети могут быть сведены в такую таблицу:

I_a	$U_c = U_1$				$U_c = U_2$				$U_c = U_k$			
	n_1	P_1	I_{b1}	$U_{\partial 1}$	n_2	P_2	I_{b2}	$U_{\partial 2}$	n_k	P_k	I_{bk}	$U_{\partial k}$

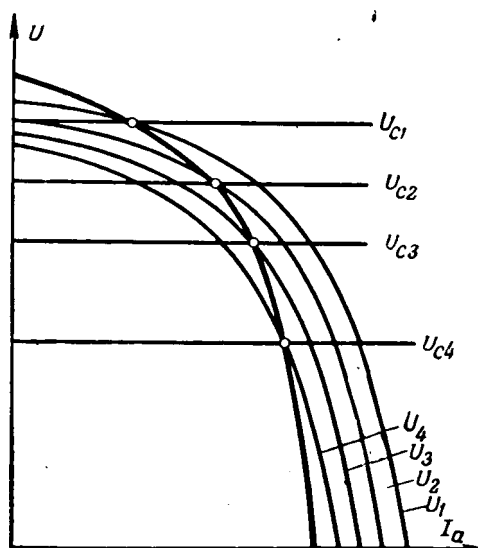


Рис. 7.

На основании данных подобной таблицы на рис. 7 построено $U_{\partial} = f(I_a)$ для различных значений напряжения сети $U_c = U_1, U_2, \dots, U_k$.

Пересечения характеристик $U_{\partial} = f(I_a)$ с горизонтальными прямыми $U_c = U_1, U_c = U_2, U_c = U_k$ дадут точки искомой кривой $U = f(I_a)$, показанной жирной линией на рис. 7.

Литература

1. Б. Н. Тихменев и Л. М. Трахтман. Подвижной состав электрических железных дорог. Трансжелдориздат, 1951.
2. Проектирование железнодорожных магистралей электрической тягой. Трансжелдориздат, 1935.

[2.2.1953]



Автоматическое управление электрическим подвижным составом с ионными преобразователями

Кандидат техн. наук, доц. Б. П. ПЕТРОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Для управления тяговыми двигателями электроподвижного состава даже большой мощности обычно используются различного вида электроаппаратные устройства, в большинстве случаев основным элементом которых является групповой коммутационный аппарат — контроллер, физорегулятор и пр.

При ступенчатом автоматическом управлении служебные приводы этих аппаратов находятся под контролем реле, при плавном управлении они контролируются регулятором ускорения.

Системы с реле ускорения не могут обеспечить четкий пуск или торможение при большом числе ступеней и значительных ускорениях и замедлениях. При ступенчатом управлении также хуже используется сцепной вес поезда. Системы плавного управления наиболее перспективны и находят все большее применение, но исследовались лишь применительно к реостатному управлению с учетом только одного инерционного элемента — массы поезда [Л. 1].

Ниже рассматриваются основные направления и методы исследования автоматического управления электроподвижным составом при плавном управлении.

Рассматриваются: основные явления в схемах автоматического управления электроподвижным составом с ионными преобразователями; влияние параметров регуляторов ускорения на устойчивость; переходные процессы и установившиеся режимы при одиночной и параллельной работе систем управления.

тора (например, посредством коллекторного регулятора) — пуск осуществляется изменением подведенного к двигателям напряжения U_c в результате

поворота управляющего группового аппарата.

С некоторыми допущениями такая система может быть сведена к представленной на рис. 1 схеме, где потенциометр бесконечно большой мощности Π со скользящей по нему щеткой \mathcal{W} имитирует преобразовательное устройство: трансформатор — выпрямитель. Сервопривод $СП$ питается от линейного усилителя с коэффициентом усиления k_1 . Усилитель совместно с шунтом $R = k_2$ и задающим потенциометром U_0 соответствует простейшему регулятору ускорения. Остальные обозначения приведены на рисунке.

В установившемся режиме пуска, когда $I = I_y = \text{const}$, в любой момент времени

$$U_c = I_y(r_d + R) + c_1\Phi_y v, \quad (1)$$

где $c_1\Phi_y$ — постоянная и поток возбуждения двигателя, в сек/м;

v — скорость движения, м/сек.

Дифференцируя (1) по времени t , получаем уравнение характеристики пуска и торможения [Л. 1]:

$$\frac{dU_c}{dt} = c_1\Phi_y \frac{dv}{dt} = c_1\Phi_y \frac{(F_y - w)}{M} = \varphi(I_y; M; w), \quad (2)$$

где F_y — установившееся во время пуска тяговое усилие, кг;

w — общее сопротивление движению, кг;

M — масса поезда, кгсек/м.

Обычно dU_c/dt пропорционально скорости вращения служебного привода n_{cn} , поэтому для получения неизменного установившегося тока необходимо обеспечить согласно (2) определенную скорость вращения привода. Если эта скорость больше требуемой, ток тяговых двигателей увеличивается, если меньше — снижается. В данном случае n_{cn} — распорядительный элемент [Л. 2], посредством которого устраняется несоответствие между требуемым и действительным значениями тока в цепи двигателей.

Как и при реостатном управлении, для обеспечения устойчивости характеристика системы управления должна пересекаться с характеристикой

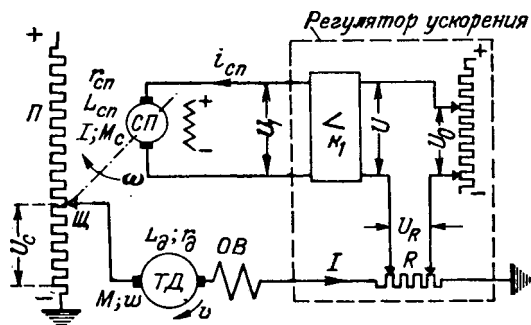


Рис. 1. Эквивалентная схема пуска тяговых двигателей плавным изменением подведенного напряжения.

Принципы исследования удобно изложить на примере весьма перспективной системы автоматического пуска тяговых двигателей постоянного тока при питании их от однофазной сети через ионный преобразователь, где независимо от способа управления — сетками или путем многоступенчатого переключения обмоток трансформатора

пуска и торможения при заданном установившемся токе (рис. 2) и наклон ее в точке пересечения должен удовлетворять условию

$$\frac{d}{dl_y} \left(\frac{dU_c}{dt} \right)_{\text{по харак- теру управ- ления}} < \frac{d}{dl_y} \left(\frac{dU_c}{dt} \right)_{\text{по харак- теру пуска}} \quad (3)$$

Это элементарное условие устойчивости справедливо только для одной автономной системы управления при пренебрежении всеми другими инерционными элементами, кроме массы поезда. Но вследствие инерции сервопривода и наличия индуктивности цепей сервопривода и двигателя возможно опасное для поезда нарушение устойчивости с возникновением незатухающих колебательных процессов.

Рис. 2. Взаимное расположение характеристик пуска 1 системы управления 2, обязательное для устойчивой работы.

регулирования. Предварительно необходимо принять некоторые допущения, чтобы устранить влияние имеющихся в системе нелинейностей.

При последовательном и смешанном возбуждении нелинейными зависимостями связаны поток возбуждения Φ и индуктивность двигателя L с током I . В дальнейшем индуктивность L принята неизменной и равной среднему значению за переходный период. Влияние насыщения двигателей выясняется путем исследования пуска торможения двух видов двигателей: сильно насыщенного ($\Phi = \Phi_{\text{пост}}$) и мало насыщенного. Для мало насыщенного двигателя принято, что во время переходного режима скорость движения постоянна.

Начальные условия выбираются так, чтобы до начала переходного процесса ($-\infty < t < 0$) момент вращения служебного привода M_{cn} был равен моменту сопротивления на его валу M_c . Переходный процесс вызывается внезапным увеличением задающего напряжения U_o . Во время переходного процесса обычно скорость вращения сервопривода меняется только по величине, а не по знаку. При этих условиях влияние нелинейности от сил трения на валу сервопривода также устраняется.

Используя принятые допущения и обозначения рис. 1, применительно к насыщенному двигателю мы можем составить следующую систему уравнений, охватывающую замкнутую цепь регулирования:

$$u = U_o - U_R; \quad (4)$$

$$U_1 = k_1 u; \quad (5)$$

$$U_R = I k_9; \quad (6)$$

$$k_2 U_1 = i_{cn} + T_{cn} \frac{di_{cn}}{dt} + k_2 k_3; \quad (7)$$

$$k_4 M_{cn} = i_{cn}; \quad (8)$$

$$M_{cn} = J \frac{d\omega}{dt} + M_c; \quad (9)$$

$$\alpha = \int_0^t \omega dt + \alpha_o; \quad (10)$$

$$U_c = k_5 \alpha; \quad (11)$$

$$I + T_\partial \frac{dI}{dt} = k_6 (U_c - E); \quad (12)$$

$$k_7 E = v; \quad (13)$$

$$v = \int_0^t a dt + v_o; \quad (14)$$

$$a = \frac{F - w}{M}; \quad (15)$$

$$k_8 F = I. \quad (16)$$

Используя функциональные преобразователи по Карсону и принимая для начальных условий

$$I = I_o = \frac{W}{k_8}; \quad i_{cn} = i_{cno} = M_c k_4; \quad \alpha = \alpha_o; \quad v = v_o,$$

получим решение для изображения тока:

$$I(p) = \frac{Q(p)}{N(p)}, \quad (17)$$

где p — оператор,

$$Q(p) = I_o (A_o p^4 + A_1 p^3 + A_2 p^2 + A_3 p) + A_4, \quad (18)$$

$$N(p) = A_o p^4 + A_1 p^3 + A_2 p^2 + A_3 p + A_5, \quad (19)$$

а коэффициенты

$$A_o = J M T_{cn} T_{\partial s}; \quad A_1 = J M (T_{cn} + T_{\partial s}),$$

$$A_2 = \frac{k_6}{k_7 k_8} J T_{cn} + M \left(\frac{k_2 k_3}{k_4} T_{\partial s} + J \right),$$

$$A_3 = \frac{k_6}{k_7 k_8} J + \frac{k_2 k_3}{k_4} M,$$

$$A_4 = \frac{k_1 k_2 k_3 k_6 k_7 M U_o - k_4 k_5 k_6 k_7 M M_c + k_2 k_3 k_6 w}{k_4 k_7},$$

$$A_5 = \frac{k_2 k_3 k_6}{k_4 k_7 k_8} + \frac{k_1 k_2 k_3 k_6 k_9 M}{k_4},$$

причем $T_{cn} = L_{cn}/r_{cn}$; $T_{\partial s} = L_{\partial s}/r_{\partial s} + R$; $N(p) = 0$ — характеристическое уравнение данной системы [Л. 3].

Рассматривая пуск ненасыщенного двигателя, следует в исходной системе уравнения оставить без изменения (4)...(12), уравнения (13)...(15) исключить, а уравнение (10) заменить на

$$E = k'_{11} \Phi = k_{11} (\Phi_o + k_{12} I). \quad (20)$$

Новая система уравнений также может быть решена относительно изображения тока $I(p)$.

Характеристические уравнения для этого случая

$$S(p) = B_o p^4 + B_1 p^3 + B_2 p^2 + B_3 p + B_4, \quad (21)$$

где коэффициенты

$$B_o = T_{\partial s} T_{cn} J,$$

$$B_1 = J [T_{\partial s} + T_{cn} (1 + k_6 + k_{11} k_{12})],$$

$$B_2 = J(1 + k_6 k_{11} k_{12}) + T_{\partial s} \frac{k_2 k_3}{k_4},$$

$$B_3 = (1 + k_6 k_{11} k_{12}) \frac{k_2 k_3}{k_4},$$

$$B_4 = \frac{k_1 k_2 k_5 k_6 k_9}{k_4}.$$

Применяя к (19) и (21) обычные методы исследования [Л. 4], представляется возможным выяснить устойчивость системы, а используя обратные преобразования по изображению для тока $I(p)$ или приближенные методы оценки качества регулирования, можно установить примерный характер переходных процессов для любых конкретных условий. Ниже приведен пример такого расчета.

Воспользуемся полученными соотношениями для выяснения некоторых общих закономерностей.

Прежде всего сравним оба варианта по степени устойчивости. Предварительно, деля (19) на M и принимая $M = \infty$, приводим систему к условию $v = v_0 = \text{const}$:

$$R(p) = C_0 p^4 + C_1 p^3 + C_2 p^2 + C_3 p + C_4, \quad (22)$$

где коэффициенты

$$C_0 = JT_{cn} T_{\partial s}, \quad C_1 = J(T_{cn} + T_{\partial s}),$$

$$C_2 = J + T_{\partial s} \frac{k_2 k_3}{k_4}, \quad C_3 = \frac{k_2 k_3}{k_4},$$

$$C_4 = \frac{k_1 k_2 k_5 k_6 k_9}{k_4}.$$

Теперь сравним уравнения (19) и (22). Переменным параметром следует считать $k_1 k_9$, так как регулятор наиболее доступен для изменения.

Первое условие устойчивости Гурвица удовлетворяется для обоих двигателей только при $k_1 k_9 > 0$, второе условие представится неравенствами

$$B_3(B_1 B_2 - B_0 B_3) - B_1^2 B_4 > 0 \quad (23)$$

для мало насыщенного двигателя и

$$C_3(C_1 C_2 - C_0 C_3) - C_1^2 C_4 > 0 \quad (24)$$

для сильно насыщенного двигателя.

В данном случае $B_0 = C_0$, $B_1 > C_1$, $B_2 > C_2$, $B_3 > C_3$ и $B_4 = C_4$, причем обычно $B_0 < B_1 < B_2 < B_3 < B_4$. Очевидно, что при малом насыщении и тех же значениях индуктивности цепи условия устойчивости (23) удовлетворяются проще; при больших значениях $k_1 k_9$ и переходные процессы более благоприятны, чем при сильно насыщенном двигателе (24). Отсюда следует, что иногда можно ограничиваться исследованием устойчивости и переходных процессов только для этого случая: $\Phi = \Phi_0 = \text{const}$.

Из сравнения (17) и (22) также очевидно, что по условиям устойчивости предельное значение $k_1 k_9$ при $v_0 = \text{const}$ должно быть больше нуля, а при $v \neq \text{const}$ может быть меньше нуля, таким образом, в первом случае требования устойчивости более жесткие.

При анализе систем управления важно найти оптимальное значение $k_1 k_9$, удовлетворяющее не только условию устойчивости, но и ряду проти-

воречивых дополнительных условий. Первое из них — должно быть обеспечено апериодическое, но интенсивное протекание переходного процесса, обеспечивающее быстрое достижение тока и тягового усилия, близких к установившимся (кривая 1, рис. 3). Нарушение этого требования приводит к снижению среднего ускорения за время пуска и недоиспользованию сцепного веса (кривая 2, рис. 3) или к нарушению сцепления и резким колебаниям тягового усилия (толчком, кривая 3). Однако наибольшая интенсивность увеличения ускорения d^2v/dt^2 не может быть произвольно большой, так как организм человека плохо приспособлен к резким увеличениям ускорения. Интенсивность изменения тока и ускорения также в большей мере определяются параметрами регулятора $k_1 k_9$. В этом можно наглядно убедиться, несколько упростив уравнение (19) и положив $T_{cn} = T_{\partial s} = 0$. Тогда получим новое характеристическое уравнение:

$$F(p) = D_0 p^2 + D_1 p + D_2, \quad (25)$$

где

$$D_0 = MJ, \quad D_1 = \frac{k_6}{k_7 k_3} J + \frac{k_2 k_3}{k_4} M,$$

$$D_2 = \frac{k_2 k_3 k_6}{k_4 k_7 k_3} + \frac{k_1 k_2 k_5 k_6 k_9 M}{k_4}.$$

Корни этого уравнения:

$$p_{1,2} = -\frac{D_1}{2D_0} \pm \sqrt{\frac{D_1^2}{4D_0^2} - D_2}.$$

При $D_2 \leq \frac{D_1^2}{4D_0^2}$ переходный процесс апериодич-

ский; уменьшение D_2 в результате уменьшения $k_1 k_9$ приводит к замедленному протеканию процесса, так как один из корней непрерывно увеличивается.

Второе дополнительное условие — ограничение влияния обычно меняющихся в процессе эксплуатации условий движения (M и w) на установившиеся во время пуска или торможения ток и ускорение.

Полагая в уравнении (17) $p = 0$, получим [Л. 3] формулу для определения тока, установившегося при пуске насыщенного двигателя:

$$I_y = \frac{k_5 k_7 k_8 M (k_1 k_2 U_0 - k_4 M_c) + k_2 k_3 k_8 w}{k_1 k_2 k_3 k_7 k_8 k_9 M + k_2 k_3}. \quad (26)$$

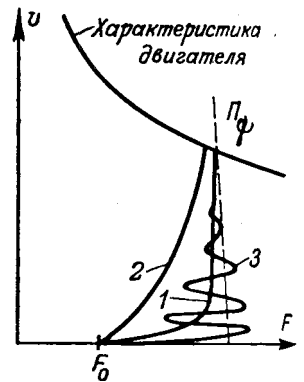


Рис. 3. Кривые изменения тягового усилия F при пуске, обеспечивающие (1) и не обеспечивающие (2 и 3) оптимальное использование сцепления.

Учитывая (15) и (16), получаем для установившегося ускорения:

$$a_y = \frac{k_5 k_7 (k_1 k_2 U_0 - k_4 M_c) - k_1 k_2 k_5 k_7 k_8 k_9 \omega}{k_1 k_2 k_5 k_7 k_8 k_9 M + k_2 k_3}. \quad (27)$$

Из (26) и (27) следует, что чем больше $k_1 k_3$, тем значительнее влияние на a_y и I_y изменяющихся условий движения. Если система управления — независимая от тока хронометрическая ($k_1 k_3 = 0$), то в данном случае установившееся ускорение остается неизменным при любых M и ω . Однако их влияние на установившийся ток — наибольшее. При $k_1 k_3 > 0$ влияние M и ω на a_y и I_y иногда может быть чрезмерным. Очевидно, оба противоречивых дополнительных условия не могут быть одновременно полностью удовлетворены и задача решается компромиссом.

При выяснении влияния M и ω на a_y и I_y в конкретных случаях нет необходимости прибегать к линеаризации кривой намагничивания. Эти зависимости могут быть выяснены совершенно точно путем построения и взаимного наложения характеристик пуска — торможения при разных значениях M и ω и системы управления и установлена оптимальная ее форма. Затем путем линеаризации отдельные точки ее проверяются на устойчивость. Уравнение характеристики системы управления, удовлетворяющее условию $a_y; I_y \neq f(M, \omega)$ может быть получено из (2), если принять $\frac{dv}{dt} = a_y = \text{const}$.

Эта характеристика повторяет в соответствующем масштабе кривую намагничивания двигателя.

Если система автоматического управления предназначена для параллельной работы с несколькими другими в составе одного поезда, задача исследования устойчивости и выяснение основных зависимостей в установившемся режиме усложняется.

Для примера рассмотрим параллельную работу двух систем при учете только одного инерционного элемента — массы поезда. Согласно обозначению рис. 1 для системы управления первой самодвижущейся повозки будут справедливы уравнения:

$$u' = U_{01} - I_1 k_9; \quad (28)$$

$$U_1 = k_1 u'; \quad (29)$$

$$U_1 = k_3 \omega; \quad (30)$$

$$a = \int_0^t \omega dt + a_0; \quad (31)$$

$$U_c = k_5 a; \quad (32)$$

$$k_6 (U_c - E) = I_1; \quad (33)$$

$$k_7 E = v; \quad (34)$$

$$v = \int_0^t a dt; \quad (35)$$

$$a = \frac{F_1 + F_2 - \omega}{M}; \quad (36)$$

$$k_8 F_1 = I_1. \quad (37)$$

Для второй системы управления некоторые уравнения будут отличаться только индексами.

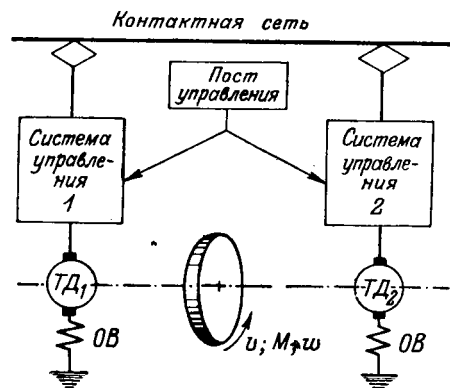


Рис. 4. Принципиальная схема параллельной работы двух систем автоматического управления.

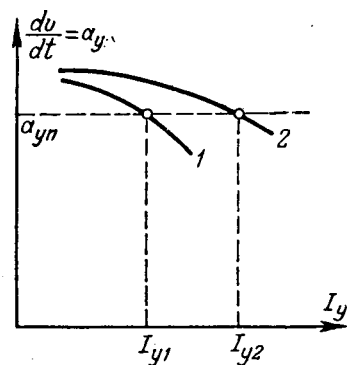


Рис. 5. Определения распределения установившихся пусковых токов между параллельно работающими системами по их внешним характеристикам 1 и 2.

Решая уравнения и вводя обозначения

$$\beta = \frac{k_1 k_5 k_0 k_9}{k_3}, \quad \gamma = \frac{k_6}{k_7 k_8 M},$$

приходим к характеристическому уравнению

$$p^2 + 2p(\beta + \gamma) + \beta(2\gamma + \beta) = 0. \quad (38)$$

Увеличение степеней свободы при двух параллельно работающих системах повысило порядок уравнения, что свидетельствует о новых возможностях нарушения устойчивости и изменении требований к подбору параметров.

Дополнительно возникает также задача выяснения „распределения нагрузки“ между двигателями отдельных повозок, так как системы управления могут отличаться. Для получения решения удобно построить „внешние характеристики“ каждой из систем управления. Уравнение внешних характеристик получаем, приравнявая в общем виде уравнение (2)

$$\frac{dU_c}{dt} = f(I_y) \frac{dv}{dt} = f(I_y) a_y \quad (2')$$

и уравнение характеристики системы управления

$$\frac{dU_c}{dt} = \varphi(I_y). \quad (39)$$

Тогда искомая зависимость для любой из повозок поезда будет (рис. 4):

$$a_y = \xi(I_y). \quad (40)$$

Ускорение для всех повозок одинаковое, и прямая $a_y = a_{yn}$ пересекается с внешними характеристиками (рис. 5) в точках, соответствующих их уста-

новившимся нагрузкам (I_{y1} ; I_{y2}). Например, для насыщенного двигателя из уравнения (2') имеем:

$$\frac{dU_c}{dt} = c_1 \Phi_o a_y, \quad (41)$$

а для зависимой от тока хронометрической системы уравнение ее характеристики будет:

$$\frac{dU_c}{dt} = k_o - k_4 I_y. \quad (42)$$

Приравняв (41) и (42), получим уравнение внешней характеристики:

$$a_y = \frac{k_o - k_4 I_y}{c_1 \Phi_o}, \quad (43)$$

k_4 пропорционально $k_1 k_9$. Поэтому, чем больше $k_1 k_9$, тем круче спадают внешние характеристики, и при одном и том же их расхождении неравномерность нагрузки двигателей отдельных повозок будет меньше. Предел увеличению $k_1 k_9$ ставится также условиями устойчивости и оптимальным характером протекания переходного процесса.

Внешние характеристики должны быть близки друг другу и для их сближения в схемах управления следует предусмотреть корректирующие устройства.

Внешние характеристики строятся по реальным кривым намагничивания без каких-либо допущений и вполне точно выясняют распределение нагрузки между двигателями отдельных повозок.

Пример. Для иллюстрации метода приведем результаты расчета применительно к наиболее простой схеме — Ленинградского политехнического института. Схема может быть получена из схемы рис. 1, если положить $k_1 = 1$. Для полноты рассмотрения учтено влияние тока в якоре сервопривода на падение напряжения в сопротивлении R . В расчете использованы следующие данные: $M = 1730 \text{ кгсек}^2/\text{м}$; $N = 150 \text{ кг}$; $U_o = 24 \text{ в}$; $r_{cn} = 1,2 \text{ ом}$; $r_T = 0,15 \text{ ом}$; $i_{cno} = 2,12 \text{ а}$; $M_c = 0,051 \text{ кгм}$; $Ik_6 = 75 \cdot 10^{-6} \text{ кгм/сек}^2$; $k_3 = 0,028 \text{ вмин/об}$; $k_4 = 0,024 \text{ кгм/а}$; $k_2 = 93 \text{ всек/м}$; $k_5 = 9,5 \text{ кг/а}$; $I_o = 15,7 \text{ а}$; $v_o = n_{cno} = 0$.

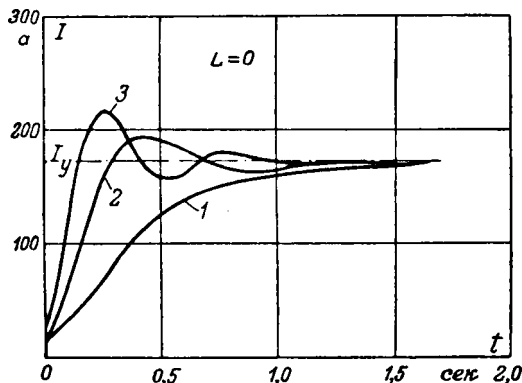


Рис. 6. Переходный процесс $I(t)$ без учета индуктивности цепи двигателя для трех разных характеристик системы управления.

Для сравнения приняты три вида характеристик системы управления, отличающиеся начальным значением скорости изменения напряжения (при $I = 0$) и темпом ее уменьшения при увеличении тока. С этой целью приняты следующие значения изменения напряжения на потенциометре Π на один оборот в минуту якоря сервопривода: характеристика 1 — 0,1044; 2 — 0,53; 3 — 1,435 вмин/об. Для

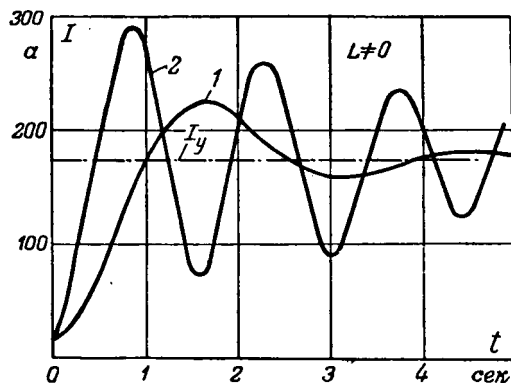


Рис. 7. Переходный процесс $I(t)$ с учетом индуктивности цепи для характеристик 1 и 2 системы управления.

упрощения решения индуктивностью якоря сервопривода пренебрегали ($L_{cno} = 0$).

Расчет выполнен в двух вариантах: для $L = 0$ и $L = 0,1 \text{ гн}$. Для первого варианта по данным расчета кривые переходного процесса построены на рис. 6, а для второго — на рис. 7. На рис. 8 приведены кривые зависимости установившегося пускового тока I_y от сопротивления движения ω , включая сопротивление от подъема в интервале его изменения от -35 до $+90^\circ/\infty$ (для характеристик 1—3), а также для характеристики неизменного ускорения ($a_y \neq f(\omega) = \text{const}$).

Из рис. 6 следует, что при $L = 0$ и всех видах характеристик системы управления переходный процесс устанавливается, но только при характеристике 1 он аperiodический, при характеристиках 2, 3 он колебательный, и чем круче характеристика, тем больше амплитуда колебания и продолжительность затухания. Если же учесть индуктив-

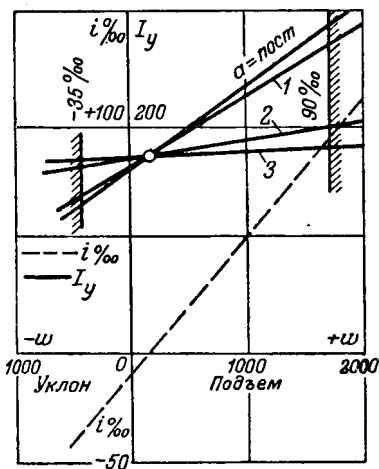


Рис. 8. Кривые, характеризующие влияние сопротивления движения ω от подъема i на установившийся ток I_y при трех разных характеристиках системы управления, а также для характеристики неизменного ускорения $a_y = \text{const}$.

ность цепи двигателя (рис. 7), то во всех трех случаях процесс колебательный и при самой крутой характеристике 3 колебания незатухающие.

По рис. 8 устанавливаем, что из трех рассматриваемых характеристик в наибольшей мере обеспечивает неизменность ускорения первая, но одновременно при ней наблюдается наибольшее изменение установившегося тока.

Очевидно, выбор оптимальной формы характеристики системы управления определяется конкретными требованиями к постоянству ускорения и допустимыми пределами изменения тока. Но обязательно должны быть устранены опасные колебательные процессы.

Заключение. Из изложенного с очевидностью следует, что:

1) полная характеристика переходных процессов в схемах плавного автоматического управления электроподвижным составом с ионными преобразователями может быть получена только с учетом всех важнейших инерционных и других элементов системы управления, а также ее параллельной работы с другими системами в составе поезда;

2) расчет устойчивости и переходных процессов для насыщенной и ненасыщенной частей магнитной характеристики двигателя обеспечивает достаточно полную проверку свойств системы управления;

3) расчет переходных процессов должен дополняться построением характеристик установив-

шегося режима на основе реальных кривых намагничивания двигателя и характеристик системы управления;

4) в целом предложенный метод расчета дает возможность правильно выбрать основные параметры схемы автоматического управления электроподвижным составом с ионными преобразователями.

Литература

1. Б. П. Петров. Основные принципы автоматического управления электроподвижным составом постоянного тока. Электричество, № 5, 1949.

2. Структурные характеристики систем автоматического регулирования. Редактор В. Б. Утоков. Госэнергоиздат, 1948.

3. К. А. Круг. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Госэнергоиздат, 1948.

4. М. В. Мееров. Основы автоматического регулирования электрических машин. Госэнергоиздат, 1952.

[29.11.1952]



Влияние емкостей ионных преобразователей на погасание вентиляй

Кандидат техн. наук М. М. АКОДИС

Уральский политехнический институт

В ионных вентилях в начале периода коммутации емкости схемы (рис. 1), заряженные до мгновенного значения междуфазного напряжения, соответствующего моменту зажигания, разряжаются на контур, замыкаемый вступающим в работу вентиляем.

При разряде емкости на замыкаемый контур в гасимом вентиле разрядный ток направлен встречно рабочему току, вследствие чего ток вентиля падает до нуля и прекращается, как это показано слева на рис. 1.

Переход тока с гасимого вентиля на емкость через зажигаемый вентиль происходит так же, как и переход на зажигаемый вентиль (анод) при нормальных условиях коммутации, но скорость изменения тока во много раз больше, так как вследствие ничтожной индуктивности соединительных проводников L_1' , L_2' разрядной цепи конденсаторов собственная частота контура очень высока.

За время нарастания разрядного тока до рабочего конденсатор частично разрядится до напряжения u_1' (рис. 2,а), так как скорость нарастания рабочего тока этой фазы (через L_T , рис. 1,б) относительно мала. В фазе I напряжение на емкости за это время возрастет до u_2' (рис. 2,а).

Указывается, что емкости преобразовательных установок, повышающие в ряде случаев надежность работы за счет снижения скорости нарастания обратного напряжения после окончания коммутации тока, в других случаях, в особенности в инверторных установках, могут повлечь за собой нарушения работы преобразовательных установок вследствие гашения вентилей разрядными токами емкостей в момент зажигания очередного вентиля.

Выпрямляемое напряжение, как и при нормальной коммутации, равно полусумме напряжений, пока горит дуга, и после ее гашения должно восстановиться до напряжений соответствующих емкостей с каждой стороны вентиля.

Восстановление напряжения должно происходить с частотой, определяемой ничтожными индуктивностями разрядного контура L_1' и L_2' и емкостью C_ϕ , которая может быть и значительно

меньше емкости $\frac{3}{2}C_\phi + \frac{C_3}{2}$ (рис. 1,б), в данном

случае являющейся источником напряжения. Учитывая исключительно большую скорость снижения тока и восстановления напряжения, мы можем ожидать, что при подобной коммутации в случае значительной мощности вентиль не сможет запереть разрядные токи конденсатора и произойдет обратное зажигание, колебания будут продолжаться.

Если при подобном обратном зажигании или даже в отсутствии обратного зажигания обратный ток превысит ток в дежурной дуге возбуждения, эта дуга может погаснуть. При снижении тока разряда конденсаторов дуга прямого тока не восстановится вследствие исчезновения катод-

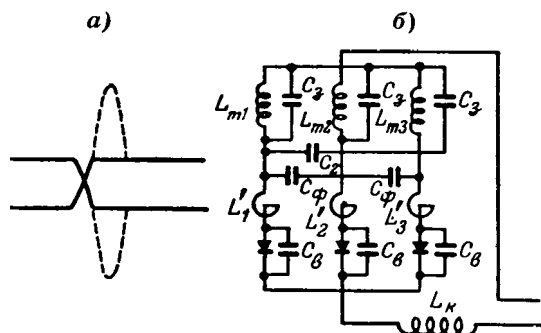


Рис. 1. Коммутация высокочастотного тока разряда конденсаторов.

ного пятна. В результате ток через этот вентиль может прекратиться (рис. 2,б).

После подобного процесса гашения заканчивающего работу вентиля питание потребителей должно осуществляться в основном от емкостей вступающей в работу фазы, так как ток через обмотку трансформатора возрастает с относительно малой скоростью в сравнении со скоростью изменения токов разряда емкостей.

Если после достижения установившегося значения разрядного тока конденсатора не произойдет обратного зажигания в погашенном вентиле, питание потребителей в первый момент будет также происходить от емкостей вступившей в работу фазы, так как индуктивность трансформатора ограничивает скорость нарастания тока в нем.

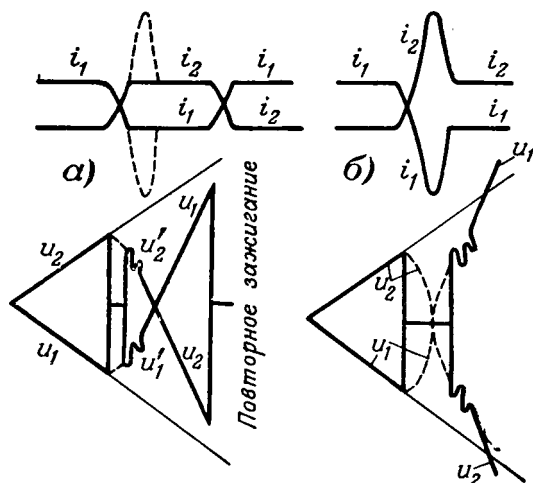


Рис. 2. Напряжение на вентиле и ток через него при наличии емкости.

а — при отсутствии обратного зажигания; б — при обратном зажигании на высокочастотном разряде.

В обоих случаях напряжение на емкостях C_ϕ и C_δ быстро нарастает, ускоряя процесс нарастания тока в фазе 2 трансформатора.

Ограничивая скорость снижения тока, индуктивность в погашенной фазе 1 вызывает повышение напряжения. В результате обратное напряжение на погашенном вентиле при характере процесса согласно первому варианту быстро снижается до нуля, меняет свой знак и снова начинает расти (рис. 2,а). При протекании процесса согласно второму варианту напряжение сразу начинает расти (рис. 2,б). Рост напряжения про-

должается до тех пор, пока оно не превысит напряжения зажигания вентиля в этом режиме. Учитывая большую скорость деионизации вентиля при протекании процесса по второму варианту (погашение дуги возбуждения), можно опасаться очень больших перенапряжений. Когда процесс идет согласно первому варианту, большие перенапряжения маловероятны, так как запирающее действие сеток возрастает сравнительно медленно и дуга должна восстановиться при сравнительно малом напряжении¹.

Демпфирующее сопротивление, включенное последовательно с емкостью C_ϕ и C_δ , предохранит от возможности подобного течения процесса лишь в том случае, если разрядный ток емкости не превысит существенно выпрямленный ток при любых возможных режимах работы.

Емкость C_δ в схеме рис. 1,б шунтирует только вступающий в работу вентиль. При успокоении колебаний аperiodический ток разряда по этой емкости может течь лишь в прямом направлении.

Индуктивность цепи разряда — соединительные шины и вентиль — во много раз меньше индуктивности рассеяния трансформаторов, поэтому в момент зажигания вентиля критическое сопротивление при разряде емкостей во много раз меньше сопротивления, необходимого для успокоения колебаний восстанавливающегося напряжения. Следовательно, успокоение цепей для обеспечения аperiodического разряда емкостей в момент зажигания вентиля не окажет заметного влияния на скорость восстановления напряжения.

При колебательном разряде емкости C_δ в схеме рис. 1,б дуга в вентиле фазы 2 может зажигаться и гаснуть, перезаряжая емкость. В этом случае также вероятно гашение дуги возбуждения при обратном зажигании вентиля разрядным током емкости. Перенапряжений не следует опасаться, но дуга может не перейти на следующую фазу и вступление в работу очередного анода может не состояться.

На рис. 3 приведены осциллограммы напряжения на шунтированном различными емкостями C_δ вентиле в начальный период коммутации. При наличии регулирования в момент зажигания дуги происходит колебательный процесс перезаряда емкости весьма высокой частоты (рис. 3, точки а, б, L'_1 и L'_2 весьма малы). Очевидно, вентиль вновь не зажжется до тех пор, пока емкость не разрядится через сравнительно большую индуктивность трансформатора. В примененных тиристорах за время разряда емкости C_δ запирающее действие сеток не восстанавливалось сколь угодно заметно, и новое зажигание происходило в самом начале нарастания положительного потенциала на аноде (рис. 3, точка в).

В выпрямителе при наличии регулирования, а в инверторе всегда в момент зажигания очередного вентиля наступает разряд емкостей участка схемы, закорачиваемого зажигаемым вентилем.

¹ В инитроне без вспомогательной дуги большие перенапряжения возможны и при протекании процесса по первому варианту.

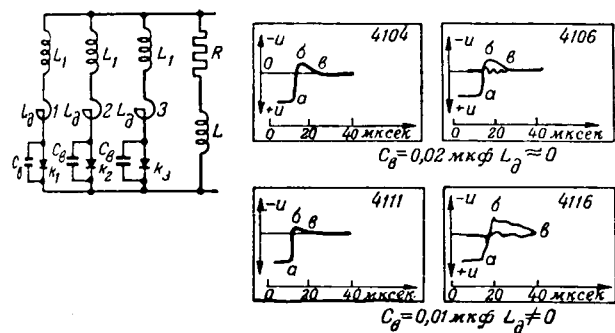


Рис. 3.

а—схема опыта; б—осциллограммы напряжения в начале коммутации на шунтированном емкостью вентиле.

В первый момент через зажигаемый вентиль проходит разрядная волна тока с почти отвесным фронтом короткого участка шин между вентилем и трансформатором. Амплитуда волны определяется отношением напряжения зажигания к волновому сопротивлению шин. При набегании на трансформатор разрядная волна отражается от «входной» его емкости, амплитуда волны тока почти удваивается.

Дальнейшее нарастание и снижение амплитуды волны тока зависят от соотношения между емкостью трансформатора и частотой колебания разрядной волны, обусловленной длиной шин, с одной стороны, и волновым сопротивлением шин, с другой стороны.

Если амплитуда разрядного тока шин совместно с разрядным током емкостей, шунтирующих вентили, в сумме не достигает значения выпрямляемого тока, то погасание горящего вентилья невозможно, и при каждом зажигании вентилья в схеме будут циркулировать только высокочастотные разрядные токи.

Как известно, в такой схеме при наличии небольшой индуктивности (например, трансформатора тока, индуктивность которого для крутых волн может быть очень мала) между шинами и входной емкостью трансформатора могут возникнуть значительные перенапряжения на трансформаторе, если собственная частота колебаний шин равна собственной частоте контура из концентрированной емкости и индуктивности [Л. 1].

Утверждение Рида [Л. 2], что в момент зажигания высоковольтного вентиля наблюдаются только низкочастотные колебания, неверно. В момент зажигания возможны только высокочастотные колебания. В его опытах емкости, непосредственно шунтирующие вентиль, были малы и частота колебаний разрядного тока очень велика. Повидимому, Рид не сумел преодолеть трудности, связанные с катодно-осциллографической записью этих разрядов, и наблюдал лишь вторую стадию процесса — сравнительно низкочастотный разряд перезаряженного конденсатора через индуктивность трансформатора (отрезок *бв* на осциллограмме рис. 3).

На рис. 4,б приведены осциллограммы, показывающие начальный период коммутации в мостовой схеме (рис. 4,а), где емкость 0,5 мкмф

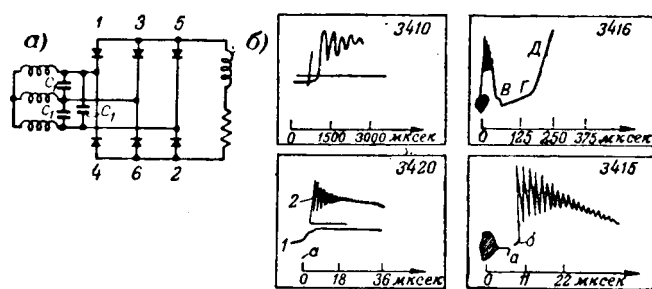


Рис. 4.

α —схема опыта, иллюстрирующая возможность гашения вентилей встречным током разряда емкости; δ —осциллограммы разряда междуфазной емкости.

включена между фазами и индуктивность соединительных проводов модели (между трансформатором и вентилями) увеличена до 130 мкГн. Через несколько микросекунд после зажигания (точка *a*, осциллограммы 3415, 3420) очередного вентиля горящий вентиль 1 (рис. 4, *a*) гасится и напряжение на нем восстанавливается с исключительно большой скоростью. Затем по мере разряда емкости C_1 через индуктивность трансформатора напряжение снижается и вентиль вновь зажигается (точка *в*, осциллограммы 3410, 3416, рис. 4, *б*) и горит до окончания коммутации (точка *г*), после чего напряжение вновь восстанавливается (точка *д*). Время воздействия первичного импульса обратного напряжения на погашаемый вентиль зависит от значения выпрямляемого тока. В этом случае вследствие большой емкости между фазами окончательная скорость восстановления напряжения мала.

Как видно из приведенных осциллограмм, скорость восстановления напряжения после гашения дуги разрядным током емкости чрезвычайно велика, частота колебаний восстанавливающегося напряжения достигает 680 кгц, а время коммутации высокочастотного тока разряда конденсатора — с момента зажигания очередного вентиля в точке *a* до начала восстановления напряжения в точке *б* — ничтожно мало.

Трудно предположить, чтобы в мощном вентиле при времени спада тока и восстановления напряжения в несколько микросекунд не произошло обратного зажигания.

В мостовой схеме возможен и несколько иной процесс. При коммутации в одной из групп (например, вентиля 1 на 3, рис. 5) при наличии регулирования емкость C_3 , шунтирующая вентиль 3, в момент зажигания разряжается через него. Одновременно емкость C_6 , шунтирующая вентиль 6, разряжается через вентиль 3 и включающиеся с ним последовательно две параллельные ветви — через вентиль 1 и емкость C_4 и через емкость C_5 и вентиль 2.

Через вентили 1 и 2 течет половина разрядного тока конденсатора C_6 и в каждом из них он направлен встречно рабочему току. Если амплитуда разрядного тока емкостей больше амплитуды выпрямляемого, то ток в вентилях 1 и 2 упадет до нуля, после этого напряжение начнет вос-

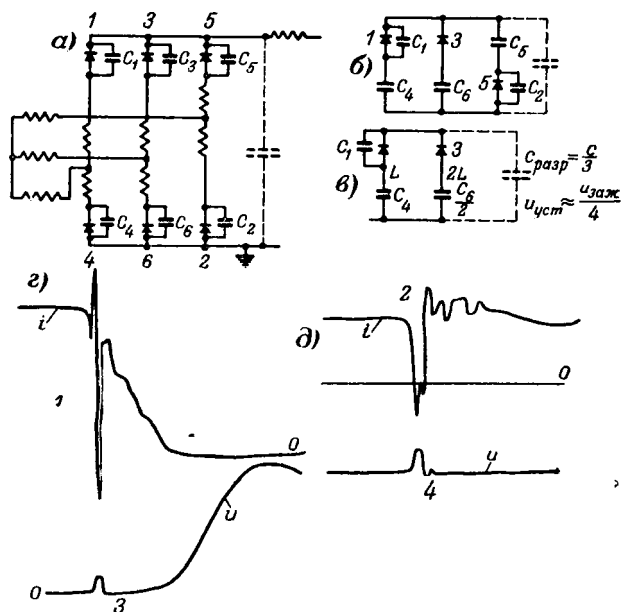


Рис. 5. Изменение напряжения на вентилях мостовой схемы при шунтировании вентилей емкостью.

а — основная схема; б, в — эквивалентные схемы разряда конденсаторов схемы а; г, д — кривые тока и напряжения в гасимом (1, 3) и в горящем (2, 4) вентилях.

становливаются на них. Емкости C_1 и C_2 заряжаются остаточным зарядом емкостей C_6C_4 и C_6C_5 через индуктивность соединительных проводников.

Впрочем, в этом случае величина восстановленного напряжения, и особенно скорость его нарастания, значительно меньше, чем при включении емкости между фазами трансформатора. Так как емкость, шунтирующая вентиль, погашенный высокочастотным разрядным током, примерно в 3 раза больше разряжающейся на него эквивалентной емкости, то максимальное напряжение на гасимом вентиле, даже с учетом удвоения за счет колебательного процесса, не может достигнуть половины, а при успокоении колебаний и четверти напряжения зажигания.

Очевидно, гашение вентиля разрядным током емкостей возможно лишь в том случае, если он превысит выпрямляемый. Чем больше отношение возможной амплитуды разрядного тока к амплитуде выпрямляемого, а также угол регулирования вентиля, тем меньше снижается напряжение на емкостях за время гашения и тем выше амплитуда импульса восстанавливающегося напряжения.

На рис. 5, г, д приведены осциллограммы, показывающие изменение тока в мостовой схеме через гасимый вентиль (1), горящий вентиль другой группы (2) в момент зажигания вентиля 3 и напряжение на вентилях (3 и 4).

В момент зажигания очередного вентиля 3 ток в горящих вентилях мгновенно прекращается или даже становится отрицательным (через вентиль протекает значительный обратный ток), затем после разряда емкости снова возрастает до первоначального значения.

Напряжение в этих опытах восстанавливалось до 16...20% напряжения в момент зажигания вен-

тиля вместо 50%, которых оно должно было достичь, что, вероятно, объясняется значительным обратным током через вентили.

При значительной по сравнению с C_6 катодной емкости (пунктир, рис. 5, б и в), шунтирующей емкости C_4 и C_5 цепи высокочастотного разряда, снижение тока в вентилях 1 и 2 происходит медленнее и при достаточной величине катодной емкости дуга в них может и не гаситься, а при гашении скорость и амплитуда восстанавливающегося напряжения значительно снижаются, что уменьшает вероятность обратных зажигания.

Процессы, обусловленные разрядом емкости схемы в момент зажигания очередного вентиля, могут нарушать работу выпрямительного устройства или даже сделать ее невозможной, в особенности они опасны при больших углах регулирования.

Велика опасность погасания вентиля в инверторных установках, где всегда имеется опережение зажигания в 30—40° и более, так что напряжение на вентиле в момент его зажигания всегда значительно.

Для предотвращения гашения вентиля разрядными токами включенных в схему концентрированных емкостей можно включить последовательно с емкостями сопротивления, ограничивающие разрядный ток значением, не превосходящим выпрямляемый ток при любом возможном режиме работы. Значительно труднее защитить вентиль от воздействия разрядных токов собственных емкостей установки — трансформаторов, соединительных шин или кабелей. В этом случае уменьшение разрядных токов может быть достигнуто включением умеренной величины реакторов последовательно с вентилями, установленных в непосредственной близости от вентилях. Это позволит существенно повысить волновое сопротивление разрядной цепи емкостей, что ограничит разрядный ток, если индуктивность реакторов велика по сравнению с индуктивностью соединительных шин. На время коммутации основного тока эти реакторы заметно не скажутся, если их индуктивность мала по сравнению с индуктивностью трансформаторов.

Исследование выпрямительной инверторной установки напряжением 10 кВ, мощностью 250 кВт, проведенное в УПИ им. Кирова Синьковым, Кричоновой, Поляковым [Л. 3], показало, что опасность погасания дуги возбуждения разрядными токами емкостей столь велика, что вовсе исключает возможность работы установки в некоторых режимах.

Особенно велика опасность возникновения обратных зажигания и погасания дуги возбуждения разрядными токами емкости в независимых преобразователях: инверторах с конденсаторной коммутацией, преобразователях частоты. В этих условиях коммутация осуществляется за счет разрядного тока больших конденсаторов, специально устанавливаемых для этой цели (рис. 6).

Очевидно, при сколько-нибудь значительной мощности такая установка не может работать, так как разрядный ток емкости осуществляет комму-

тацию почти мгновенно (доли микросекунды), столь же быстро нарастает обратное напряжение на вентиле, действующее в продолжение десятков электрических градусов. Очевидно, в этом режиме неизбежны частые обратные зажигания и погасания дуги возбуждения обратным током, независимо от того, имеет ли место обратное зажигание.

Быстрое появление обратного напряжения при сохранившейся большой остаточной проводимости создает также опасность быстрого распыления анодов интенсивной ионной бомбардировкой, особенно в преобразователях высокой частоты.

Очевидно, независимый преобразователь может работать только при включении значительной индуктивности в цепи коммутирующего конденсатора или при установке коммутирующего конденсатора C_1 за инверторным трансформатором (рис. 6).

Наличие большой индуктивности в разрядной цепи резко увеличивает время коммутации, необходимый угол опережения зажигания и требуемую величину коммутирующей емкости в независимых преобразователях и меняет все соотношения³.

Между тем во всей обширной литературе, посвященной этому вопросу (например, [Л. 5]), указывается на необходимость включения коммутирующей емкости непосредственно на вентили без реактивности. При этом отмечаются преимущества мгновенной коммутации, приводятся результаты обширных исследований для определения параметров схемы в предположении мгновенной коммутации, в частности, и определение величины коммутирующей емкости и ее зависимости от параметров схемы. Очевидно, это связано с тем, что экспериментальная проверка работы таких схем

³ Кардинальное решение вопроса, особенно при высоких частотах, дает применение насыщающихся реакторов в цепи разряда коммутирующих конденсаторов [Л. 4].

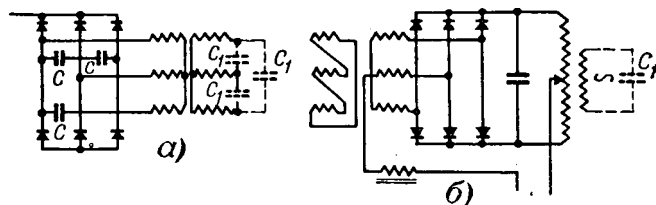


Рис. 6. Схемы преобразователей с конденсаторной коммутацией.

проводилась лишь на маломощных моделях. Мощные установки не могут так работать⁴.

Как следует из изложенного, емкости преобразовательных установок, в ряде случаев повышающие надежность работы вентилях за счет снижения скорости нарастания обратного напряжения после окончания коммутации тока [Л. 6], в других случаях могут привести к тяжелым нарушениям работы преобразовательных установок вследствие гашения вентилях разрядными токами емкости в момент зажигания очередного вентиля.

⁴ Что подтвердилось при исследованиях преобразователей частоты на мощных металлических вентилях.

Литература

1. Л. И. Сиротинский. Техника высоких напряжений, вып. III, Госэнергоиздат, 1945.
2. J. Read. „Journal of the JEE“, № 31, 1945.
3. И. А. Кричкова, В. Е. Поляков, В. М. Синьков. Погасание дуги возбуждения вентилях выпрямительно-инверторной установки. Электричество, № 4, 1952.
4. М. М. Акотис. Регулирование скорости нарастания обратного напряжения в цепях с ионными вентилями. Электричество, № 10, 1952.
5. В. Шиллинг. Схемы выпрямителей, инверторов и преобразователей частоты. Госэнергоиздат. 1950.
6. М. М. Акотис. Нарастание обратного напряжения в схемах с ионными вентилями. Электричество, № 6, 1950.

16.1.1952)



Система температурной сигнализации на термосопротивлениях

Кандидат техн. наук Г. К. НЕЧАЕВ, инж. М. М. ПИНЕВИЧ

Институт электротехники АН УССР

Температурная сигнализация узлов машин и аппаратов имеет большое значение для обеспечения безаварийной и надежной работы электростанций, промышленных предприятий и гидросооружений. Применение температурной сигнализации позволяет сократить количество обслуживающего персонала.

В Институте электротехники АН УССР разработана система температурной сигнализации с применением термосопротивлений, изготовленных из полупроводника [Л. 1]. Конструктивно они достаточно просты, имеют небольшие габариты и механически прочны. В цепи с термосопротивлениями

Описывается система температурной сигнализации подшипников, основанная на применении термосопротивлений.

может быть получена мощность, достаточная для срабатывания реле. Назначение системы преду-

предить обслуживающий персонал о ненормальном повышении температуры узла машины или аппарата, как, например, подшипников различных механизмов.

Схема устройства температурной сигнализации показана на рис. 1.

Питание устройства осуществляется от сети переменного тока через феррорезонансный стабилизатор напряжения, благодаря чему устраняется зависимость установки температуры от колебания напряжения сети. Для системы, рассчитанной на 16 точек, мощность стабилизатора составляет 25 *ва*. Выходное напряжение стабилизатора, порядка 40 *в*, выпрямляется селеновым выпрямителем и подается на цепи термосопротивлений. Каждая цепь состоит из последовательно включенных реле *P*, дополнительного сопротивления *r*, переключателя контроля цепи *П* и термосопротивления *R_t*.

Переключатель контроля цепи предназначен для проверки линий при эксплуатации системы. Нажатием кнопки переключателя *П* в цепь термосопротивления вводится микроамперметр, показания которого позволяют судить о состоянии той или иной цепи.

Реле *P* имеет три нормально открытых контакта. Реле *P'* и дроссель насыщения *ДН* служат для получения сигнала мигающего света.

Схема работает следующим образом. Когда температура контролируемого узла ниже уставки, ток в цепи термосопротивления не превышает 1,5...2 *ма* и якорь реле *P* отпущен. Допустим, что температура достигла предельного значения и в цепи термосопротивления *R_t* возник релейный эффект, причем ток возрос до 25...30 *ма*. Благодаря этому срабатывает реле *P* и замыкает свои контакты, т. е.: 1) шунтирует термосопротивление и переключатель контроля цепи, что предохраняет контрольный микроамперметр и термосопротивление от перегрузки; 2) включает лампу светового табло, соответствующего контролируемой точке; 3) подает ток управления на систему мигающего света. Дроссель насыщения *ДН* имеет релейную характеристику. При отсутствии тока в обмотке управления *ω_у* ток рабочей цепи дросселя имеет минимальное значение, что достигается с помощью обмотки смещения *ω_{см}*. В цепи обратной связи дросселя *ω_{ос}* включено промежуточное реле, нор-

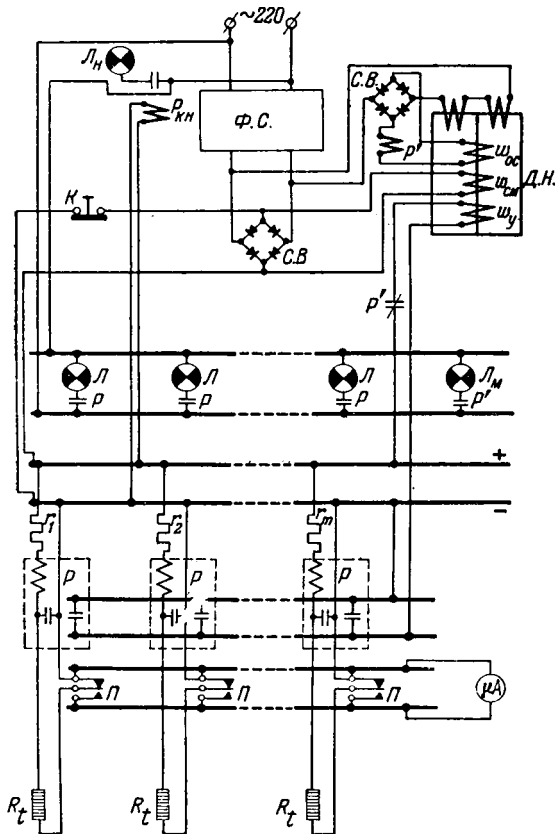
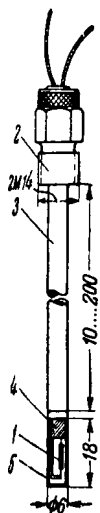


Рис. 1. Схема температурной сигнализации.

Ф.С.—феррорезонансный стабилизатор; ДН—дроссель насыщения; С.В.—селеновый выпрямитель; Р—реле; Р'—промежуточное реле; Р_{кн}—реле контроля напряжения; Л—сигнальная лампа; Л_н—неоновая лампа; Л_м—мигающая лампа; П—переключатель контроля цепей; К—кнопка перерыва цепи термосопротивлений; R_t—термосопротивление; ω_{ос}—обмотка обратной связи; ω_{см}—обмотка смещения; ω_у—обмотка управления; r—добавочное сопротивление.

Рис. 2. Датчик температуры.

1—термосопротивление; 2—штуцер; 3—соединительная трубка; 4—основание из пластмассы; 5—латунный колпачок.



мально закрытый контакт которого находится в цепи обмотки управления, а нормально открытый контакт — в цепи лампы мигающего света L_m . При отсутствии сигнала якорь реле P' отпущен, т. е. первый контакт разъединен, а второй включен. При подаче сигнала в обмотку управления w_u , ток рабочей цепи $ДН$ возрастает до максимального значения, при этом срабатывает реле P' . Вследствие этого включается лампа L_m и разрывается ток в цепи управления, благодаря чему ток главной цепи опять спадает до минимального

значения, реле P' отключается, а лампа L_m гаснет. Такой пульсирующий режим будет продолжаться до тех пор, пока подается сигнал в обмотку управления. Для уменьшения частоты пульсаций на среднем сердечнике $ДН$ имеется медная короткозамкнутая гильза. При понижении температуры ниже уставки световой сигнал может быть прерывающей питание на цепи термосопротивлений.

Для контроля наличия напряжения на системе и на цепях термосопротивлений служит неоновая лампа L_n и реле контроля напряжения P_{kn} .

Вся система монтируется в шкафу, на лицевой стороне которого размещаются световые табло, микроамперметр и кнопки переключателей контроля цепей. Лампа мигающего света монтируется вне шкафа.

Кроме общего светового сигнала, предусматривается включение звукового сигнала, для чего имеются зажимы на контактной панели, связанные с контактами реле P' . Количество точек контроля, а следовательно, и соответствующих им световых табло не ограничивается и принципиально может быть взято любым.

В Институте электротехники АН УССР для данной системы был разработан образец датчика

температуры, показанный на рис. 2. Длина соединительной трубки может меняться, что позволяет устанавливать его на разной глубине отверстий в контролируемом узле. Пластмассовое основание служит для крепления подводящих проводников и для уменьшения отвода тепла от контролируемой области. Размеры датчика указаны на чертеже.

Термосопротивление, предназначенное для этой системы, должно удовлетворять следующему ряду требований:

1. Правая часть вольтамперной характеристики должна быть падающей, т. е. иметь отрицательный угол наклона при рабочих температурах.

2. Рабочий ток термосопротивления должен быть больше тока трогания реле или блинкера, включенного последовательно с ним.

3. Полупроводниковый элемент должен сохранять свои характеристики при кратковременном нагреве до $400 \dots 450^\circ \text{C}$, что происходит в момент релейного эффекта.

Образец термосопротивления, разработанный в Институте, удовлетворяет поставленным требованиям и может быть использован для контроля температур до 100°C . Величина его сопротивления порядка 600 ком и температурный коэффициент — $4,5\%/^\circ \text{C}$ при 20°C .

Инерционность такого термосопротивления весьма невелика. Постоянная времени нагрева составляет около $18 \dots 20 \text{ сек}$. Термосопротивления ММТ, выпускаемые промышленностью [Л. 2], не подходят для нашей системы сигнализации по своим параметрам.

Уставка температуры системы выполняется с помощью потенциометра и может регулироваться в пределах от 60 до 100°C .

Эксплуатация опытного образца системы показала вполне удовлетворительные результаты.

Литература

1. Г. К. Нечаев. Релейный эффект в цепи с термосопротивлением. Электричество, № 3, 1951.
2. Б. Т. Коломиец и И. Т. Шефтель. Новые типы термосопротивлений. Электричество, № 4, 1951.

[30. 6. 1952]



Применение методов исследования электрических цепей к решению задач изгиба плоских стержневых систем

Доктор техн. наук, доц. Г. Е. ПУХОВ

Томский политехнический институт им. Кирова

Введение. Методы исследования электрических цепей стали широко внедряться в смежные области науки [Л. 1—12 и др.]. Наиболее эффективными оказались методы электрического моделирования и известный метод электромеханических аналогий. Настоящая работа ставит своей целью описание метода определения изгибающих моментов и перемещений плоских стержневых систем (неразрезных балок, рам и т. п.), основанного на замеченной возможности приведения изгибаемого стержня к активному электрическому трехполюснику. Для простоты рассматриваются лишь задачи статики.

Трехполюсная электрическая схема замещения изгибаемого стержня. Пусть стержень 1—2 (рис. 1) находится под воздействием изгибающих моментов M_{12} и M_{21} , реакций R_1 и R_2 и под влиянием произвольно распределенной по его длине внешней нагрузки, действие которой характеризуется площадью ω эпюры изгибающих моментов (при условии свободных шарнирно опертых концов) и расстоянием ul ее центра тяжести до точки 1 (или vl до точки 2).

Известно [Л. 13], что в этом случае связь между углами поворота φ_1 и φ_2 концов стержня, углом ψ , характеризующим смещение $y_2 - y_1$ концов, изгибающими моментами и, наконец, опорными реакциями, выражается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} M_{12} &= \frac{2 \cdot EI}{l} (2\varphi_1 + \varphi_2 - 3\psi) - \frac{2 \cdot \omega}{l} (3 \cdot v - 1), \\ -M_{21} &= \frac{2 \cdot EI}{l} (\varphi_1 + 2\varphi_2 - 3\psi) + \frac{2 \cdot \omega}{l} (3 \cdot u - 1), \\ R_1 - R_{10} &= -\frac{6 \cdot EI}{l^2} (\varphi_1 + \varphi_2 - 2\psi) - \\ &\quad - \frac{6 \cdot \omega}{l^2} (u - v), \\ R_2 - R_{20} &= \frac{6 \cdot EI}{l^2} (\varphi_1 + \varphi_2 - 2\psi) + \\ &\quad + \frac{6 \cdot \omega}{l^2} (u - v), \end{aligned} \right\} (1,1)$$

где l — длина стержня;
 R_{10} и R_{20} — опорные реакции от внешней нагрузки в стержне со свободными шарнирно опертыми концами;

Предлагается метод решения задач изгиба плоских стержневых систем (рам, неразрезных балок), основанный на изображении изгибаемого стержня активным электрическим трехполюсником.

I — момент инерции стержня относительно его оси;
 E — модуль упругости.
Действие продольных сил не учитывается.

Вообще говоря, стержень характеризуется четырьмя входными величинами: φ_1 , M_{12} , y_1 и R_1 и четырьмя выходными: φ_2 , M_{21} , y_2 и R_2 , и обычно считается, что электрическим изображением стержня является восьмиполусник [Л. 8, 11]. Расчет электрической цепи, состоящей из восьмиполусников, сложен и приводит к громоздким вычислениям. Покажем, что в качестве электрической схемы, изображающей стержень, может быть взята несравненно более простая трехполюсная схема.

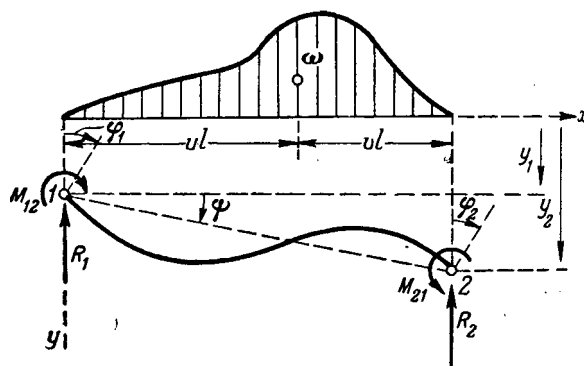


Рис. 1. Изгибаемый стержень.

Действительно, замечая, что

$$M_{12} - M_{21} = -l(R_1 - R_{10}) = l(R_2 - R_{20}), \quad (1,2)$$

и определяя из первых двух уравнений (1,1) углы φ_1 и φ_2 ,

$$\varphi_1 = \frac{l}{3EI} M_{12} + \frac{l}{6EI} M_{21} + \frac{\omega v}{EI} + \psi,$$

$$-\varphi_2 = \frac{l}{6EI} M_{12} + \frac{l}{3EI} M_{21} + \frac{\omega u}{EI} - \psi \quad (1,3)$$

и наконец, трактуя углы как напряжения и э. д. с., а изгибающие моменты как токи электрической цепи, нетрудно усмотреть, что зависимостям (1,2) и (1,3) отвечает схема активного электрического

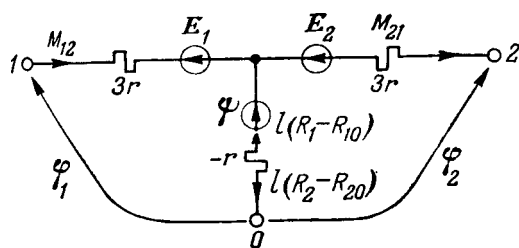


Рис. 2. Т-образная схема замещения (электрический аналог) изгибаемого стержня.

трехполюсника, приведенная на рис. 2. Цепь эта¹ вполне определяется углом ψ и величинами

$$r = \frac{l}{6EI}, \quad E_1 = \frac{\omega v}{EI} \quad \text{и} \quad E_2 = \frac{\omega u}{EI}, \quad (1,4),$$

которые далее будем называть параметрами схемы замещения стержня.

Различные нагрузки стержня и способы закрепления его концов отображаются на схеме замещения следующим образом: 1) стержень с несмещающимися концами, $\psi = 0$; 2) к стержню не приложена внешняя нагрузка, $\omega = 0$ и, следовательно, $E_1 = E_2 = 0$; 3) жесткое закрепление левого конца стержня, $\varphi_1 = 0$; 4) жесткое закрепление правого конца стержня, $\varphi_2 = 0$; 5) шарнирное закрепление левого конца стержня, $M_{12} = 0$ (разумеется, если не прикладывается какой-либо внешний изгибающий момент) и т. д.

Значения параметров E_1 и E_2 для различных видов нагрузки стержня, подсчитанные по формулам (1,4), приведены в приложении.

Порядок расчета стержневых систем. Имея полученную выше трехполюсную схему замещения изгибаемого стержня, можно предложить следующий порядок расчета плоских стержневых систем: 1) определение параметров вида r , E_1 и E_2 схем замещения стержней, составляющих рассматриваемую систему; 2) составление схемы замещения всей стержневой системы с учетом граничных условий (способов закрепления концов и т. п.); 3) расчет схемы замещения стержневой системы, как обычной электрической цепи с привлечением к решению уравнений статики ($\sum X = 0$, $\sum Y = 0$ и т. д.).

Следует отметить, что рассматриваемые схемы замещения стержневых систем относятся к электрическим цепям постоянного тока, весьма простым в расчете. Для определения распределения токов и напряжений в схемах замещения можно применить любые методы исследования линейных электрических цепей, в частности, методы контурных токов и узловых напряжений, теорема об эквивалентном генераторе, метод составных четырехполюсников [Л. 18] и т. д. Для расчета цепей особенно сложной конфигурации целесообразно применять метод подсхем, основанный на разложении сложной цепи на последовательно, параллельно и смешанно соединенные подсхемы [Л. 19].

¹От Т-образной схемы замещения легко, разумеется, при необходимости перейти к П-образной схеме [Л. 16].

Изгибающие моменты, действующие в различных узлах стержневой системы, и углы поворота узлов будут изображаться на схеме замещения соответствующими электрическими токами и напряжениями.

Дальнейшее построение эпюр изгибающих моментов, перерезывающих сил и т. д. производится обычными приемами строительной механики. Несколько поясняющих примеров приведено в приложении.

Замечание об уравнении трех моментов. При расчетах неразрезных балок (рис. 3,а) часто используется уравнение трех моментов:

$$\begin{aligned} \frac{l_k}{I_k} M_{k-1} + 2 \left(\frac{l_k}{I_k} + \frac{l_{k+1}}{I_{k+1}} \right) M_k + \frac{l_{k+1}}{I_{k+1}} M_{k+1} = \\ = -6 \frac{\omega_k u_k}{I_k l_k^2} - 6 \frac{\omega_{k+1} v_{k+1}}{I_{k+1} l_{k+1}^2}. \end{aligned} \quad (3-1)$$

Написав уравнение контурного тока для k -той ячейки схемы замещения балки (рис. 3,б)

$$r_k M_{k-1} + 2(r_k + r_{k+1}) M_k + r_{k+1} M_{k+1} = -E_2^k - E_1^k, \quad (3,2)$$

и принимая во внимание выражение (1,4), убеждаемся в тождественности уравнений (1,3) и (3,2).

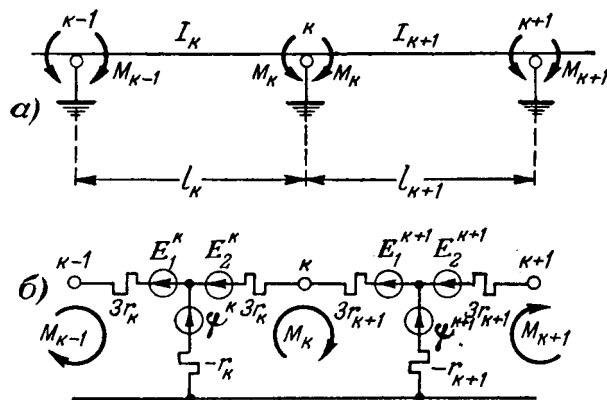


Рис. 3. Неразрывная балка и ее схема замещения.

Таким образом, метод расчета неразрезных балок, использующий уравнение трех моментов, является аналогом расчета цепных электрических схем по методу контурных токов, заметим, весьма неподходящему для этой цели.

Замечание о методе фокусных точек. В строительной механике известна теория так называемых фокусных отношений, имеющая большое значение для практических и теоретических расчетов неразрезных балок и рам. Теория сводится к определению на каждом незагруженном пролете точек (моментных фокусов), в которых происходит изменение знака эпюры изгибающих моментов. Теория базируется на вычислении фокусных отношений по формулам

$$\lambda_k = -\frac{M_k}{M_{k-1}} - \frac{l_k - c_k}{l_k}, \quad (4,1)$$

где c_k — расстояние фокусной точки до левой опоры k -того пролета от нагрузки, расположенной на правых относительно него пролетах.

Обращаясь к схеме замещения (рис. 4) k -того стержня и учитывая, что как она, так и схемы замещения всех левых пролетов пассивны (параметры типа E_1 , E_2 и φ равны нулю), видим, что фокусное отношение определяется в общем случае зависимостью

$$\lambda_k = -\frac{M_k}{M_{k-1}} = 2 + \frac{r_\Sigma}{r_k}, \quad (4-2)$$

где r_Σ — сопротивление, отвечающее левой части балки, кроме рассматриваемого k -того пролета.

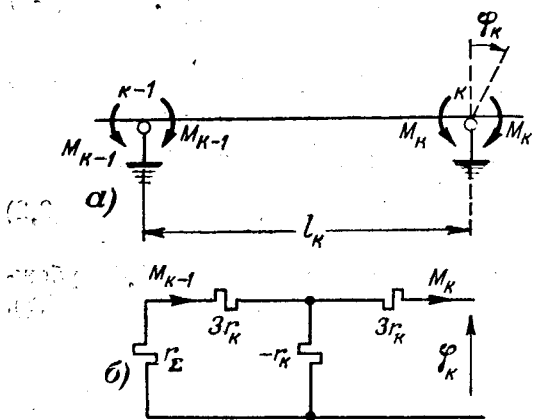


Рис. 4. Нерезренная балка и ее схема замещения для случая, когда нагрузки находятся правее k -той опоры.

В частных случаях: а) левый конец k -того пролета зашлемлен, $r_\Sigma = 0$, $\lambda_k = 2$; б) левый конец k -того пролета шарнирно оперт, $r_\Sigma = \infty$, $\lambda_k = \infty$ и т. д. Эти соотношения хорошо известны в строительной механике. Значение r_Σ легко найти непосредственно по схеме замещения балки обычными приемами замены последовательно и параллельно соединенных сопротивлений эквивалентным.

Таким образом, мы приходим к выводу о существовании аналогии между методом фокусных отношений строительной механики и простейшими приемами известного в электротехнике метода преобразования электрических цепей.

Закключение. Изгибаемый стержень может быть приведен не только к восьмиполусной системе, как это обычно считается, но и к несравненно более простой трехполусной. Изображение стержней в виде активных электрических трехполусников позволяет несколько упростить расчеты плоских стержневых систем и применять к ним любые методы исследования электрических цепей.

Автор надеется, что изложенный метод окажется полезным в практике расчетов строительных конструкций, так как его применение позволяет использовать возможности как теории электрических цепей, так и теории сооружений.

Разумеется, предлагаемые электрические схемы замещения стержневых систем могут быть легко осуществлены в лаборатории, после чего вычисления изгибающих моментов и углов поворота заменятся измерением соответствующих токов и напряжений.

Приложение 1. Параметры схемы замещения изгибающегося стержня постоянного сечения

Вид загрузки	Параметры	
	E_1	E_2
	$\frac{Pl^2}{6EI} (1 + \beta) \alpha^3$	$\frac{Pl^2}{6EI} (1 + \alpha) \beta^3$
	$\frac{Pl^2}{16EI}$	$\frac{Pl^2}{16EI}$
	$\frac{ql^3}{24EI}$	$\frac{ql^3}{24EI}$
	$\frac{ql^3}{24EI} (1 + \beta)^2 \alpha^2$	$\frac{ql^3}{24EI} (2 - \alpha)^2 \alpha^2$
	$-\frac{Ml}{6EI} (3\beta^2 - 1)$	$\frac{Ml}{6EI} (3\alpha^2 - 1)$

Приложение 2. Примеры расчета балок и рам. Пример 1. Определим угол φ_1 и изгибающий момент M_{21} для балки (рис. 5, а). Из схемы замещения (рис. 5, б) получаем:

$$M_{21} = -\frac{E_2}{2r} = -\frac{ql^2}{8}, \quad (II,1)$$

$$\varphi_1 = (-r) (-M_{21}) + E_1 = \frac{ql^3}{16EI}, \quad (II,2)$$

так как $r = \frac{l}{6EI}$ и $E_1 = E_2 = \frac{ql^3}{24EI}$ (приложение 1). Знак минус указывает, что зашлемляющий момент действует против выбранного положительного направления.

Значения M_{21} и φ_1 общеизвестны и приводятся, например, в [1. 14].

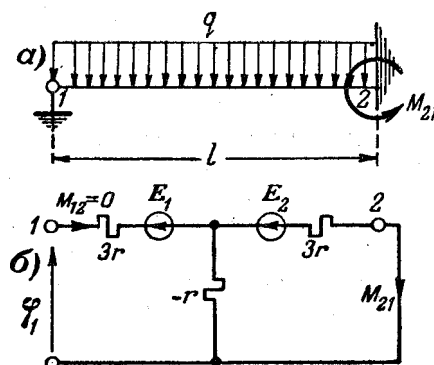


Рис. 5. Балка и ее схема замещения.

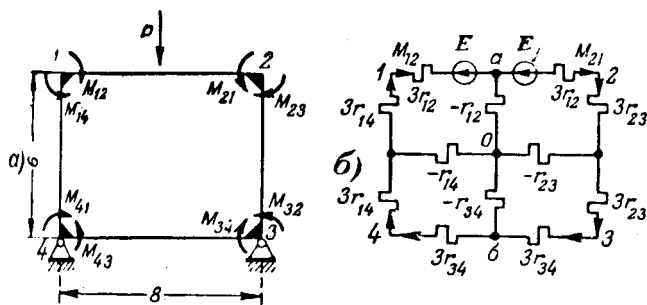


Рис. 6. Рама и ее схема замещения.

Пример 2. Определим изгибающие моменты в узлах рамы² (рис. 6).

В силу симметричного приложения нагрузки P узлы рамы не будут смещаться, а только поворачиваться и поэтому $\psi = 0$. В схеме замещения (рис. 6, б) электрические напряжения между точками $o-a$ и $o-b$ в силу симметрии цепи будут равны нулю, вследствие чего сразу находим:

$$M_{12} = M_{21} = - \frac{E}{3r_{12} + 3r_{14} + \frac{(-r_{14})(3r_{14} + 3r_{34})}{-r_{14} + 3r_{14} + 3r_{34}}} = - \frac{E}{3 \left(r_{12} + \frac{3r_{14}^2}{2r_{14} + 3r_{34}} \right)}. \quad (II,3)$$

Подставляя

$$r_{12} = \frac{l_{12}}{6EI_{12}} = \frac{2}{3EI}, \quad r_{14} = r_{23} = \frac{1}{EI}, \quad r_{34} = \frac{4}{3EI}, \quad E = \frac{Pl_{12}^2}{16EI_{12}} = \frac{2P}{EI}, \quad (II,4)$$

окончательно получаем:

$$M_{12} = M_{21} = - \frac{12P}{23} = -0,5217P. \quad (II,5)$$

Изгибающие моменты в узлах 3 и 4 будут:

$$M_{41} = M_{43} = M_{32} = M_{34} = -M_{12} \frac{r_{14}}{2r_{14} + 3r_{34}} = - \frac{2P}{23} = 0,08695P. \quad (II,6)$$

Приближенное решение этой задачи по методу фокусов, приведенное в [Л. 15], имеет вид:

$$M_{12} = M_{21} \approx -0,5224 \cdot P, \quad M_{41} = M_{43} = M_{32} = M_{34} \approx -0,087P. \quad (II,7)$$

Пример 3. Найдем опорные изгибающие моменты неразрезной балки³ (рис. 7) от осадки опоры B на величину Δ .

Параметры схемы замещения (рис. 7, б)

$$r = \frac{l}{6EI} \quad \text{и} \quad \psi = \frac{\Delta}{l}. \quad (II,8)$$

На основании теоремы об эквивалентном генераторе, непосредственно из схемы находим изгибающий момент

$$M_c = \frac{\psi - \frac{2\psi}{4r} 5r}{\frac{5r(-r)}{5r + (-r)} + 3r + \frac{5r(-r)}{5r + (-r)}} = - \frac{3\psi}{7r} = - \frac{18}{7} \cdot \frac{EI}{l^2} \Delta \approx -2,57 \frac{EI}{l^2} \Delta. \quad (II,9)$$

Генератором считаем левую часть цепи до сечения c .

² Данные примера заимствованы из [Л. 15, задача 13. 15].

³ Данные заимствованы из [Л. 15, задача 10. 17].

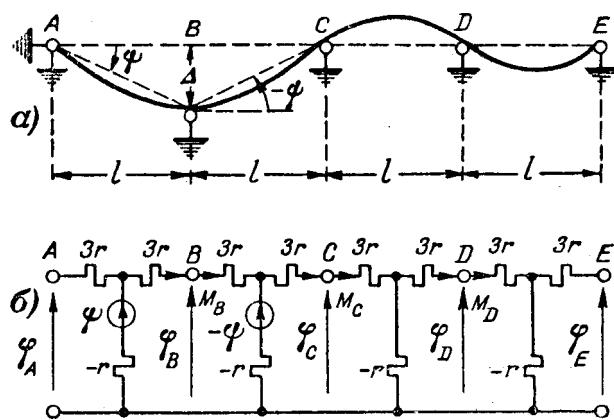


Рис. 7. Неразрезная балка с осевшей опорой и ее схема замещения.

Изгибающие моменты в сечениях B и D

$$\left. \begin{aligned} M_B &= \frac{\psi - \left(6r - \frac{5}{4}r\right) M_c}{5r} = \frac{85\psi}{140r} = \\ &= \frac{51}{14} \cdot \frac{EI}{l^2} \Delta \approx 3,65 \frac{EI}{l^2} \Delta, \\ M_D &= M_c \frac{(-r)}{4r} = \frac{3\psi}{28r} = \\ &= \frac{9}{14} \cdot \frac{EI}{l^2} \Delta \approx 0,642 \frac{EI}{l^2} \Delta. \end{aligned} \right\} \quad (II,10)$$

Найденные значения M_B , M_c и M_D совпадают с полученными обычными методами строительной механики [Л. 15, задача 10.17].

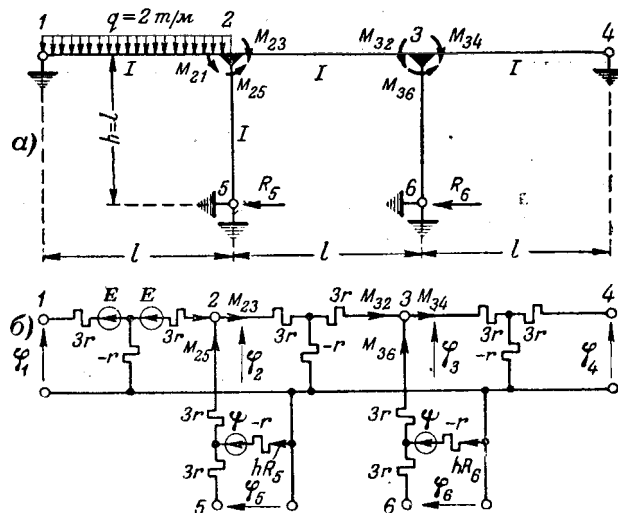


Рис. 8. Рама междуэтажного перекрытия и ее схема замещения.

Пример 4. Определим заземляющие моменты в узлах рамы междуэтажного перекрытия⁴ (рис. 8, а).

Схема замещения рамы показана на рис. 8, б. Параметры E и r схемы:

$$E = \frac{ql^3}{24 \cdot EI} = \frac{2 \cdot 5^3}{24 \cdot EI} = \frac{125}{12 \cdot EI}, \quad r = \frac{l}{6 \cdot EI} = \frac{5}{6 \cdot EI}. \quad (II,11)$$

⁴ Данные примеры заимствованы из [Л. 16, стр. 121].

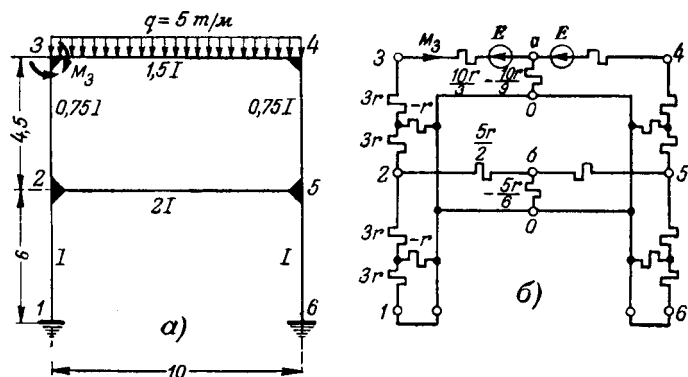


Рис. 9. Двухъярусная рама и ее схема замещения.

Заметим, что

$$\frac{E}{r} = 12,5 \text{ тм.} \quad (\text{II}, 12)$$

Рассчитывая схему любым из методов электрических цепей (наиболее целесообразно применить метод трансформации), находим:

$$\begin{aligned} M_{21} &= -\frac{11}{32} \frac{E}{r} - \frac{\phi}{8r}, & M_{32} &= \frac{2}{32} \frac{E}{r} - \frac{2\phi}{8r}, \\ M_{23} &= -\frac{6}{32} \frac{E}{r} + \frac{2\phi}{8r}, & M_{34} &= \frac{1}{32} \frac{E}{r} + \frac{\phi}{8r}, \\ M_{25} &= \frac{5}{32} \frac{E}{r} + \frac{3\phi}{8r}, & M_{36} &= -\frac{1}{32} \frac{E}{r} + \frac{3\phi}{8r}. \end{aligned} \quad (\text{II}, 13)$$

Уравнение статики

$$R_5 + R_6 = -\frac{M_{25} + M_{36}}{h} = 0 \quad (\text{II}, 14)$$

позволяет определить угол поворота стоек 2—5 и 3—6:

$$\phi = -\frac{E}{6} = -\frac{125}{72EI}. \quad (\text{II}, 15)$$

Подставляя значения ϕ и r в уравнения (II,13), окончательно получаем:

$$\begin{aligned} M_{21} &= -\frac{775}{192} = -4,036 \text{ тм}, & M_{32} &= \frac{125}{96} = 1,302 \text{ тм}, \\ M_{23} &= -\frac{550}{192} = -2,864 \text{ тм}; & M_{34} &= \frac{25}{192} = 0,13 \text{ тм}, \\ M_{25} &= \frac{225}{192} = 1,172 \text{ тм}, & M_{36} &= -\frac{225}{192} = -1,172 \text{ тм}. \end{aligned} \quad (\text{II}, 16)$$

Точно такие же значения изгибающих моментов приведены в работе Г. В. Ульянинского [Л. 16, стр. 121], из которой заимствованы данные рассмотренного примера.

Пример 5. Определим момент в узле 3 рамы, показанной на рис. 9,а. Параметры схемы замещения (рис. 9,б)

$$\begin{aligned} r_{12} &= \frac{l_{12}}{6EI_{12}} = \frac{1}{EI} = r, & r_{25} &= \frac{5}{6} r, & r_{23} &= r, \\ r_{34} &= \frac{10}{9} r, & E &= \frac{ql_{34}^3}{24 \cdot EI_{34}} = \frac{5 \cdot 10^3}{48} r. \end{aligned} \quad (\text{II}, 17)$$

В силу симметрии системы напряжения между точками $o-a$ и $o-b$ равны нулю. Поэтому искомый момент находится просто по закону Ома:

$$M_3 = \frac{E}{r_s} = -\frac{5 \cdot 47 \cdot 10^3}{16 \cdot 704} = -20,7 \text{ тм}, \quad (\text{II}, 18)$$

где $r_s = \frac{704r}{3 \cdot 47}$ — сопротивление, измеренное между зажимами источника э. д. с. E , при условии, что точки a и b замкнуты накоротко с точкой o .

Заметим, что решение этой задачи по приближенному способу проф. Б. Н. Жемочкина, приведенное в [Л. 15, задача 13. 22, стр. 116 и 394], дало в результате значение $M_3 = 20,8 \text{ тм}$.

Литература

1. А. А. Харкевич. Теория электроакустических аппаратов. Москва, 1940.
2. А. А. Харкевич. Теория преобразователей. Госэнергоиздат, 1948.
3. А. А. Харкевич. К расчету механических колебательных систем. ЖТФ, т. IV, вып. 6, 1934.
4. В. В. Фурдуев. Электроакустика. ГТИИ, 1948.
5. В. В. Фурдуев. Теоремы взаимности. Гостехиздат, 1948.
6. Г. Ольсон. Динамические аналогии. ГИИЛ, 1947.
7. Л. И. Гутенмахер. Электрическое моделирование (электроинтегратор). Изд. АН СССР, 1943.
8. С. Г. Милейковский. К вопросу о приведении колеблющегося стержня к восьмиполусной системе. ЖТФ, т. XI, вып. 8, 1941.
9. Н. М. Тетельбаум. Исследование крутильных колебаний валов поршневых двигателей путем электрического моделирования. Изд. БИТ, М., 1948.
10. Н. Н. Андреев. К расчету глушителей для моторов внутреннего сгорания. ЖТФ, т. XVI, вып. 6, 1946.
11. Н. М. Тетельбаум. Электрическое моделирование упругих систем в динамических задачах строительной механики. Сб. Повышение прочности деталей машин. Изд. АН СССР, 1949.
12. А. Л. Гофлин. Электрическая модель балки, лежащей на упругом основании. Электричество, № 5, 1947.
13. Н. М. Рабинович. Строительная механика стержневых систем. Стройиздат, 1946.
14. А. Н. Динник (ред.). Справочник по технической механике. Гостехиздат, 1949.
15. Н. Л. Кузьмин, В. Г. Рекач, Г. И. Розенблат. Сборник задач по теории сооружений. Стройиздат 1950.
16. Г. В. Ульянинский. Расчет рамных конструкций. Томск, 1931.
17. П. Л. Калантаров. Теория переменных токов. Госэнергоиздат, 1940.
18. Э. В. Зелях. Основы теории четырехполусника. Вестник электротехники, № 3 и 7, 1931.
19. Г. Е. Пухов. Теория метода подсхем. Электричество, № 8, 1952.

[21.3.1952]



Расчет сопротивления между электродами в некоторых потенциальных полях

Кандидат техн. наук В. И. СМЕРНОВ
ВИЭСХ

Способы расчета сопротивлений между электродами—один из практически важных предметов исследования в теории

потенциальных полей. Знание этих способов необходимо, например, при проектировании электронагревательных устройств (нагрев бетона, древесины, жидкостей, почвы, некоторых видов корма и т. д.).

Расчетам посвящен ряд работ [Л. 1, 2, 3], но они далеко не исчерпывают вопроса и частью недостаточны в методическом отношении. Здесь предлагаются способы расчета сопротивления R между электродами для довольно общих случаев плоскопараллельных полей с дугообразными, плоскими и угловыми электродами, наложенными на однородные тела в форме кругового цилиндра и прямоугольного параллелепипеда.

Полагая

$$R = \frac{R_0 \rho}{h}, \quad (1)$$

где ρ —удельное сопротивление среды и h —протяженность тела и электродов в направлении, перпендикулярном к плоскости, в которой рассматривается поле, займемся определением R_0 —сопротивления между электродами при условии: $\rho=1$, $h=1$.

Применяем метод конформного отображения заданного в плоскости z поля на прямоугольник в плоскости w с промежуточным отображением на них верхней полуплоскости переменного t . Угловые точки прямоугольника выбираем такие:

$$w_1 = \frac{a}{2}, \quad w_2 = \frac{a}{2} + jb, \quad w_3 = -\frac{a}{2} + jb, \quad w_4 = -\frac{a}{2}.$$

При отображении контур исследуемого поля должен перейти в контур прямоугольника так, чтобы при этом образами электродов оказались бы: 1) нижнее и верхнее основания прямоугольника или же 2) его боковые стороны. При этих условиях

$$R_{01} = \frac{b}{a}, \quad (2)$$

$$R_{02} = \frac{a}{b}. \quad (3)$$

Из теории конформных отображений [Л. 4] известно, что при отображении верхней полуплоскости

предлагаются способы расчета сопротивления между электродами для плоскопараллельных полей с дугообразными, плоскими и угловыми электродами, расположенными на однородные тела в форме кругового цилиндра и прямоугольного параллелепипеда.

на прямоугольник, таком, что точки действительной оси $t_1=1$, $t_2=1/k$, $t_3=-1/k$, $t_4=-1$ переходят в выбранные нами

угловые точки w с соответствующими индексами, справедливы соотношения

$$R_{01} = \frac{b}{a} = \frac{\int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k'^2 \sin^2 \varphi}}}{2 \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \varphi}}} = \frac{K(k')}{2K(k)}, \quad (2a)$$

$$R_{02} = \frac{a}{b} = \frac{2K(k)}{K(k')}, \quad (3a)$$

здесь $K(k)$ и $K(k')$ —полные эллиптические интегралы первого рода с модулями k и $k' = \sqrt{1-k^2}$.

Таким образом, для решения поставленной задачи достаточно:

- 1) отобразить конформно исследуемое поле на верхнюю полуплоскость (или обратно, полуплоскость на поле) так, чтобы контур поля перешел в действительную ось и чтобы при этом точки z , ограничивающие электроды, перешли в точки t : $-1, 1; -1/k, 1/k$ (случай R_{01}) или же: $1, 1/k; -1, -1/k$ (случай R_{02});
- 2) найти значение k .

Для первой операции применяем следующие два способа:

А. Отображение поля на верхнюю полуплоскость с помощью дробнолинейного преобразования, переводящего соответственно точки z_1, z_2, z_3 в t_1, t_2, t_3 [Л. 4]:

$$\frac{(z-z_1)(z_2-z_3)}{(z-z_3)(z_2-z_1)} = \frac{(t-t_1)(t_2-t_3)}{(t-t_3)(t_2-t_1)}. \quad (4)$$

Б. Отображение верхней полуплоскости t на многоугольник в плоскости z посредством формулы Шварца-Кристоффеля [Л. 4]:

$$dz = \frac{ce^{i\theta} dt}{(t-t_1)^{\alpha_1} (t-t_2)^{\alpha_2} \dots (t-t_n)^{\alpha_n}}; \quad (5)$$

здесь θ —угол, образуемый начальной стороной многоугольника с положительной действительной полуосью;

t_1, t_2, \dots, t_n —точки действительной оси, переходящие соответственно в угловые точки многоугольника z_1, z_2, \dots, z_n ; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ соот-

Таблица 1

Сводка расчетных уравнений

№ п/п	Характеристика электродного устройства Расчетные уравнения	Рисунок	Приложение	№ п/п	Характеристика электродного устройства Расчетные уравнения	Рисунок	Приложение
1	Проводник—цилиндр. Два противолежащих дугообразных электрода различных размеров $R = \frac{K(k') \rho}{2K(k) h} \quad (2a) \quad k = \operatorname{tg} \frac{\phi_1}{4} \operatorname{tg} \frac{\phi_2}{4} \quad (6)$ при $\phi_1 = \phi_2 = \phi$, $k = \operatorname{tg}^2 \frac{\phi}{4} \quad (6a)$	1,а	1	6	Проводник — прямоугольный параллелепипед. Угловые равнобокие электроды, расположенные наискось $R = \frac{K(k') \rho}{2K(k) h}; \quad \frac{K\left(\sqrt{1 - \frac{\lambda}{\lambda + \mu}}\right)}{K\left(\sqrt{\frac{\lambda}{\lambda + \mu}}\right)} = \frac{b}{a}; \quad (15)$	2,а	6
2	Проводник—цилиндр. n пар одинаковых дугообразных электродов $R_{\text{рез}} = \frac{K(k') \rho}{2nK(k) h} \quad (7) \quad k = \operatorname{tg}^2 \frac{n\phi}{4} \quad (8)$ при $\phi = \frac{90^\circ}{n}$, $R_{\text{рез}} = \frac{1}{n} \frac{\rho}{h}$	1,б	2		$\int_0^{\operatorname{arc} \sin \sqrt{1 - 1/\lambda}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \sin^2 \varphi}} =$ $= \left(1 - \frac{l_1}{a}\right) K\left(\sqrt{\frac{\lambda}{\lambda + \mu}}\right); \quad (16)$		
3	Проводник — цилиндр. Наружный — цилиндрический и внутренний — плоский электроды $R = \frac{K(k') \rho}{2K(k) h},$ $k = \sqrt{1 - \left(\frac{1 - \frac{a}{r}}{1 + \frac{a}{r}}\right)^4} \quad (9)$	1,в	3		$\int_0^{\operatorname{arc} \sin \sqrt{\frac{(\lambda + \mu)k}{1 + k\mu}}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda + \mu}\right) \sin^2 \varphi}} =$ $= \frac{l_2}{a} K\left(\sqrt{\frac{\lambda}{\lambda + \mu}}\right); \quad (17)$ при $b = a$		
4	Проводник—цилиндрический сектор. Угловой и дугообразный электроды $R = \frac{K(k') \rho}{K(k) h},$ $k = \sqrt{1 - \left[\frac{1 - \left(\frac{l}{r}\right)^{180/\psi}}{1 + \left(\frac{l}{r}\right)^{180/\psi}}\right]^4} \quad (10)$	1,г	4		$\int_0^{\operatorname{arc} \sin \sqrt{1 - 1/\lambda}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - 0,5 \sin^2 \varphi}} = 1,85 \left(1 - \frac{l_1}{a}\right); \quad (18)$ $\int_0^{\operatorname{arc} \sin \sqrt{\frac{2\lambda k}{1 + \lambda k}}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - 0,5 \sin^2 \varphi}} = 1,85 \frac{l_2}{a} \quad (19)$ если $l_1 = l_2 = l$, $l/a = 0,5$, $R = \frac{\rho}{h}$		
5	Проводник — секторообразная часть цилиндра. Электроды — дугообразный и угловой с внутренним углом 120° $R = \frac{K(k') \rho}{K(k) h}, \quad k = \sqrt{1 - \left[\frac{1 - l_o'^{3/2}}{1 + l_o'^{3/2}}\right]^4} \quad (11)$ $l_o' = \frac{1}{1 + F(b_o, l_o)} \quad (12) \quad b_o = \frac{b}{r},$ $l_o = \frac{l}{r},$ $F(b_o, l_o) =$ $= \frac{(1 - 1,15b_o)}{(1 - 0,87b_o - 0,5 \sqrt{1 - b_o^2}) l_o} \times \left\{ 1 + (0,29 - b_o)b_o - \right.$ $\left. - (0,5 + 0,58b_o) \sqrt{1 - b_o^2} - (\sqrt{1 - b_o^2} - 0,5) l_o \right\} \quad (13)$ при $b_o \leq 0,3$ $l_o' \approx \frac{2l_o}{1 + \sqrt{1 - b_o^2} - 1,73b_o} \quad (14)$	1,д	5		при $\begin{cases} b = a \\ l_1 = l \\ l_2 = a \end{cases}$ $\int_0^{\operatorname{arc} \sin \sqrt{1 - k}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - 0,5 \sin^2 \varphi}} =$ $= 1,85 \left(1 - \frac{l}{a}\right) \quad (20)$		
				7	Проводник — прямоугольный параллелепипед. Равновеликие угловые неравнобокие электроды, расположенные симметрично $R = \frac{2K(k) \rho}{K(k') h}, \quad \frac{K\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2}}{K\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)} = 2 \frac{b}{a}; \quad (21)$ $\int_0^{\operatorname{arc} \sin 1/\lambda} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \sin^2 \varphi}} =$ $= \left(1 - 2 \frac{l_1}{a}\right) K\left(\frac{\lambda}{\mu}\right); \quad (22)$	2,б	7

Продолжение табл. 1

Характеристика электродного устройства Расчетные уравнения	Рисунок	Приложение № п/п.	Характеристика электродного устройства Расчетные уравнения	Рисунок	Приложение
$\int_0^{\arcsin \sqrt{\frac{\mu^2 - 1/k^2}{\mu^2 - \lambda^2}}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2\right] \sin^2 \varphi}} =$ $= 2 \left(\frac{b - l_2}{a} \right) K \left(\frac{\lambda}{\mu} \right); \quad (23)$ <p>При $b = \infty$</p> $\arcsin 1/\lambda = \left(0,5 - \frac{l_1}{a} \right) \pi; \quad (24)$ $\ln \left(\frac{1}{k\lambda} + \sqrt{\frac{1}{k^2\lambda^2} - 1} \right) = \frac{l_2}{a} \pi \quad (25)$	2,6	7	9	2,6	9
<p>Проводник — прямоугольный параллелепипед. Плоские одинаковые электроды с одной стороны</p> $R = \frac{2K(k)\rho}{K(k')h},$ $\frac{K \left(\sqrt{1 - \frac{1}{k^2\mu^2}} \right)}{2K \left(\frac{1}{k\mu} \right)} = 2 \frac{b}{a}; \quad (26)$ $\int_0^{\arcsin k} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \frac{1}{k^2\mu^2} \sin^2 \varphi}} =$ $= \left(1 - 2 \frac{l}{a} \right) K \left(\frac{1}{k\mu} \right); \quad (27)$ <p>при $b = \infty$</p> $\arcsin k = \left(0,5 - \frac{l}{a} \right) \pi \quad (28)$ <p>если $l/a = 0,25$, $R = 2 \frac{\rho}{R}$</p>	2,6	8			
			<p>Проводник — прямоугольный параллелепипед. Плоские противоположные электроды разной ширины</p> $R = \frac{K(k')\rho}{2K(k)h},$ $\frac{K \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2} \right)}{K \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)} = 2 \frac{b}{a}; \quad (21)$ $\int_0^{\arcsin 1/\lambda} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \sin^2 \varphi}} =$ $= \frac{l_1}{a} K \left(\frac{\lambda}{\mu} \right); \quad (29)$ $\int_0^{\arcsin \mu k} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{l_2}{a} K \left(\frac{\lambda}{\mu} \right); \quad (30)$ <p>при $l_1 = l_2 = l$</p> $\frac{K \left(\sqrt{1 - k^2\lambda^4} \right)}{K(k\lambda^2)} = 2 \frac{b}{a}; \quad (31)$ $\int_0^{\arcsin 1/\lambda} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2\lambda^4 \sin^2 \varphi}} = \frac{l}{a} K(k\lambda^2). \quad (32)$		

ответственно равны $\frac{\alpha'_1}{\pi}, \frac{\alpha'_2}{\pi}, \dots, \frac{\alpha'_n}{\pi}$, где $\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_n$ — выраженные в радианах внешние углы, на которые делается поворот в соответствующих угловых точках многоугольника при его положительном обходе.

Применяя описанный метод, получаем расчетные уравнения, приведенные в табл. 1. Для расчетов применяется вспомогательная табл. 2, в которой даны необходимые соотношения в полных эллиптических интегралах.

Ход расчета поясним на примере электродного устройства под номером 9 в табл. 1.

В столбце 7 табл. 2 отыскиваем заданное отношение $\frac{b}{a}$ [уравнение (21)] и в соответствующей строке (или интерполируя), находим величины модуля $\frac{\lambda}{\mu}$ (столбец 2), модулярного угла $\theta_m = \arcsin \frac{\lambda}{\mu}$ (столбец 1) и интеграла $K \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)$ (столбец 3). Определив значение правой части (29),

по таблицам эллиптических интегралов [Л. 5] находим амплитуду $\varphi = \arcsin \frac{1}{\lambda}$, а затем λ и μ . Таким же путем определяем k из (30) и по его значению из табл. 2 находим R .

Производя разрезы по силовым линиям и линиям равного потенциала, легко получить из полей табл. 1 ряд производных и определить R . Можно также пользоваться следующим соображением. Если в каком-нибудь из наших полей с двумя электродами части контура, занятые электродами, освободить от них, а части, ранее свободные, сделать электродами, то сопротивление R_0 между электродами в таком «обратном» поле будет обратной величиной по отношению к сопротивлению в исходном поле¹.

Сопротивления для некоторых из конфигураций, которые могут быть таким образом получены, представлены в табл. 3.

В качестве иллюстраций к предлагаемым расчетным уравнениям на рис. 3 для трех различных электродных устройств (см. приложения) представлены кривые $R_0 = f(\rho)$ зависимости сопротивления R_0 от величины параметра ρ .

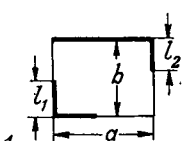
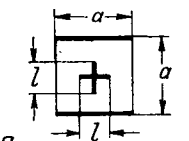
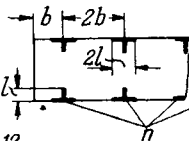
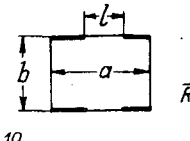
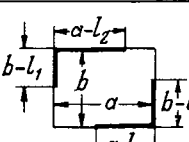
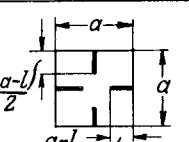
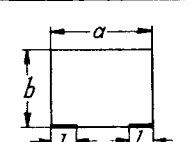
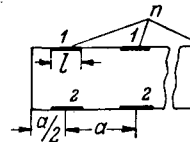
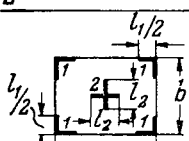
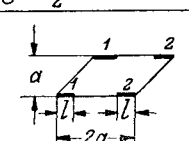
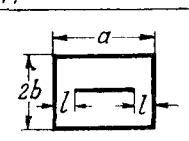
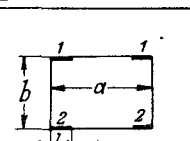
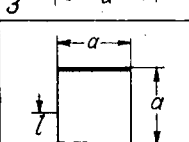
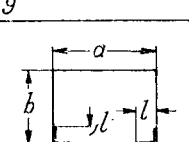
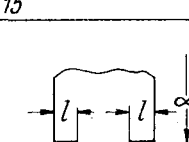
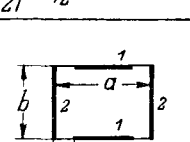
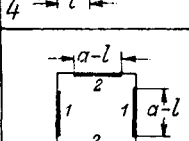
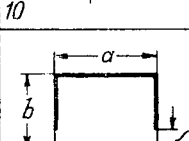
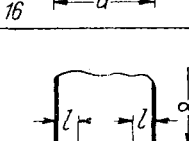
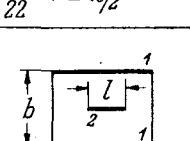
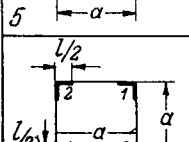
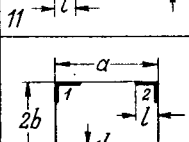
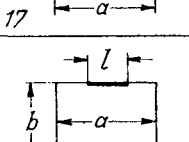
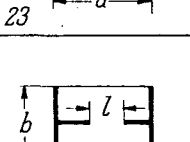
¹ Действительно, если для «прямого» поля образами электродов в плоскости w являются нижняя и верхняя стороны прямоугольника, то для «обратного» — боковые стороны, и наоборот.

Таблица 2

Соотношения между элементами полных эллиптических интегралов первого рода

$\theta_m = \arcsin k$	$k = \sin \theta_m$	$K(k)$	$\theta'_m = 90 - \theta_m$	$k' = \sin \theta'_m$	$K(k')$	$\frac{K(k')}{K(k)}$	$\frac{K(k)}{K(k')}$
0°00'01"	0,000 005	1,571	89°59'59"	0,999 999 999 99	13,60	8,66	0,116
0°00'10"	0,000 048	1,571	89°59'50"	0,999 999 999	11,33	7,21	0,139
0°01'30"	0,000 436	1,571	89°58'30"	0,999 999 905	9,12	5,81	0,173
0°07'	0,002 04	1,571	89°53'	0,999 997 93	7,58	4,82	0,207
0°24'	0,007	1,571	89°36'	0,999 976	6,35	4,05	0,248
1°12'	0,021	1,571	88°48'	0,999 78	5,25	3,34	0,299
3°	0,052	1,572	87°	0,998 63	4,34	2,76	0,363
7°	0,122	1,577	83°	0,992 5	3,50	2,22	0,451
13°	0,225	1,591	77°	0,974	2,90	1,82	0,549
21°	0,358	1,625	69°	0,934	2,46	1,51	0,660
33°	0,545	1,712	57°	0,839	2,08	1,21	0,823
45°	0,707	1,854	45°	0,707	1,85	1,00	1,000
$\theta'_m = 90 - \theta_m$	$k' = \sin \theta'_m$	$K(k')$	$\theta_m = \arcsin k$	$k = \sin \theta$	$K(k)$	$\frac{K(k)}{K(k')}$	$\frac{K(k')}{K(k)}$

Табл. 3

Относительные величины сопротивлений R_0 между электродами при различных конфигурациях поля			
 1	 7	 13	 19
 2	 8	 14	 20
 3	 9	 15	 21
 4	 10	 16	 22
 5	 11	 17	 23
 6	 12	 18	 24

Приложение 1. Принимаем $r=1$, от чего вывод не лишается общности. Отображаем плоскость z на полуплоскость t по схеме рис. 1, а (точки z переходят в точки t с одинаковыми индексами). Пользуясь (4) и учитывая, что $a_1 = \sin \frac{\phi_1}{2}$, $b_1 = \cos \frac{\phi_1}{2}$ и т. д., получаем (6).

Приложение 2. Выделяем сектор $z_1 - z_7$ (рис. 1, б), заключающий в себе электрод и половинки двух соседних электродов. Отображаем плоскость z на плоскость ζ , пользуясь формулой Моавра для $r=1$:

$$\zeta = z^n = \cos n\phi + j \sin n\phi.$$

Рассматриваемый сектор переходит в полную окружность, и получается случай двух электродов, к которому

применяем (2а) и (6а). Результирующее сопротивление $R_{рез}$ будет, очевидно, в n раз меньше R .

Приложение 3. Приводим сечение проводника к $r=1$, полагая $\frac{a}{r} = a_0$ (рис. 2, в). Круг в плоскости z отображаем на верхнюю полуплоскость ζ так, чтобы точки z : 0 , $-j$, ∞ , перешли бы соответственно в точки ζ : j , 0 , $-j$. Пользуясь (4), находим:

$$\zeta_3 = j \frac{1-a_0}{1+a_0}, \quad \zeta_4 = j \frac{1+a_0}{1-a_0}.$$

Надрезаем полуплоскость ζ вдоль силовой линии $\zeta_2 - \zeta_3$, совпадающей с частью положительной мнимой

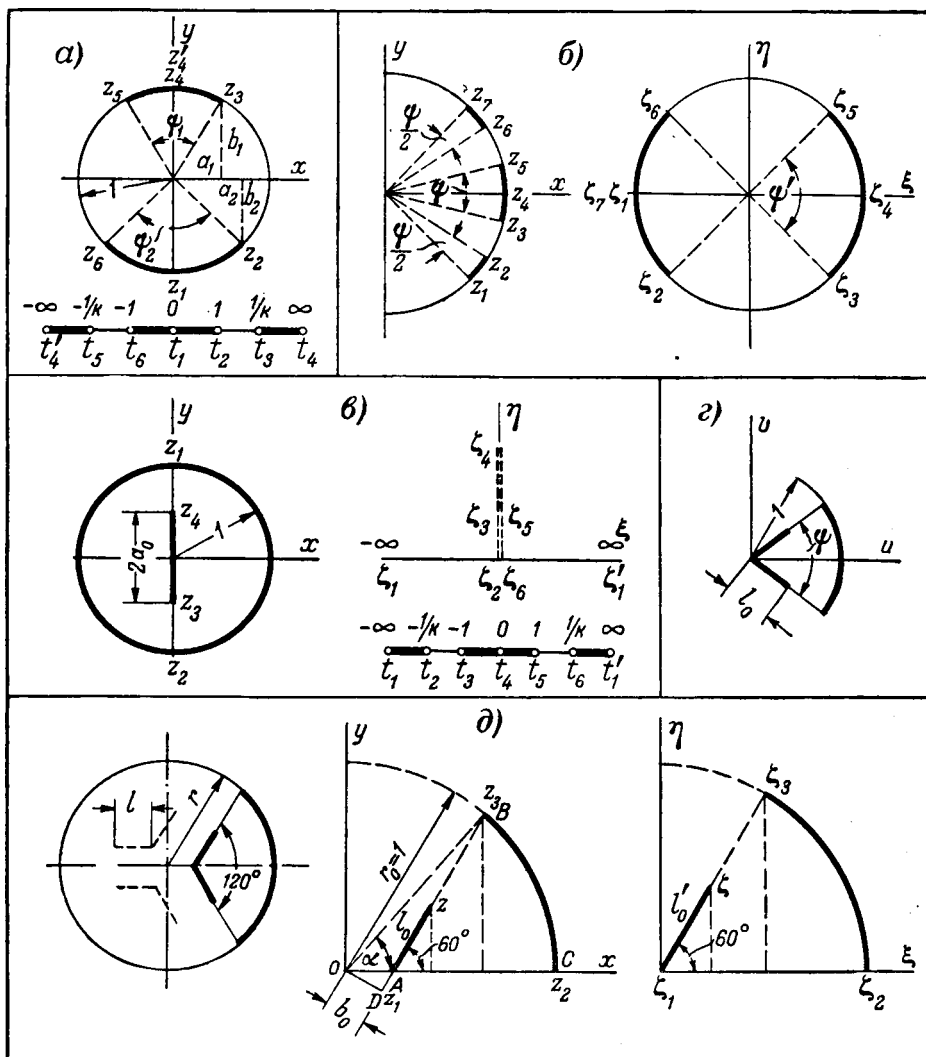


Рис. 1.

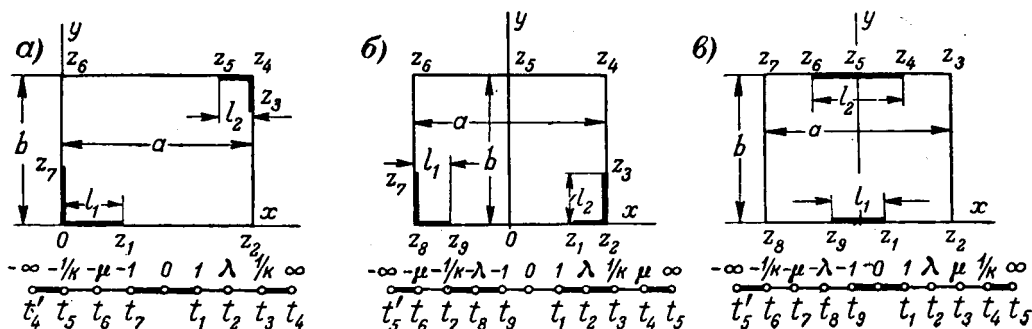


Рис. 2.

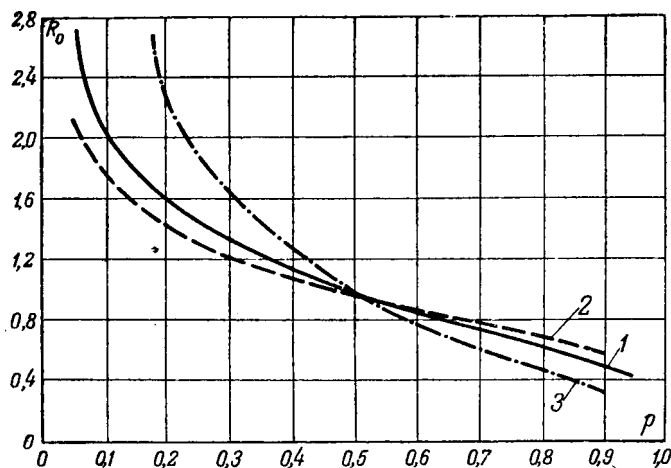


Рис. 3. Сопротивление между электродами в зависимости от параметра p .

1—цилиндр с двумя равновеликими дугообразными электродами: $p = \psi/180$; 2—цилиндрический сектор с угловым и дугообразным электродами: $\psi = 120^\circ$, $p = l/r$; 3—прямоугольный параллельный параллелепипед квадратного сечения с равновеликими угловыми электродами: $p = l/a$.

полуоси, и вдоль отрезка $\zeta_3 - \zeta_4$, являющегося образом плоского электрода. Отображаем теперь на вырожденный многоугольник $\zeta_1 - \zeta_2 - \zeta_3 - \zeta_4 - \zeta_5 - \zeta_6 - \zeta_7$ полуплоскость t так, чтобы точки t действительной оси перешли в точки ζ с одинаковыми индексами.

Применяя (5), получаем:

$$d\zeta = c \frac{tdt}{\sqrt{t^2 - 1/k^2}}.$$

Для определения постоянных c и k составляем два уравнения:

$$\int_{\zeta_4}^{\zeta_5} d\zeta = -j \frac{1+a_0}{1-a_0} = -jc \int_0^{1/k} \frac{tdt}{\sqrt{t^2 - 1/k^2}}$$

$$\int_{\zeta_5}^{\zeta_6} d\zeta = -j \frac{1-a_0}{1+a_0} = -jc \int_1^{1/k} \frac{tdt}{\sqrt{t^2 - 1/k^2}},$$

решая которые, находим k .

Приложение 4. Приводим сектор к единичному радиусу, полагая $l/r = l_0$ (рис. 1,2). Далее, отображаем сектор (плоскость w) на плоскость z с помощью формулы

$$z = w^{180/\psi}.$$

При этом сектор переходит в полуокружность, а угольник — в отрезок диаметра, т. е. задача сводится к предыдущему случаю. Отсюда

$$a_0 = l_0^{180/\psi} = \left(\frac{l}{r}\right)^{180/\psi}.$$

Приложение 5. Поле сводим к предыдущему. Для этого выделяем сектор с половиной электрода и приводим все размеры к $r = 1$ (плоскость z).

Отображаем плоскость z на плоскость ζ . Подставляем в (4):

$$z_1 = \frac{b_0}{\sin 60^\circ}; \quad z_2 = 1; \quad z_3 = \cos \alpha + j \sin \alpha;$$

$$z = \frac{b_0}{\sin 60^\circ} + l_0 \cos 60^\circ + j l_0 \sin 60^\circ; \quad \zeta_1 = 0; \quad \zeta_2 = 1;$$

$$\zeta_3 = \cos 60^\circ + j \sin 60^\circ; \quad \zeta = l'_0 \cos 60^\circ + j l'_0 \sin 60^\circ$$

$$(\alpha = \arccos b_0 - 30^\circ).$$

Преобразуем получающееся уравнение: отделяем в его левой и правой половинах действительную и мнимую части. Из условия равенства действительных (или мнимых) частей находим выражение для l'_0 (12), (13). Выражение для k (11) непосредственно следует из (10).

Приближенное (однако достаточно точное при $b_0 \leq 0.5$) выражение для l'_0 (14) получается, если принять, что фигура ABC (рис. 1,б, плоскость z) эквивалентна сектору, для которого

$$r = \frac{AB + AC}{2}.$$

Приложение 6. Отображаем верхнюю полуплоскость t на прямоугольник в плоскости z по схеме рис. 2,а. Из (5) следует:

$$dz = c \frac{dt}{\sqrt{t(t-\lambda)(t+\mu)}}.$$

Подстановкой $t = \tau^2 - \mu$ получаем нормальную форму под интегральной функцией:

$$dz = c' \frac{d\tau}{\sqrt{(\mu - \tau^2)(\lambda + \mu - \tau^2)}}.$$

Составляем 4 уравнения для определения неизвестных постоянных, учитывая соответствие точек t и τ :

$$\int_0^{z_1} dz = l_1 = c' \int_{\sqrt{\mu}}^{\sqrt{\lambda+\mu}} \frac{d\tau}{\sqrt{(\tau^2 - \mu)(\lambda + \mu - \tau^2)}}; \quad (VI.1)$$

$$\int_0^{z_2} dz = a = c' \int_{\sqrt{\mu}}^{\sqrt{\lambda+\mu}} \frac{d\tau}{\sqrt{(\tau^2 - \mu)(\lambda + \mu - \tau^2)}}; \quad (VI.2)$$

$$\int_{z_3}^{z_4} dz = j l_2 = j c' \int_{\sqrt{1/k+\mu}}^{\infty} \frac{d\tau}{\sqrt{(\tau^2 - \mu)[\tau^2 - (\lambda + \mu)]}}; \quad (VI.3)$$

$$\int_{z_6}^0 dz = -j b = -j c' \int_0^{\sqrt{\mu}} \frac{d\tau}{\sqrt{(\mu - \tau^2)(\lambda + \mu - \tau^2)}}. \quad (VI.4)$$

Для приведения интегралов к тригонометрической форме подставляем: в (VI.1) и (VI.2) $\tau^2 = \lambda + \mu - \lambda \sin^2 \varphi$; в (VI.3) $\tau^2 = \frac{\lambda + \mu}{\sin^2 \varphi}$; в (VI.4) $\tau^2 = \mu \sin^2 \varphi$. После преобразований и исключения c' получаем (15), (16), (17) (табл. 1)

Приложение 7. Производим отображение по схеме рис. 2,б. Отображающая функция:

$$dz = c \frac{dt}{\sqrt{(t^2 - \lambda^2)(t^2 - \mu^2)}}.$$

Неизвестные определяем из уравнений

$$\int_0^{z_1} dz = \frac{a}{2} - l_1 = c \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{(\lambda^2 - t^2)(\mu^2 - t^2)}}, \quad (VII.1)$$

$$\int_0^{z_2} dz = \frac{a}{2} = c \int_0^{\lambda} \frac{dt}{\sqrt{(\lambda^2 - t^2)(\mu^2 - t^2)}}, \quad (VII.2)$$

$$\int_{z_2}^{z_3} dz = j l_2 = j c \int_{\lambda}^{1/k} \frac{dt}{\sqrt{(t^2 - \lambda^2)(\mu^2 - t^2)}}, \quad (VII.3)$$

$$\int_{z_3}^{z_4} dz = j b = j c \int_{\lambda}^{\mu} \frac{dt}{\sqrt{(t^2 - \lambda^2)(\mu^2 - t^2)}}. \quad (VII.4)$$

Интегралам придаем тригонометрическую форму, подставляя в (VII,1) и (VII,2) $t = \lambda \sin \varphi$; в (VI,3) и (VI,4) $t^2 = \mu^2 - (\mu^2 - \lambda^2) \sin^2 \varphi$.

После преобразований и исключения c получаем (21), (22), (23).

При $b = \infty$, $t_4 = \infty$ и $dz = c \frac{dt}{\sqrt{t^2 - \lambda^2}}$. Составляем уравнения, аналогичные (VII,1), (VII,2), (VII,3), и приходим к (24), (25).

Приложение 8. Используем уравнения для предыдущего случая, полагая: $l_2 = 0$, $l_1 = l$ и соответственно $\lambda = l/k$.

Приложение 9. Соответственно схеме рис. 2, $dz = \frac{dt}{\sqrt{(t^2 - \lambda^2)(t^2 - \mu^2)}}$.

Отсюда вытекают уравнения:

$$\int_0^{z_1} dz = \frac{l_1}{2} = c \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{(\lambda^2 - t^2)(\mu^2 - t^2)}}, \quad (\text{IX},1)$$

$$\int_0^{z_2} dz = \frac{a}{2} = c \int_0^\lambda \frac{dt}{\sqrt{(\lambda^2 - t^2)(\mu^2 - t^2)}}, \quad (\text{IX},2)$$

$$\int_{z_2}^{z_3} dz = jb = jc \int_\lambda^\mu \frac{dt}{\sqrt{(\lambda^2 - t^2)(\mu^2 - t^2)}}, \quad (\text{IX},3)$$

◇ ◇ ◇

Схема включения люминесцентных ламп при измерении их характеристик

Инж. М. Ш. КАПНИК

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

Измерение электрических и световых параметров люминесцентных ламп связано с введением в их электрическую цепь ряда приборов и устройств, которые отсутствуют при нормальной эксплуатации этих ламп [Л. 1]. Естественно возникает вопрос о влиянии этих элементов схемы на измеряемые параметры.

Целью настоящей работы является выяснение влияния шунтирующих люминесцентную лампу активных сопротивлений вольтметра и вольтметровой катушки ваттметра, искажений (по сравнению с синусоидой) формы кривой питающего лампы напряжения, вызванных введением в цепь лампы феррорезонансного стабилизатора напряжения без специальных фильтров. На основании сделанных наблюдений приводится рациональная схема включения люминесцентных ламп при измерении их характеристик.

Влияние шунтирования люминесцентной лампы активным сопротивлением. Измерение падения напряжения на лампе и мощности, потребляемой ею, приводит обычно к шунтированию лампы активными сопротивлениями вольтметра и вольтметровой катушки ваттметра¹. Это шунти-

Приведены экспериментальные материалы, показывающие зависимость светового потока люминесцентной лампы от схемы включения измерительных приборов при фотометрировании. Дается рациональная схема включения люминесцентной лампы и приборов.

рование вызывает уменьшение тока через лампу I на величину ΔI и соответственное уменьшение ее светового потока F .

Весьма существенным является то обстоятельство, что установка по амперметру прежнего значения тока после шунтирования лампы (т. е. того значения, которое было до включения шунтирующего сопротивления) не вызывает одновременно восстановления прежнего значения светового потока F . Величина светового потока для лампы, зашунтированной активным сопротивлением, получается меньшей на величину ΔF , что связано с некоторым изменением формы кривых тока и напряжения при шунтировании лампы активным сопротивлением (рис. 1 и 2). Хотя некоторые авторы [Л. 2] и пренебрегают этими изменениями, последние заслуживают более детального рассмотрения для оценки их величины. На рис. 3 приводится зависимость изменения тока в лампе $\frac{\Delta I}{I}$ (кривая 1) и светового потока $\frac{\Delta F}{F}$ (кривая 2) от величины сопротивления, шунтирующего лампу при частоте 50 гц.

Для обычных условий измерений, т. е. для сопротивлений приборов от 2000 до 5000 ом,

$$\int_{z_4}^{z_3} dz = -\frac{l_2}{2} = -c \int_{1/k}^{\infty} \frac{dt}{\sqrt{(t^2 - \lambda^2)(t^2 - \mu^2)}}. \quad (\text{IX},4)$$

В (IX,1) и (IX,2) полагаем $t = \lambda \sin \varphi$, в (IX,3) подстав-

$$t^2 = \mu^2 - (\mu^2 - \lambda^2) \sin^2 \varphi \text{ и в (IX,4) } t^2 = \frac{\mu^2}{\sin^2 \varphi}.$$

Литература

1. А. П. Беляков. Емкость и сопротивление растеканию тока в случае сферических и цилиндрических электродов в однородной среде. Электричество, № 6, 1948.
2. А. В. Нетушил, К. Б. Исаев и С. К. Федоров. Применение системы формул Максвелла для расчета сопротивлений между электродами при электронагреве бетона. Электричество, № 6, 1949.
3. А. В. Нетушил. Об одном элементарном соотношении в некоторых симметричных потенциальных полях. Электричество, № 3, 1951.
4. М. А. Лаврентьев. Конформные отображения. Гостехиздат, 1946.
5. Ю. С. Сикорский. Элементы теории эллиптических функций с приложениями к механике. НТИ, НКТП СССР, 1936.
6. А. В. Нетушил. Некоторые задачи теории высокочастотного нагрева. Электричество, № 8, 1952

[29.7.1952]

¹ Шунтирование будет, конечно, отсутствовать при измерении напряжения электростатическим вольтметром и при использовании электростатического метода измерения мощности.

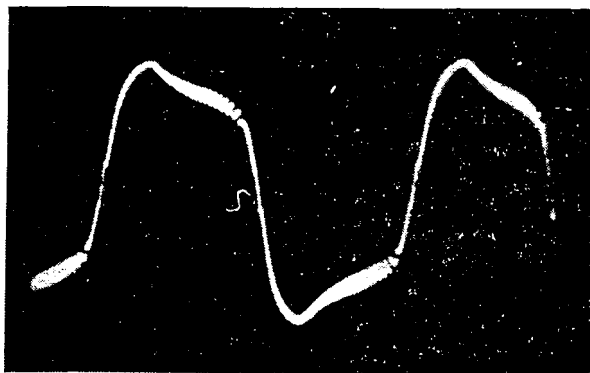


Рис. 1. Осциллограмма напряжения на лампе при питании ее через стабилизатор напряжения. Балласт — дроссель. Лампа шунтирована вольтметром с внутренним сопротивлением 542 ом.

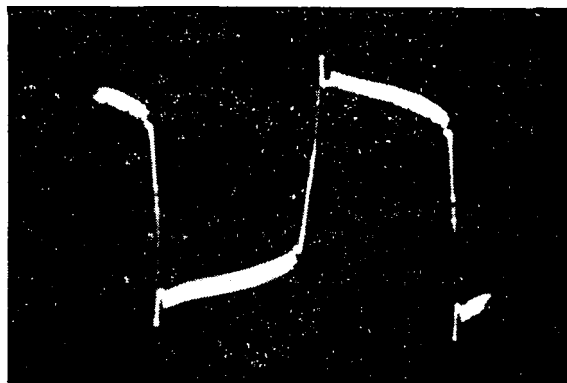


Рис. 2. Осциллограмма напряжения на лампе при питании ее через феррорезонансный стабилизатор напряжения. Балластом служит дроссель. Лампа не шунтирована.

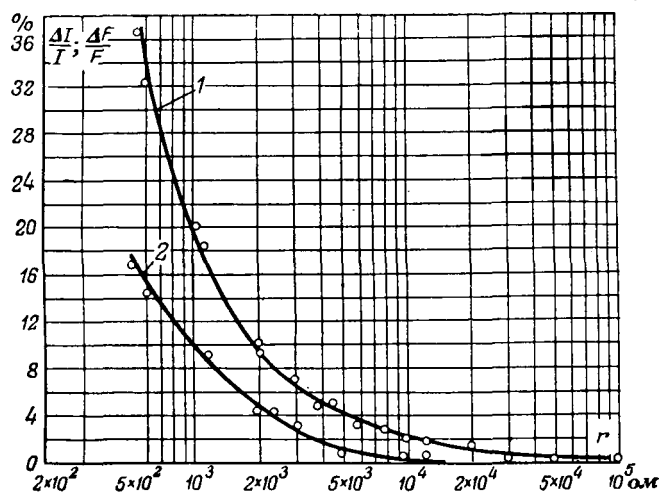


Рис. 3. Зависимость изменения (в процентах) величины тока, проходящего через люминесцентную лампу, и ее светового потока от сопротивления, шунтирующего лампу.

величина $\frac{\Delta I}{I}$ будет колебаться в пределах 4...10%, а величина $\frac{\Delta F}{F}$ — в пределах 1...5%.

Влияние несинусоидальности питающего напряжения на параметры люминесцентной лампы. Измерения электрических и световых параметров люминесцентных ламп (и ламп газового разряда вообще), питаемых переменным током, встречают затруднения вследствие нестабильности напряжения питающей их сети. Устранение этого затруднения достигается обычно введением в цепь феррорезонансного стабилизатора напряжения.

Однако такое мероприятие вызывает искажение формы кривой напряжения, питающего лампу. В свою очередь это приводит к изменению формы кривой тока, идущего через лампу (рис. 4 и 5).

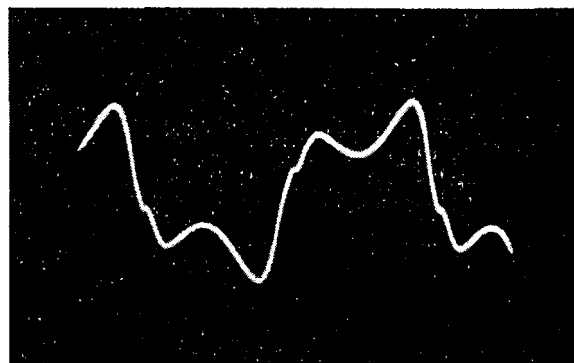


Рис. 4. Осциллограмма тока, проходящего через лампу при питании через стабилизатор напряжения. Балластом служит активное сопротивление.

При использовании дросселя в качестве балласта это изменение формы кривой тока будет менее сильным. Форма кривой напряжения на лампе при введении в цепь стабилизатора будет изменяться незначительно.

Следствием искажения формы кривой тока и напряжения является изменение мощности и светового потока, излучаемого лампой.

В таблице приводятся выборочные данные об электрических и световых параметрах 15-ваттной люминесцентной лампы.

Способ питания	Род балласта	Напряжение на лампе, в	Ток через лампу, а	Мощность, потребляемая лампой, вт	Световой поток лампы в относительных единицах	Световая отдача лампы в относительных единицах
Без стабилизатора	Активное сопротивление	58,2	0,3	13,3	100,0	100,0
То же	Дроссель	58,5	0,3	15,5	113,0	97,8
Через стабилизатор	Активное сопротивление	58,1	0,3	16,0	119,0	100,0
То же	Дроссель	58,2	0,3	15,5	115,0	99,0

Примечание. При вычислении световой отдачи лампы принято значение величины светового потока F' , которое получается при условии что лампа шунтирована вольтметровой цепью ваттметра и вольтметром.

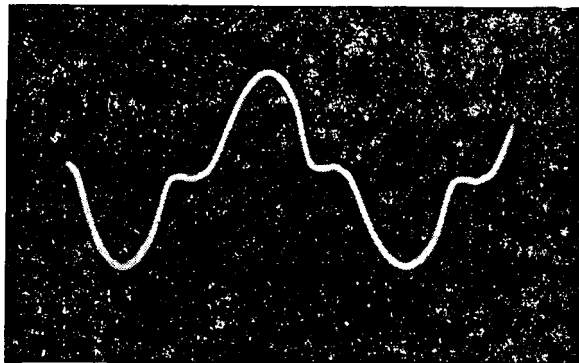


Рис. 5. Осциллограмма тока, проходящего через лампу при питании ее без стабилизатора напряжения. Балластом служит активное сопротивление.

Выбор схемы включения люминесцентной лампы. При измерении электрических и световых параметров люминесцентных ламп можно рекомендовать схему, приведенную на рис. 6. Эта схема обеспечивает минимальную величину искажений, вносимых электроизмерительными приборами в работу лампы.

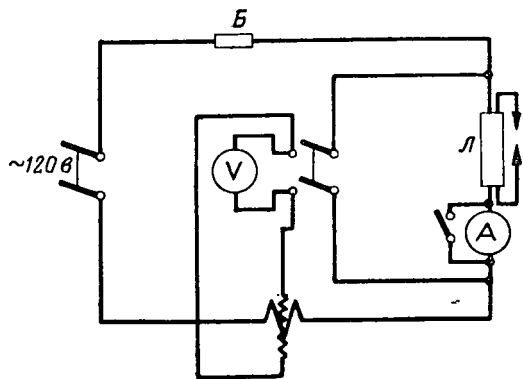


Рис. 6. Схема включения люминесцентной лампы Л с балластом Б.

При измерениях следует придерживаться следующего порядка операций:

1. Включается питание и зажигается лампа при зашунтированном амперметре и отключенных вольтметре и ваттметре.
2. После периода разгорания лампы [Л. 3] устанавливается по амперметру величина тока I .
3. Измеряется величина светового потока лампы.

4. Включаются вольтметр и ваттметр. Вследствие шунтирования лампы активными сопротивлениями вольтметра и вольтметровой катушки ваттметра величина тока через лампу I и ее светового потока F уменьшаются.

5. Регулированием величины балласта устанавливается прежнее значение величины тока I .

6. Снова при включенных вольтметре и ваттметре замеряется величина светового потока F' лампы при том же значении величины тока через лампу I .

7. Амперметр шунтируется и по вольтметру и ваттметру замеряются величины напряжения на лампе U и мощность P_1 . Тогда

$$P = P_1 - \frac{U^2}{r_g} - \frac{U^2}{r_{em}};$$

здесь P — мощность, потребляемая лампой;

r_g — сопротивление вольтметра;

r_{em} — сопротивление вольтметровой катушки ваттметра.

Использованием при измерениях мощности электродинамического ваттметра определенной конструкции допускается сравнительно небольшая ошибка. Можно также рекомендовать применение термоваттметра [Л. 4] или электростатического метода измерения мощности [Л. 5].

Выводы. Установлено, что при одной и той же величине тока, проходящего через лампу, световой поток ее будет различным в зависимости от того, шунтируется ли она активным сопротивлением или нет.

Для уточнения понятия световой отдачи η следует установить, что из двух величин светового потока лампы F и F' нужно при подсчете η применить величину F' .

Приведенные в работе данные в совокупности с данными, опубликованными в других работах, указывают на крайнюю нежелательность использования люминесцентных ламп в качестве эталонных. Применение обычных эталонных ламп накаливания с соответствующими фильтрами будет наиболее удачным решением вопроса.

Литература

1. В. А. Фабрикант. УФН, т. 27, стр. 159, вып. 5, 1945.
2. Carter G. W. The Electr. Review, стр. 535, № 132, 1938.
3. С. Г. Юров. ЖТФ, т. 20, стр. 516, вып. 5, 1950.
4. П. П. Храмов. Электричество, стр. 66, № 12, 1940.
5. В. В. Базилевич. Электрические измерения и приборы. Ленинград, Госэнергоиздат, стр. 326—327, 1935.

{31. 10. 1952}



Экспериментальное исследование переходных процессов в бесконтактных магнитных реле

Кандидат техн. наук И. Б. НЕГНЕВИЦКИЙ и инж. Л. Л. САМУРИНА

Москва

При определенных условиях магнитный усилитель с положительной обратной связью работает в релейном режиме [Л. 1] и может быть использован

при этом в качестве бесконтактного реле. Такое реле будем называть магнитным реле.

Естественно, что для практики имеет большое значение вопрос о времени срабатывания и времени отпускания реле. Особенностью магнитного реле является то, что оно не производит собственно разрыва или замыкания цепи нагрузки, а осуществляет лишь изменение тока в нагрузке от некоторого минимального значения до максимального или наоборот. Поэтому процесс срабатывания или отпускания в магнитном реле отличается от обычного для контактного реле. Соответственно различаются для них и понятия «время срабатывания» и «время отпускания».

В обычном контактном реле время срабатывания складывается из времени нарастания управляющего тока до значения тока трогания и времени движения контактов. По истечении времени срабатывания контакты замыкаются и ток в активной нагрузке устанавливается практически мгновенно. В магнитном реле ток в нагрузке изменяется одновременно с изменением управляющего тока, следовательно, и при активной нагрузке изменяется постепенно во времени. Поэтому условимся считать, что магнитное реле «сработало» или «отпустило», если ток в нагрузке достиг своего установившегося значения с точностью в 5%.

Исходя из этого, под терминами «время срабатывания» и «время отпускания» будем понимать время, отсчитанное от момента подачи напряжения на управляющую обмотку до момента достижения током нагрузки указанного выше значения. Очевидно, что это время полностью определяется переходным процессом в схеме магнитного реле.

В данной работе переходные процессы в магнитных реле рассматриваются только в разрезе времени срабатывания и отпускания. На основе экспериментального исследования дается качественное описание физических процессов при срабатывании магнитного реле, анализ влияния различных параметров на время и характер протекания переходных процессов и вытекающие отсюда методы регулировки времени срабаты-

вания. Качественно рассмотрено влияние различных параметров на переходные процессы в дроссельном магнитном реле. Дается анализ и сравнение ряда методов изменения времени срабатывания и отпускания. Приведены результаты экспериментального исследования.

Вопросы расчета переходных процессов в магнитном реле не рассматриваются.

Качественная картина переходных процессов.

На рис. 1 приведена принципиальная схема простейшего дроссельного магнитного реле. Инерционность магнитного реле обусловлена переходными процессами в цепях постоянного тока (управления, обратной связи) и в цепи переменного тока. Однако обычно запаздывание в цепи переменного тока сравнительно мало, и время срабатывания определяется в основном временем изменения постоянной составляющей магнитного потока.

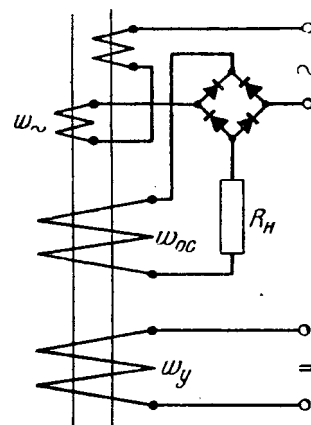


Рис. 1. Принципиальная схема дроссельного магнитного реле.

Управляющая цепь представляет собой замкнутый контур, препятствующий изменению тока в обмотке обратной связи w_{oc} и, следовательно, в нагрузке R_n . С другой стороны, контур обратной связи, нагрузки и выпрямителя при определенных условиях является замкнутым и препятствует изменению управляющего тока. Однако в обычных условиях работы магнитного реле последнее обстоятельство имеет меньшее значение и можно считать, что между обмотками w_u и w_{oc} имеет место лишь односторонняя индуктивная связь.

Случай параллельного соединения обмоток переменного тока w_{\sim} , при котором возрастает

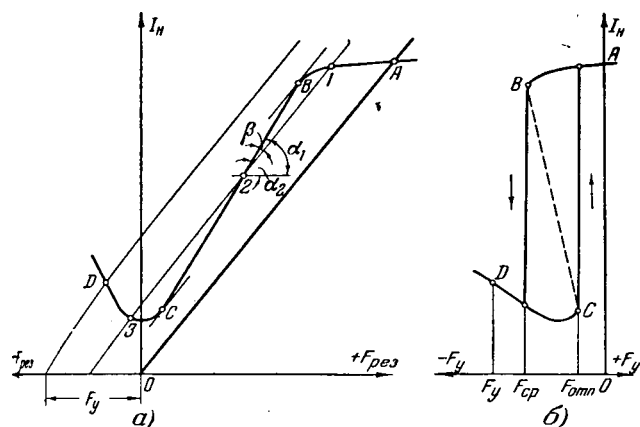


Рис. 2.

a—кривая $ABCD$ —характеристика магнитного усилителя без обратной связи; OA —характеристика обратной связи; *b*—статическая характеристика дроссельного магнитного реле.

инерционность магнитного реле, здесь не рассматривается. Влиянием вихревых токов и гистерезиса обычно можно пренебречь.

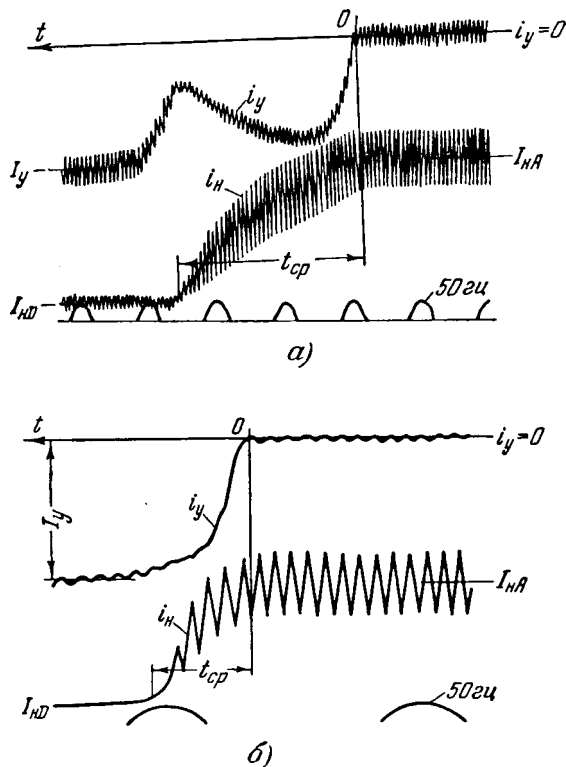
Рассмотрим, как протекает процесс срабатывания дроссельного магнитного реле (рис. 1).

На рис. 2, *a* (кривая $ABCD$) приведена зависимость тока в нагрузке от результирующей постоянной составляющей намагничивающей силы (н. с.): $F_{рез} = F_{ос} + F_y$ (характеристика усилителя без обратной связи). Рабочая точка усилителя с обратной связью определяется пересечением кривой $ABCD$ с характеристикой $F_{ос} = f(I_{кр})$, смещенной в соответствии с данным током управления I_y .

При $I_y = 0$ рабочей является точка A ; в нагрузке протекает ток $I_{нА}$. При подаче на вход реле напряжения, обеспечивающего в установившемся режиме н. с. управления F_y , начнет возрастать ток $i_y(F_y)$, прямая OA сместится влево и рабочая точка будет перемещаться по участку AB кривой $ABCD$. На этом участке ток i_n изменяется сравнительно незначительно, и влияние его изменения на ток i_y соответственно мало. После точки B (по статической релейной характеристике — рис. 2, *b* — начало „скачкообразного“ изменения тока i_n) ток i_n и, следовательно, постоянная составляющая потока стремятся резко измениться. Однако при этом в цепи управления наведется э. д. с. и появится дополнительная слагающая тока, препятствующая изменению постоянного потока Φ_+ .

Таким образом, ток i_y в цепи управления складывается как бы из двух токов: тока i'_y , вызванного приложенной к цепи управления э. д. с. E_y , и тока i''_y , вызванного изменением потока Φ_+ , главным образом вследствие изменения тока i_n . Ток i'_y стремится вызвать срабатывание реле, т. е. умень-

¹ $I_{кр}$ — среднее значение переменного тока, равное при идеальном выпрямителе и активной нагрузке выпрямителя току I_n .

Рис. 3. Осциллограммы $i_y = f(t)$ и $i_n = f(t)$ при срабатывании магнитного реле.

a— $R_y = 17$ ом; *b*— $R_y = 650$ ом.

шить ток i_n , а ток i''_y препятствует этому: $i_y = i'_y - i''_y$.

В нижней части кривой $ABCD$ (рис. 2, *a*) ток i_n и поток Φ_+ изменяются незначительно, поэтому i''_y уменьшается и становится равным нулю в конце переходного процесса, а рабочая точка определяется установившимся значением н. с. управления F_y (точка D , рис. 2, *a*). Итак, при движении рабочей точки по участкам AB и CD (рис. 2, *a*) влияние тока i''_y мало, а на участке BC ток i''_y оказывает сильное задерживающее влияние. Поэтому основную часть времени срабатывания составляет время изменения тока I_n от $I_{нВ}$ до величины $I_{нС}$.

На основании изложенного можно уяснить характер влияния различных параметров реле на время переходного процесса.

Влияние сопротивления в цепи управления. С увеличением сопротивления R_y в цепи управления (при прочих неизменных параметрах) ток i'_y нарастает быстрее, а противодействующий ему ток i''_y уменьшается и быстрее спадает. Естественно, что с увеличением R_y время срабатывания или отпускания уменьшается. В последнем случае считается, что уменьшение тока I_y до нуля осуществляется без разрыва цепи управления. На рис. 3 приведены осциллограммы токов i_n и i_y при срабатывании магнитного реле для двух раз-

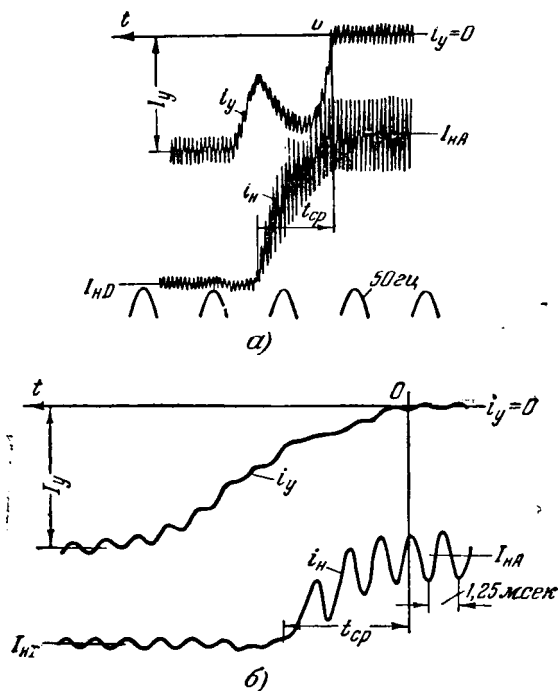


Рис. 4. Осциллограммы $i_y = f(t)$ и $i_n = f(t)$ при срабатывании магнитного реле.
а — коэффициент запаса по току срабатывания $k_3 = 1,25$;
б — $k_3 = 5,25$.

личных значений R_y . При меньшем R_y в кривой тока i_y имеется характерный провал, обусловленный током i''_y . При увеличении R_y провал уменьшается и в дальнейшем совсем исчезает.

Влияние числа витков управляющей обмотки. При увеличении w_y и неизменных F_y , R_y и других параметрах, кроме увеличения постоянной времени собственно управляющей цепи, увеличивается э. д. с., наведенная в w_y при изменении i_n и, следовательно, увеличивается ток i''_y , противодействующий срабатыванию (или отпуску) реле. С увеличением w_y задерживающее влияние цепи управления, являющейся замкнутым контуром по отношению к цепи w_{oc} , увеличивается и, естественно, время срабатывания или отпущения возрастает.

Влияние коэффициента запаса по току срабатывания. Под коэффициентом запаса k_3 по току срабатывания в релейной технике обычно понимается отношение установившегося значения управляющего тока к значению тока срабатывания

$$k_3 = \frac{I_y}{I_{ср}} = \frac{F_y}{F_{ср}}.$$

Чем больше k_3 , тем быстрее ток i_y достигает значения тока срабатывания, а влияние тока i''_y относительно уменьшается. Следовательно, с увеличением k_3 ускоряется переходный процесс и уменьшается время срабатывания $t_{ср}$. На рис. 4 приведены две осциллограммы срабатывания маг-

нитного реле для двух значений k_3 . Из осциллограммы видно, как с увеличением k_3 уменьшается провал в кривой тока i_y и уменьшается $t_{ср}$. Также влияет изменение коэффициента k_3 на время отпущения $t_{отп}$.

Между отпуском и срабатыванием можно провести некоторую аналогию. Участку AB при срабатывании соответствует участок DC при отпуске (рис. 2). Отношение

$$k'_3 = \frac{F_y}{F_y - F_{отп}} = \frac{1}{1 - \frac{F_{отп}}{F_y}}$$

можно назвать коэффициентом запаса при отпуске.

При увеличении k_3 , т. е. F_y , k'_3 уменьшается, стремясь к единице; при этом время отпущения увеличивается.

Влияние смещения. При введении положительного смещения [Л. 1], сдвигающего петлю характеристики (рис. 2, б) влево, при неизменной разности $(F_y - F_{ср})$ время срабатывания $t_{ср}$ незначительно увеличивается, а время $t_{отп}$ резко уменьшается. Если при увеличении смещения поддерживать неизменным коэффициент k_3 , то $t_{отп}$ изменяется меньше, а $t_{ср}$ не изменяется. Подобный эффект смещения очевиден из рассмотренного выше влияния k_3 .

Влияние коэффициента обратной связи k_{oc} . Сместим прямую обратной связи (прямая OA , рис. 2, а) так, чтобы рабочая точка находилась в точке 2. Этот режим является неустойчивым, и при каком-либо внешнем толчке рабочая точка переместится в точку 1 или 3. Неустойчивыми будут все точки, в которых угол β , равный разности углов наклона характеристики усилителя без обратной связи α_1 и прямой обратной связи α_2 , будет положительным. При этом значение угла β характеризует степень неустойчивости: чем больше β , тем менее устойчив участок BC на характеристике усилителя, а следовательно, тем быстрее рабочая точка переместится в устойчивую точку (1 или 3). При работе реле „на срабатывание“ к цепи управления приложена э. д. с. E_y , обеспечивающая перемещение рабочей точки по направлению к точке 3, а не к точке 1.

Как указывалось выше, время изменения тока I от $I_{нв}$ до $I_{нс}$ (рис. 2, а) составляет основную часть всего времени срабатывания. Поэтому при неизменных коэффициенте запаса по току срабатывания и остальных параметрах с увеличением k_{oc} (угла β) общее время срабатывания (или отпущения) уменьшится, а с уменьшением k_{oc} — увеличится. Зависимость $t_{ср}$ от k_{oc} наиболее резко проявляется при сравнительно небольших значениях сопротивления управляющей цепи R_y , так как при больших R_y влияние контура w_{oc} вообще мало.

Интересно отметить, что в магнитном усилителе с положительной обратной связью, работаю-

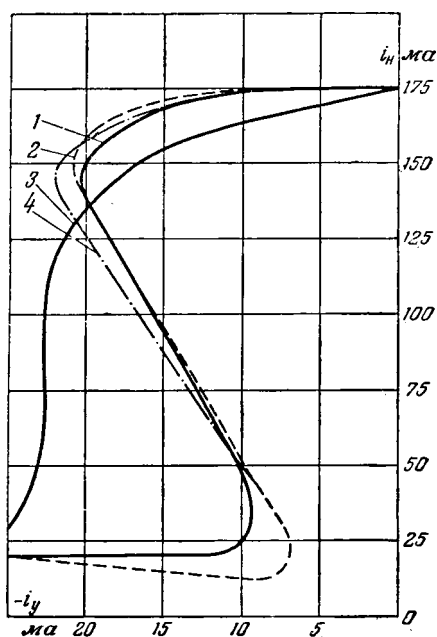


Рис. 5

1 — динамическая; 2 — статическая характеристика магнитного реле при $R_y = 17$ ом; 3 и 4 — то же при $R_y = 650$ ом.

щем не в релейном режиме, постоянная времени усилителя возрастает с увеличением k_{oc} (в этом случае с увеличением k_{oc} угол β уменьшается). Наибольшее время переходного процесса будет при „критическом“ режиме — на границе режимов линейного усиления и релейного.

Изложенная выше качественная картина переходных процессов в магнитном реле является, конечно, весьма приближенной. Разделение тока i_y на два слагаемых i'_y и i''_y также весьма условно. Однако даже такой приближенный подход помогает пониманию физических процессов в магнитных реле и выяснению влияния на них различных факторов.

В реальных условиях рассматриваемые явления гораздо сложнее. Теоретический анализ и расчет осложняются в первую очередь тем, что, как показало исследование, статическая характеристика усилителя без обратной связи (кривая 1, рис. 2, а) и статическая характеристика (прямая) обратной связи отличаются от динамических. Например, на рис. 5 кривая 1 изображает зависимость $I_n = f(I_y)$ при $R_y = 17$ ом, построенную по осциллограммам (динамическая характеристика), а кривая 2 дает ту же зависимость, построенную по статической характеристике усилителя без обратной связи и прямой обратной связи (статическая характеристика). Аналогичные кривые 3 и 4 соответствуют $R_y = 650$ ом и иллюстрируют еще большую разницу между статическими и динамическими характеристиками.

Методы изменения времени срабатывания и отпускаания магнитного реле. Ряд методов изменения t_{cp} и t_{om} вытекает из рассмотренного

выше влияния различных параметров. Например, для уменьшения t_{cp} можно включить в управляющую цепь дополнительное сопротивление. Если параллельно этому сопротивлению включить емкость (дифференцирующая ячейка), то t_{cp} еще более уменьшится. Вообще в магнитном реле могут быть использованы все электрические методы изменения t_{cp} , применяемые в обычных контактных реле: изменение параметров управляющей цепи (включение дополнительных сопротивлений, индуктивностей, емкостей, увеличение коэффициента запаса по току срабатывания), применение короткозамкнутых обмоток. Кроме того, t_{cp} и t_{omn} можно регулировать изменением k_{oc} и изменением смещения.

Большинство из указанных методов изменения t_{cp} и t_{omn} связано с дополнительной затратой мощности в цепи управления, т. е. с уменьшением чувствительности реле, что является их недостатком. Для магнитных реле применим еще один метод изменения t_{cp} и t_{omn} , заключающийся в введении так называемой внутренней гибкой обратной связи [Л. 2].

Введение внутренней гибкой обратной связи. Гибкая обратная связь может быть осуществлена с помощью трансформатора или конденсатора.

Сигнал гибкой обратной связи может подаваться или на отдельную обмотку w_d магнитного реле (рис. 6), или на управляющую обмотку w_y ,

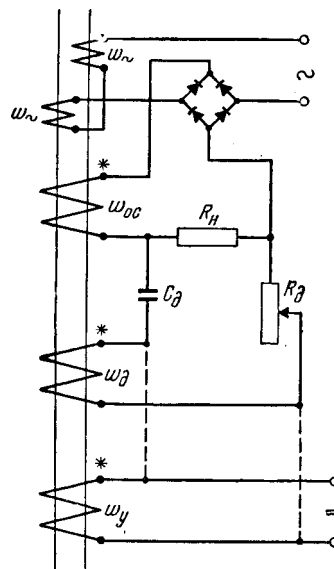


Рис. 6. Принципиальная схема дроссельного магнитного реле с гибкой обратной связью.

как показано пунктиром на рис. 6. При отсутствии управляющего сигнала напряжения на нагрузке R_n и на конденсаторе C_d равны и максимальны. Постоянная составляющая тока в цепи гибкой связи равна нулю. При поступлении управляющего сигнала напряжение на нагрузке будет уменьшаться, вызывая разряд конденсатора. В результате появится разрядный ток конденсатора i_d ,

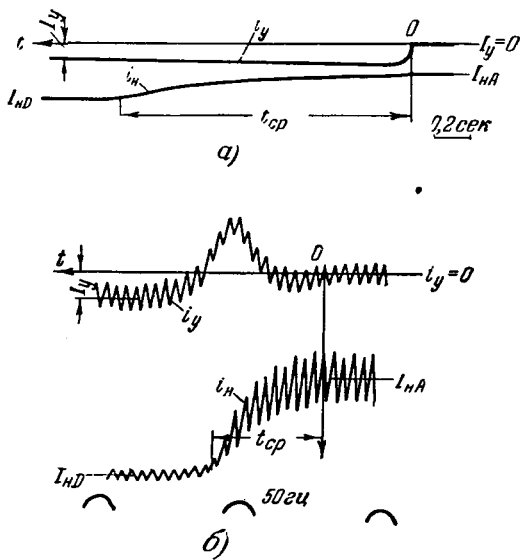


Рис. 7. Осциллограммы $i_y = f(t)$ и $i_n = f(t)$ при срабатывании магнитного реле с гибкой обратной связью.

На замедление (а) и на ускорение (б) срабатывания (осциллограмма для того же реле при отсутствии гибкой обратной связи приведена на рис. 3.а).

который, действуя согласно или встречно с током i_y , будет вызывать ускорение или замедление срабатывания реле.

Изменением параметров контура гибкой связи (R_d , C_d , ω_d) можно регулировать в широких пределах время срабатывания и отпускания как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Схема на рис. 6 соответствует включению на ускорение срабатывания. На рис. 7 приведены осциллограммы, иллюстрирующие действие гибкой обратной связи.

При подаче сигнала гибкой обратной связи в управляющую обмотку w_y мощность в цепи управления и, следовательно, чувствительность реле остаются неизменными.

Схема с введением гибкой связи с помощью дифференцирующего трансформатора осуществляется аналогично. Гибкую связь можно вводить через промежуточный усилитель. В контактных реле подобная связь, естественно, не может быть применена.

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проводились для реле, собранного на тороидальных сердечниках из пермаллоя. Данные сердечников: наружный диаметр — 42 мм; внутренний диаметр — 30 мм; толщина пакета каждого сердечника — 3 мм. Данные обмоток: $w_{\sim} = 280$, $w_{oc} = 320$ с различными отводами; $w_y = 290$, $w_d = 270$. Нагрузка активная, $R_n = 50$ ом. Напряжение питания $U_{\sim} = 15$ в. 400 гц. Ток в нагрузке при срабатывании реле изменяется от 175 до 20 ма.

На рис. 8 дано время срабатывания в зависимости от R_y и от k_3 при $k_{oc} = 1,14$. Рис. 9 дает кривые зависимости t_{cp} от k_{oc} при $k_3 = 1,2$ и различных R_y . Здесь же для сравнения приве-

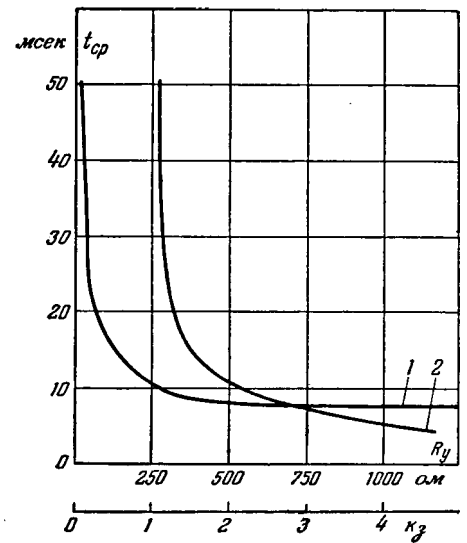


Рис. 8.

$t - t_{cp} = f(R_y)$ при $k_{oc} = 1,14$ и $k_3 = 1,2$; 2 — $t_{cp} = f(k_3)$ при $k_{oc} = 1,14$ и $R_y = 43$ ом.

дены аналогичные зависимости для $k_{oc} < 1,018$, т. е. при работе в режиме линейного усиления.

Как уже указывалось выше, уменьшение времени срабатывания изменением параметров управ-

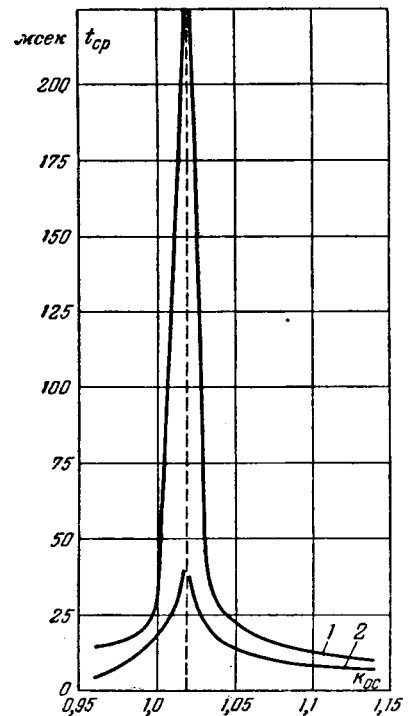


Рис. 9. $t_{cp} = f(k_{oc})$.

1 — $R_y = 250$ ом; 2 — $R_y = 1000$ ом (пунктиром показана граница релейного режима).

ляющей цепи требует дополнительных затрат мощности управления P_y . Интересно сравнить эффективность различных методов уменьшения t_y

по затрачиваемой мощности управления. Сравнительные кривые $t_{cp} = f(P_y)$ приведены на рис. 10. Очевидно, что в данном случае наиболее эффективным методом уменьшения t_{cp} является введение в цепь w_y дополнительного сопротивления, шунтированного емкостью (кривая 3).

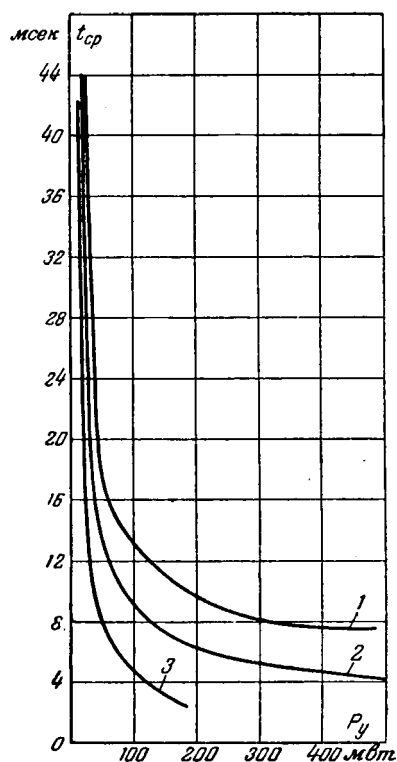


Рис. 10. $t_{cp} = f(P_y)$ при $k_{oc} = 1,14$.

1—при изменении R_y ($k_3 = 1,2$); 2—при изменении k_3 ($R_y = 43$ ом); 3—при введении различных сопротивлений в цепь w_y , шунтируемых емкостью $C = 200$ мкф.

На рис. 11 дана зависимость t_{cp} от величины C_d при $w_d = 270$ при включении гибкой обратной связи на замедление срабатывания.

При включении гибкой обратной связи на ускорение срабатывания минимальное время срабатывания, которое было получено при $k_{oc} = 1,035$, $R_y = 43$ ом и $k_3 = 1,2$, равнялось 16...17 мсек. Чтобы снизить до такой же величины t_{cp} путем включения добавочного сопротивления, шунти-

руемого емкостью, необходимо увеличить мощность управления P_y почти в 2 раза. Можно уменьшить время переходного процесса в магнитных усилителях и магнитных реле путем повышения частоты питания.

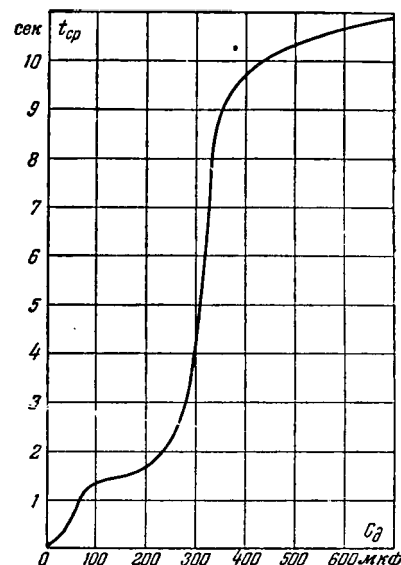


Рис. 11. $t_{cp} = f(C_d)$ при включении гибкой связи на замедление срабатывания ($R_y = 17$ ом, $k_{oc} = 1,14$, $k_3 = 1,2$).

Заключение. Из изложенного видно, что имеется ряд методов ускорения и замедления времени срабатывания магнитного реле. Наилучшим с точки зрения сохранения чувствительности реле при широком диапазоне изменения времени срабатывания является введение гибкой обратной связи соответствующего знака и величины.

Вопрос о переходных процессах в магнитных усилителях в релейном режиме весьма сложен и в данной статье сделана лишь попытка качественной оценки влияния различных параметров и методов регулировки времени срабатывания и отпускания простейшего дроссельного магнитного реле.

Литература

1. И. Б. Негневицкий. Магнитный усилитель в релейном режиме. Электричество, № 4, 1949.
2. Д. И. Марьяновский. Изменение параметров систем регулирования внутренними связями. Электричество, № 2, 1950.

[6.12.1952]



Статические диаграммы блуждающих токов

Инж. И. Ю. БАРОН

Среднеазиатский политехнический институт

1. Рекомендуемый «Правилами защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами» (3/X 1940 г.) и «Временными техническими условиями на защиту от коррозии подземных металлических сооружений в г. Москве» (1949 г.) метод составления потенциальных диаграмм рельс — земля для выявления зон входа и выхода токов из рельсов трамвайных путей не позволяет точно выяснить места сосредоточения выхода тока из рельсов и его входа в рельсы, ввиду непрерывного изменения точек приложения и значений нагрузок вдоль путей и перехода измеряющего с места на место в процессе замеров.

Предлагается новый метод экспериментальной проверки работы и состояния рельсовой сети, предусматривающий отключение в ночное время всей тяговой нагрузки и создание на отдельных секциях сети искусственной неизменной нагрузки, при которой рекомендуется снимать потенциальные диаграммы и диаграммы блуждающих токов (статические диаграммы). Приводятся экспериментальные данные.

ной диаграммы может быть выполнено только в срок, исчисляемый многими неделями.

Исследования потенциальных диаграмм рельс — земля трамвайных путей города свидетель-

ствуют о том, что диаграммы не могут являться материалом, определяющим точные значения и зоны выходящих из рельсов и входящих в рельсы токов. На рис. 1 и 2 приведены потенциальные диаграммы на трамвайных участках двух улиц, снятые в октябре 1948 г., ноябре 1950 г. и мае 1951 г.

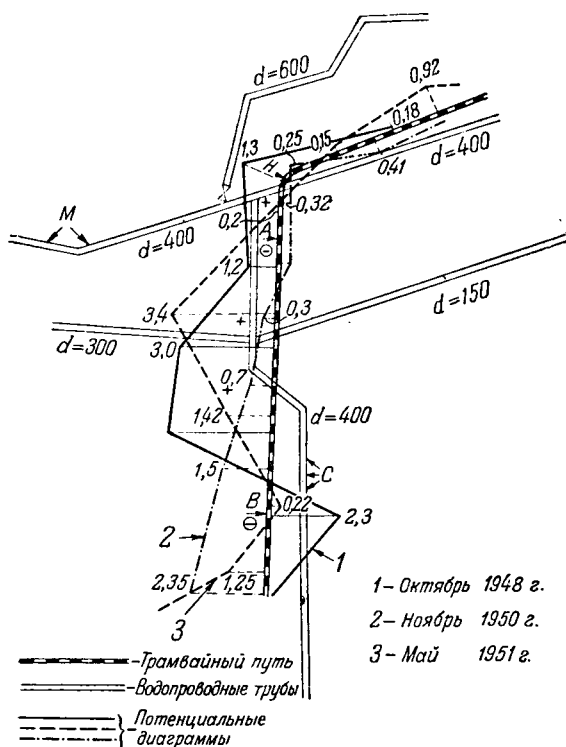


Рис. 1.

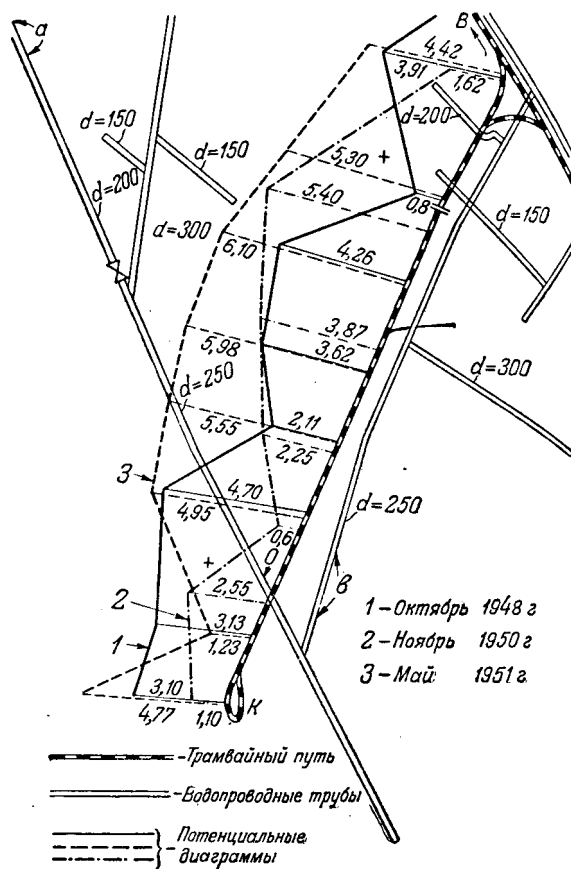


Рис. 2.

Кроме того, при выполнении рекомендуемых Правилами и Техническими условиями норм времени для единичных замеров на каждый километр замеряемого пути требуется 3,7 часа. В условиях большого города с развитой трамвайной сетью составление одной общей потенциаль-

Для иллюстрации выбраны эти участки потому, что на протяжении 1948—1951 гг. на них не производились капитальные ремонты путей и изменения схем питания.

Как видно из рис. 1, в октябре 1948 г. потенциалы у точки отсоса А оказались положитель-

ными, в ноябре 1950 г. — отрицательными и в мае 1951 г. снова положительными; то же и в зоне точки отсоса *B*. Столь резкое различие в знаках и значениях потенциалов дезориентирует руководство трамвайными предприятиями и Водоканала, водопроводные магистрали которого расположены вблизи трамвайных путей (рис. 1). Установить точно места анодных зон на водопроводных трубах, пользуясь приведенными потенциальными диаграммами, нельзя. Между тем статистика аварий от электрокоррозии свидетельствует об их сосредоточении в точках *C* и *M* (рис. 1).

Если авариям в точке *C* можно найти объяснение в том, что вблизи этой точки расположен отсасывающий пункт *B*, то сосредоточения аварий в зоне *M* потенциальные диаграммы не объясняют.

В потенциальных диаграммах рис. 2 вследствие отсутствия отсасывающего пункта на всем участке потенциалы сохраняют общий (положительный) знак, но диаграммы также резко различаются по значениям потенциалов. Статистика аварий на водопроводных магистралях от электрокоррозии свидетельствует об их значительном сосредоточении в пунктах *a* и *b*, чего диаграммы не могут удовлетворительно объяснить.

На рис. 2 приводятся потенциальные диаграммы рельс — земля для улицы, где трамвайные пути и сети за весь период замеров так же, как и в случае рис. 1, не подвергались ремонту, а между тем и здесь наблюдаются большие различия в потенциалах, что опять-таки не позволяет выяснить анодные зоны на водопроводных магистралях, состояние рельсовых соединений и т. д.

Статистический материал по авариям от электрокоррозии показывает сосредоточение аварий на водопроводных магистралях в точке *a* (рис. 2) и незначительное число аварий в зоне *b*. Ближайшая точка отсоса находится на расстоянии трех с лишним километров от кольца трамвайного пути *K*.

2. Предлагаемый для исследования трамвайных путей метод статических диаграмм заключается в следующем. В ночное время, после прекращения трамвайного движения, отключают все питающие линии подстанции (рис. 3), кроме линии, питающей исследуемый участок пути. Одновременно отключаются и все отсасывающие линии, кроме ближайшей к участку.

Вблизи от точки *a* (рис. 3) присоединения к троллею питающей линии, между троллеем и рельсом (ко всем ниткам рельсов) подключается нагрузочное сопротив-

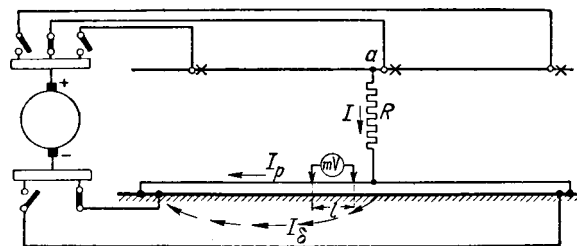


Рис. 3.

ление *R* для создания в троллее тока *I*. Этот ток разветвляется по всем ниткам рельсов, направляясь в сторону включенного отсасывающего пункта. Затем при помощи милливольтметра измеряют падение напряжения на каждом звене всех рельсовых ниток (между стыками), причем постоянный разнос точек приложения милливольтметра обеспечивается конструкцией деревянной штанги с металлическими наконечниками. Измерение ведется в сторону включенного пункта отсоса. По полученным данным определяют ток в каждом рельсе I_p по формуле

$$I_p = \frac{U}{\rho l},$$

где *U* — пересчитанные показания милливольтметра, *v*;

ρ — удельное сопротивление данного типа рельса, *ом·м*;

l — разнос точек приложения металлических наконечников штанги, *м*.

Статическая величина блуждающего тока определяется по формуле

$$I_\delta = I - \sum I_p.$$

Время замера 1 км трамвайного пути — 1 час.

На рис. 4 приведены статические диаграммы, замеренные 31/III и 1/IV 1952 г. на участке трам-

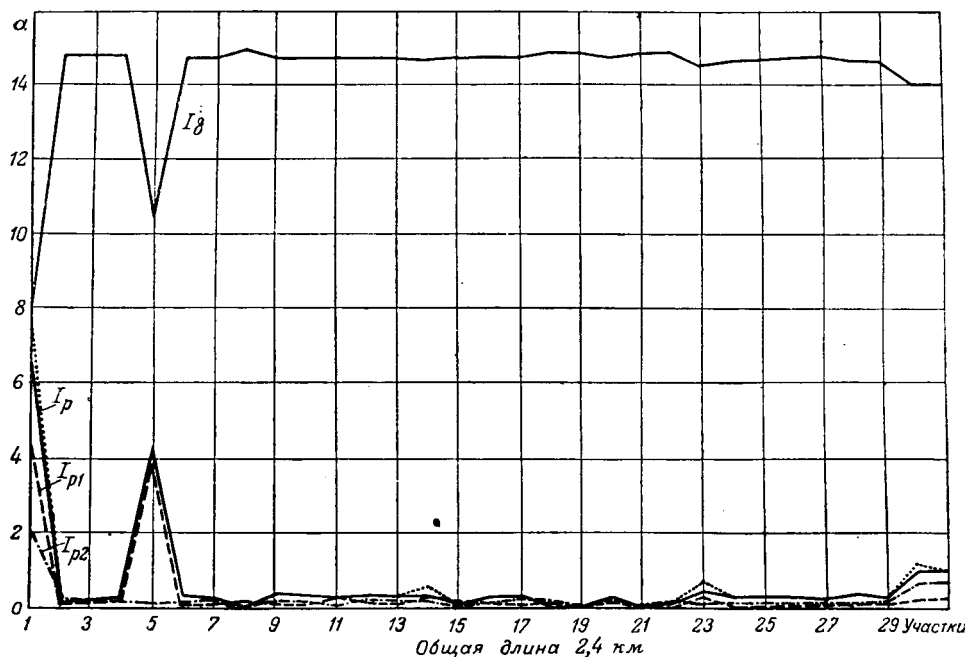


Рис. 4.

¹ Ближайший отсасывающий пункт расположен на расстоянии свыше 3,5 км в сторону *K* трамвайного кольца.

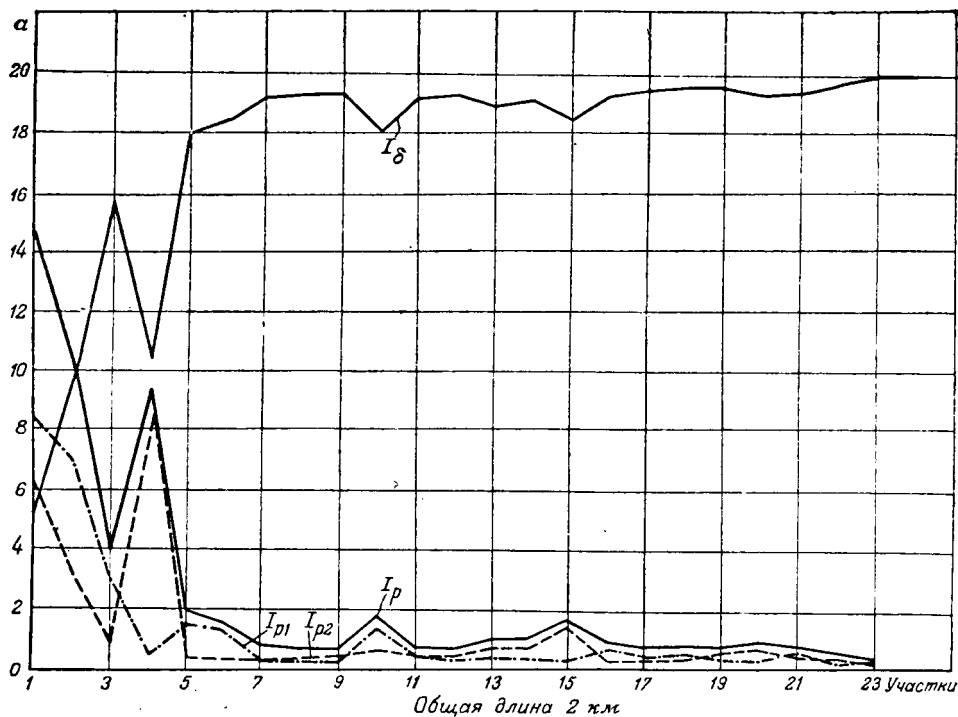


Рис. 5.

вайного пути от пункта *H* (рис. 1). Перед замедрами отсос в точке *A* был отключен, а отсос в точке *B* оставлен. Сопротивление *R* присоединено в точке *H*. Ток *I* составил 15 а. Как видно из диаграммы, ток «обнаружен» только на первом звене рельсов, дальше токи оказались совершенно незначительными и лишь на участке 30 и 31 токи снова несколько повысились.

Анализ диаграмм показывает следующее:

1. Вследствие совершенно неудовлетворительного состояния стыковых соединений трамвайные рельсы не являются обратным проводом для тока.

2. Отсасывающая точка *B* (участок 30 диаграммы) малоэффективна.

3. Проводниками тока являются водопроводные магистрали. Ввиду того, что к точке отсоса *B* возвращается незначительная часть тока, ток в водопроводных магистралях разветвляется в направлении *C*, *M* и др.

4. Усиление тока в рельсах на участке 5 (рис. 4) мы объяснили наличием под рельсами водопроводного ответвления, близко расположенного к подошвам рельсов (что подтвердилось).

На рис. 5 приведены статистические диаграммы, замеренные 19/III 1952 г. на участке трамвайного пути по улице, для которой построены диаграммы на рис. 2. Сопоставляя диаграммы рис. 5 и 2 и имея в виду, что участок 5 диаграммы (рис. 5) соответствует точке *O* водопроводных магистралей (рис. 2), приходим к следующему выводу:

1. Вследствие значительного удаления точки отсоса ток из рельсов возвращается на питающую подстанцию из точки *O* по водопроводной магистрали.

2. На участке приближения указанной выше водопроводной магистрали к питающей подстан-

ции (зона *a*) следует предположить наличие сильно корродирующей анодной зоны, что подтверждается статистикой аварий от электрокоррозии на указанном участке.

3. Вследствие неравномерного распределения токов по ниткам рельсов следует предположить неудовлетворительное состояние рельсовых соединителей².

Заключение. Рекомендуемый Правилами и применяемый метод составления потенциальных диаграмм нуждается в улучшении. Предлагаемые статистические диаграммы блуждающих токов позволяют выяснить: 1) состояние стыковых соединений; 2) состояние рельсовых соединителей; 3) места выхода тока из рельсов и входа тока в рельсы.

Сопоставляя фактическую диаграмму тока в рельсах с теоретической кривой распределения тока в рельсах, которую можно построить для данного участка по известным формулам, если

известна характеристика утечки $a = \sqrt{\frac{r_p}{r_n}}$, где

r_p — продольное сопротивление рельсов, Ом/км;

r_n — переходное сопротивление рельс — земля, Ом·км, можно дать оценку состояния рельсового пути вообще.

Литература

1. Временные технические условия на защиту от коррозии металлических сооружений в г. Москве, Техническое управление Моссовета, 1949.
2. Правила защиты подземных металлических сооружений от коррозии блуждающими токами. Трансжелдориздат (утверждено 3/X 1940 г.).

[24. 5. 1952]

² При вскрытии обнаружилось отсутствие соединителей на всем участке пути.

Гальванический элемент П. Р. Багратиона

Е. Л. НЕМИРОВСКИЙ

110 лет назад, 29 сентября 1843 г., в заседании Физико-математического отделения Петербургской Академии наук академик Б. С. Якоби прочел записку «О батарее постоянного действия князя П. Багратиона» [Л. 1]. Участники заседания с интересом выслушали сообщение об изобретении русского новатора, предложившего оригинальный гальванический элемент.

Чрезвычайно легкая подвижность электролита являлась до Багратиона серьезным недостатком химических источников тока, весьма ограничивавшим область их применения. П. Р. Багратион впервые в мире предложил рациональный способ загущения электролита путем засыпки его какой-либо порошкообразной массой. Этот способ впоследствии получил широкое применение в практике изготовления промышленных элементов.

Петр Романович Багратион, племянник известного героя Отечественной войны 1812 г., родился 6 октября (24 сентября) 1818 г. Получив всестороннее домашнее образование, он определился в школу гвардейских подпрапорщиков и кавалерийских юнкеров, которую успешно закончил в январе 1835 г. 30 декабря 1840 г. Багратион был назначен адъютантом к исполняющему должность начальника инженеров гвардейского корпуса [Л. 2]. К этому времени относятся его первые работы в области только еще зарождавшейся прикладной электрохимии. В начале 40-х годов Багратион заинтересовался изобретенной русским академиком Б. С. Якоби гальванопластикой.

Производя свои первые гальванотехнические опыты, П. Р. Багратион пытался решить проблему электролитического осаждения золота. Впервые гальваническое золочение было осуществлено в 1840 г. преподавателем Петербургской рисовальной школы Ф. Вернером и женеvским профессором де-ля-Ривом. Впоследствии в этой области много работали подполковник корпуса горных инженеров П. И. Евреинов, москвич А. Ф. Греков, петербургский зубной врач Бриан, англичанин Элькингтон, профессор Берлинского ремесленного института Эльснер и др. [Л. 3]. Однако предлагавшиеся многими учеными и практиками рецепты электролитов и технологические режимы в течение длительного времени не могли обеспечить удовлетворительное качество осадка. Журнал «Отечественные записки» утверждал в 1844 г., что при работе по способу де-ля-Рива «золото садится на золотимую вещь очень тонко, неровно, а позолота принимает неприятный зеленоватый цвет» [Л. 4]. Определенные недостатки были присущи и другим способам. Работы виконта де-Рюо, отмеченные специальной премией Парижской академии, по словам тех же «Отечест-

венных записок», ни на шаг не подвинули вперед процесс золочения. Метод петербуржца Бриана, позволявший получать удовлетворительное качество осадков, был весьма протяжен во времени: электролит Бриана нельзя было приготовить скорее, чем в три дня.

Приступая к разработке практического способа электролитического осаждения золота, П. Багратион прежде всего столкнулся с тем обстоятельством, что (как рассказывал впоследствии попечитель Петербургской рисовальной школы К. Х. Рейссиг) «удачное производство золочения зависело... от непрерывного действия батареи, чего достигнуть по известному до сего времени способу было весьма трудно и требовало большого внимания занимающегося золочением, по каковому несовершенству и во многих случаях не удавалось золочение гальваническим способом»¹.

Это обстоятельство и привело П. Р. Багратиона к поискам практичного источника электрической энергии. Работам его в этой области предшествовали многолетние труды ученых и изобретателей разных стран мира.

Первые гальванические элементы были построены в 1800 г. итальянским профессором Алессандро Вольта (1745—1827). Опыты в области химических источников тока проводили английские физики В. Волластон (1776—1828) и В. Крюкшенк (1745—1800). Академик Василий Владимирович Петров (1761—1834) создал в Петербурге крупнейший в мире «вольтов столб» — «огромную наипаче батарею», состоявшую из 4 200 медных и цинковых кружков. В 1812 г. итальянец Джузеппе Замбони (1776—1846) предложил несколько видоизменить вольтов столб. Его батарея состояла из кружков посеребренной (сплав Sn и Zn) и позолоченной (Cu) бумаги, а также из посеребренной бумаги, покрытой с чистой стороны слоем перекиси марганца. Концы столба, составленного из большого количества (до 2 000) таких кружков, получали разноименный заряд. «Столб Замбони» условно может быть назван «сухим» гальваническим элементом. Однако никакого практического применения батарея эта получить не могла в силу незначительности даваемой ею э. д. с. О. Д. Хвольсон на страницах своего всемирно известного «Курса физики» свидетельствует, что заряды, отведенные с концов «столба Замбони», «восстанавливаются довольно медленно». В современной электротехнике под

¹ Цитируется по делу «Об изобретении поручиком князем Багратионом способа золочения гальванически» — Центральный государственный исторический архив в Ленинграде (ЦИИАЛ), ф. 18, оп. 2, д. № 3497, л. 4.

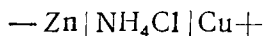
термином сухой гальванический элемент понимают обычно нечто другое, а именно — элемент, в котором электролит превращен в лишнюю подвижности массу каким-либо загустителем.

Весьма важное значение в истории химических источников тока имеют работы академика Бориса Семеновича Якоби (1801—1874), который «впервые правильно объяснил роль электролитов в медноцинковом элементе, предложил замену серной кислоты раствором хлористого аммония и устройство элемента, обеспечивавшее снижение его внутреннего сопротивления» [Л. 5]. Академик А. Н. Фрумкин указывает, что «работы Якоби по источникам тока дали толчок развитию этой области электрохимии в России и привели к появлению ряда оригинальных исследований» [Л. 6].

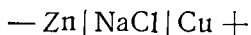
Среди учеников и последователей Б. С. Якоби одним из первых должно быть упомянуто имя Петра Романовича Багратиона — изобретателя сухого (в современном понимании этого термина) гальванического элемента.

Что же представлял собой элемент П. Р. Багратиона? Вот как описывает этот элемент известный в свое время литератор и физик-любитель В. Ф. Одоевский: «Для устройства этой простой и дешевой батареи берут обыкновенный цветочный горшок и наполняют его туго сухой и не слишком жирною землей. В землю эту втыкают медную и цинковую пластинки в некотором расстоянии друг от друга и поливают насыщенным раствором нашатыря, распущенного в воде. Если же есть у кого медные банки Даниельской батареи, то можно их наполнить землею, воткнув в середину цинковую пластинку, но не касаясь меди, и полить раствором поваренной соли, распущенной в воде, которая дешевле нашатыря, а действие производит то же самое» [Л. 7].

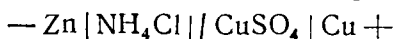
Используя применяемые в настоящее время условные изображения, мы можем представить элемент Багратиона в следующем виде:



или

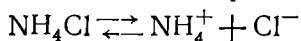


В литературе нередко можно встретить утверждение, что хлористый аммоний (нашатырь) получил применение в химических источниках тока лишь со времени изобретения элемента Лекланше (1867). Мы видим, однако, что этот, едва ли не самый распространенный материал современной элементной промышленности успешно применялся Багратионом еще в 1843 г. Несколько ранее нашатырь был употреблен акад. Б. С. Якоби в его медно-цинковом элементе [Л. 8]:



В основу гальванического элемента Багратиона положены следующие электрохимические процессы.

При соприкосновении с электролитом

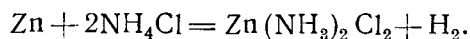


цинковый электрод отдает раствору некоторое количество положительно заряженных ионов Zn^{++}

и при этом получает избыток электронов. На медном электроде благодаря более низкой упругости растворения меди электроны не освобождаются. Между электродами создается определенная разность потенциалов. При соединении обеих пластинок металлическим проводником электроны текут по направлению от цинка к меди.

Катионы цинка, вступая в реакцию с раствором нашатыря, образуют двойную соль $\text{Zn}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2$. На медном электроде происходит разряд катионов водорода H^+ .

Суммарная реакция может быть представлена следующим образом:



Современники весьма высоко ценили достоинства гальванического элемента П. Р. Багратиона. Непременный секретарь Академии, представляя отчет за 1843 г., назвал этот элемент «чрезвычайно замечательным изобретением» [Л. 10]. Сообщения о работах русского новатора были помещены во многих отечественных и иностранных журналах.

10 октября 1843 г. элемент испытывала специальная комиссия, в состав которой входили академик Б. С. Якоби, П. И. Евреинов, К. Х. Рейсиг, Ф. Вернер².

В официальном акте комиссии подчеркивается, что для батарей, составленной из элементов Багратиона, «не требуется (как для батарей Даниеля, которые употреблялись доселе) ни серной кислоты, ни медного купороса, ни сквозных слабо обожженных горшков, которых во всей России нельзя найти нигде, как только на заводе Гинетера». «Батареи Даниеля, — свидетельствовала комиссия, — требуют много рук и посторонних расходов. Всякий день необходимо должно их перемывать, менять кислоту, прибавлять медного купоросу и натирать ртутью цинковые пластины: иначе действие их ослабевает по прошествии одних суток». В противоположность этому, батареи, составленные из сухих гальванических элементов Багратиона «так постоянны, что, будучи однажды устроены, действуют в продолжение нескольких месяцев с одинаковою силою, когда же действие начнет ослабевать, то для возобновления силы стоит только полить землю раствором соли и нашатыря»³.

Аналогичный отзыв находим и в книге В. Ф. Одоевского «Гальанизм в техническом применении». Рассказывая об элементах П. Багратиона, Одоевский пишет: «...для осаждения металлов из их растворов, гальваническим путем, нельзя желать лучшей батареи: ток ее ровен и постоянен; стоит только подливать соляного раствора и действие ее не переменится в продолжение целого месяца и более» [Л. 7].

Сам Багратион объяснял постоянство своих элементов тем обстоятельством, что загуститель электролита — земля «поглощает, подобно всем скажистым телам, пузырьки водорода, которые

² Некоторые сведения о работе комиссии можно найти в Архиве Академии наук СССР (Ленинград). Фонд 187, опись 1, книга 1, листы 482, 485.

³ ЦГИАЛ, ф. 18, оп. 2, д. № 3497, л. 15 об.

покрывают в обыкновенных столбах медную пластинку и останавливают ток». Изобретатель считал, что земля в его элементе в какой-то мере играет роль деполяризатора. Багратион говорил, что «земля... действует точно так же, как сухая перекись свинца в столбе де-ля-Рива» [Л. 9]. Нас, конечно, такое объяснение удовлетворить не может. Вопрос о том, как ослаблялось в элементе Багратиона действие поляризации, это — тема отдельного исследования.

Дешевые, простые и поэтому практичные элементы Багратиона быстро вошли в практику всевозможных электротехнических работ. В феврале 1844 г. «Отечественные записки» сообщили, что «Якоби устроил себе батарею гальваническую из двадцати четырех таких элементов, и она действует уже около шести недель постоянно, почти без всякой перемены» [Л. 9].

В официальном письме генерал-инспектора по инженерной части от 10 октября 1844 г., хранящемся ныне в Центральном государственном историческом архиве в Ленинграде, находим сведения о том, что в течение 1844 г. «батарея Багратиона подвергнута была многообразным и важным испытаниям; она употреблялась для всех надземных и подземных военных опытов, и для гальванических телеграфов»⁴. Следует отметить, что устроенный Б. С. Якоби один из первых в мире электромагнитных телеграфов — между Петербургом и Царским Селом — получал энергию с помощью элементов Багратиона [Л. 11].

С работами русского новатора были знакомы многие иностранные ученые. Шведский химик Иенс Якоб Берцелиус (1779—1848) признал работы Багратиона «важною услугою на поприще электрических изысканий»⁵.

Любопытно отметить, что много лет спустя, в 1895 г., аналогичное изобретение сделал американец Робертс. Журнал «Сайентифик Америкен», сообщая об этом «открытии» в заметке под сенсационным заголовком «Батарея из песка», рассказывал, что Робертс пришел к идее использовать песок в качестве загустителя электролита совершенно случайно. На столе в его лаборатории в Мининаполисе лежала кучка песка и несколько медных и цинковых проволок. Песок был случайно облит кислотой и между проволоками проскочили искры. По словам журнала, «Эдиссон, осмотрев новое изобретение, заявил, что Робертс сделал такое открытие, которое привело его в очень большое изумление» [Л. 12].

Труды П. Р. Багратиона были продолжены многими отечественными и зарубежными электротехниками. Долголетние работы в этой области привели к созданию практичных промышленных образцов химических источников тока. В этой связи должны быть названы имена П. Н. Яблочкова, Н. П. Слугинова, Лекланше, И. Г. Мейдингера, У. Р. Грова, А. Хотинского, А. М. Имшенецкого, Р. А. Бунзена, Д. Печковского, В. Лермантова и мн. др.

Имя Петра Романовича Багратиона в истории

русской науки и техники связывается не только с изобретением оригинального гальванического элемента. Работы в области гальванического золочения привели его к открытию растворения золота, серебра и меди в водных растворах щелочных цианидов [Л. 13]. Это открытие Багратиона заложило основы так называемого цианистого процесса, получившего впоследствии весьма широкое применение в металлургии благородных металлов [Л. 14].

Весной 1844 г. П. Р. Багратион предпринял «очистку кронштадтской гавани от льда гальваническим способом» [Л. 2]. В октябре того же года он был командирован в Германию, Францию и Англию, где в течение нескольких месяцев знакомился с «применением гальванизма к инженерному делу».

В последние годы жизни П. Р. Багратион, будучи назначен тверским губернатором, а затем — лифляндским, курляндским и эстляндским генерал-губернатором, почти полностью отошел от научной деятельности. Умер П. Р. Багратион 29 (17) января 1876 г. [Л. 15, 16].

Литература

1. Б. С. Якоби. О батареях постоянного действия князя П. Багратиона. Bulletin de la classe phisico-mathematique de L'Academie Impériale des Sciences de St.-Petersbourg, v. 2, 188, 1844.
2. Багратион Петр Романович. Русский биографический словарь, т. 11, стр. 398—399, СПб, 1900.
3. Эльснер. Полное руководство к гальваническому как матовому, так и блестящему золочению и серебрению и пр. М., 1844.
4. Золотые растворы подполковника Евреинова и князя Багратиона. Отечественные записки, т. 33, Смесь, стр. 151—152, 1844.
5. А. Н. Фрумкин, А. Д. Обручева. Работы Б. С. Якоби в области химических источников тока. Электричество, стр. 72, № 2, 1953.
6. А. Н. Фрумкин. Из истории электрохимии в России. Успехи химии, т. XXII, стр. 360, № 2, 1953.
7. К. О. (В. Ф. Одоевский). Гальанизм в техническом применении для любителей природы и искусства и для технического употребления, ч. I, СПб, 1844.
8. В. Г. Сочеванов. Гальванические элементы. М.-Л., Госэнергоиздат, 1951.
9. Гальванический столб, постоянно действующий. Отечественные записки, т. 32, Смесь, стр. 65—66, № 2, 1844.
10. Извлечение из отчета по 1-му и 3-му отделениям Академии наук, читанного 29 декабря 1843 г. Журнал Министерства народного просвещения, т. 41, отд. III, стр. 37—38, № 2, 1844.
11. Б. С. Якоби. Электромагнитный телеграф между Санкт-Петербургом и Царским Селом. Журнал Министерства народного просвещения, т. 41, отд. VII, стр. 16, № 1, 1844.
12. Электротехнический вестник, стр. 307, № 22, 1895.
13. П. Р. Багратион. О свойстве цианистого и железистосинеродистого калия растворять металлы. Bulletin de la classe phisico-mathematique de L'Academie Imperiale des Sciences de St.-Petersbourg, v. 2, № 9, 10, Notes, col. 136—138, 1843 (1844).
14. И. Н. Плаксин. О нескольких юбилейных датах химии и технологии цианистого процесса (1890—1940 и 1843—1943). Журнал прикладной химии, т. XIV, вып. 1, стр. 151—154, 1941.
15. См. некрологи П. Р. Багратиона: Русский инвалид, № 15, 1876; Голос, № 18, 1876; Гражданин, № 3, 1876; Домашняя беседа, № 5, 1876; Рижский вестник, № 14, 1876 и мн. др.
16. В. Саитов. Петербургский некрополь, т. 1, стр. 119, СПб, 1912.

⁴ЦИАЛ, ф. 18, оп. 2, д. № 3497, л. 31 об.

⁵ЦИАЛ, ф. 18, оп. 2, д. № 3497, л. 32.

К статье А. П. Щеглова и В. К. Косарева „Опыт внедрения полужамкнутых и замкнутых схем в городскую электросеть“

(Электричество № 8, 1952)

Инж. В. А. КОЗЛОВ

В работе А. П. Щеглова и В. К. Косарева рассматривается назревший вопрос о внедрении замкнутых схем в городские электросети. Однако приходится констатировать, что вместо глубокого рассмотрения вопроса авторы в основном ограничиваются голословными утверждениями.

В настоящей заметке мы считаем необходимым более подробно обосновать положения, высказанные в [Л. 1]. Начнем с некоторого уточнения терминологии.

В отношении полужамкнутых и замкнутых сетей мы придерживаемся определений, содержащихся в «Руководящих указаниях» [Л. 2]. Под ограничено-замкнутой сетью мы понимаем сеть низкого напряжения, выполненную в виде отдельных, изолированных, симметричных фигур в модификациях, разработанных Б. Л. Айзенбергом [Л. 3]. Последнее определение в свое время было введено проф. А. А. Глазуновым [Л. 4]. В дальнейшем будем строго придерживаться этой терминологии.

С целью экономического сравнения ограничено-замкнутых схем с полужамкнутыми рассмотрим конкретный пример сети, приведенный в книге Б. Л. Айзенберга [Л. 3]. В табл. 6 на стр. 93 этой книги даны экономические показатели этой сети для различных вариантов схем.

Как видно из таблицы, полужамкнутая схема требует 43,3 т приведенного цветного металла, а ограничено-замкнутая — 47,6 т. На первый взгляд перерасход металла при переходе от полужамкнутой схемы к ограничено-замкнутой невелик и составляет 9,4%. Однако картина изменится, если рассмотреть более подробные данные расхода цветного металла, приведенные в таблице и заимствованные из [Л. 3].

Наименование элемента сети	Расход цветного металла, т			
	при полужамкну- той схеме		при ограничено- замкнутой схеме	
	медь	свинец	медь	свинец
Внутридомовые магистрали	6,0	—	6,0	—
Кабельная сеть 380 в	9,76	9,74	13,65	10,35
Трансформаторы	3,6	—	3,8	—
Трансформаторные подстан- ции	7,2	—	7,2	—
Сеть среднего напряжения .	4,1	11,6	5,15	14,5
Контрольный кабель	0,88	2,52	—	—
Разделительные пункты низ- кого напряжения	1,24	—	1,24	—
Ячейки распределительных пунктов	0,9	—	0,6	—
Всего	33,68	23,86	37,64	24,85

Таблица показывает, что расход цветного металла на внутридомовые магистрали, трансформаторы, трансформаторные подстанции, разделительные пункты и ячейки распределительных пунктов почти одинаков для обоих вариантов сети. Расход приведенного металла на сеть среднего и низкого напряжения¹ составляет при полужамкнутой схеме 22,4 т, а при ограничено-замкнутой — 28,75 т, т. е. перерасход при переходе от одной схемы к другой равен

28,8%. Анализ других проектов ограничено-замкнутых сетей дает ту же или еще большую цифру перерасхода цветного металла.

Перерасход цветного металла, составляющий 30%, заставляет серьезно задуматься над вопросом об области применения ограничено-замкнутых сетей. Говорить о повсеместном их внедрении без учета ответственности потребителей, плотности нагрузки, вида выполнения сети и других факторов, как это предлагают авторы рассматриваемой статьи и Б. Л. Айзенберг в своей книге [Л. 3], не представляется возможным. Кроме того, надо иметь в виду, что ограничено-замкнутая схема по сравнению с полужамкнутой позволяет повысить надежность электроснабжения только при повреждениях в сети среднего напряжения. Остальные технические показатели этих схем совершенно одинаковы.

В книге Б. Л. Айзенберга [Л. 3] полужамкнутой схемой названа какая-то другая, более совершенная схема, отличающаяся от обычной полужамкнутой схемы наличием сложной релейной защиты, контрольного кабеля и других устройств, которые от полужамкнутой схемы не оставляют и следа. Сравнивая эту более совершенную схему с ограничено-замкнутой, Б. Л. Айзенберг приходит к ложному выводу об экономической нецелесообразности полужамкнутой сети. Такие сравнения кроме вреда ничего не приносят.

Наряду с экономическими имеется и ряд технических затруднений, препятствующих внедрению ограничено-замкнутых схем.

До настоящего времени неизвестна кратность тока, при которой предохранители на напряжение 380 в работают в режиме короткого замыкания, т. е. область избирательной работы этих предохранителей неизвестна. Указа-

ваемая в рассматриваемой статье кратность тока $\frac{I_{кз}}{I_n} < 3,5$

относится к предохранителям 220 в, что следовало бы авторам оговорить. А. П. Щеглов и В. К. Косарев не объясняют также, почему они принимают кратность тока, равную 2,5, а не 4,5, как это указано в [Л. 5].

Принимая в соответствии с [Л. 5] для сетей 220 в кратность тока, равную 4,5, с помощью элементарных расчетов можно установить целую область ограничено-замкнутых сетей, в которых избирательная работа плавких предохранителей из-за малых токов короткого замыкания обеспечиваться не будет ни при каких режимах. Подтвердим это на примере сети низкого напряжения в виде «треугольника» с прилегающими к ней питающими и распределительными сетями среднего напряжения (рис. 1). Параметры² сетей среднего напряжения приняты равными некоторым постоянным средним величинам.

Полученные нами путем расчета значения токов короткого замыкания в сети низкого напряжения при трехфазном коротком замыкании в точке К сети среднего напряжения, при различных параметрах сети 220 в и трансформаторах мощностью 180 кВА приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что при сечении кабеля $3 \times 95 \text{ мм}^2$ избирательная работа плавких предохранителей обеспечивается при длине магистралей не более 400 м, при сечении $3 \times 70 \text{ мм}^2$ — не более 300 м и т. д. Еще хуже обстоит дело с избирательной работой предохранителей в воздушных сетях.

Неизбирательность работы предохранителей в данном случае будет выражаться в том, что предохранители B_1, B_2, B_3, B_4 , установленные для защиты магистралей, будут перегорать раньше, чем предохранитель A_1 , установленный

¹ Контрольный кабель, показанный в таблице, в расчет не принимается, так как полужамкнутая схема при той терминологии, которая нами принята, не требует контрольного кабеля.

² Величины этих параметров очень мало влияют на значения токов короткого замыкания.

для защиты трансформатора. Следовательно, будет иметь место погашение $2/3$ сети низкого напряжения.

Отсутствие подробных характеристик предохранителей не позволяет выполнить исследование данного вопроса в полном объеме. Однако, принимая 4,5 как минимальную кратность тока, при которой предохранители работают в режиме короткого замыкания, можно сделать вывод, что при ограниченно-замкнутых схемах в сетях средних и малых городов, характеризующихся значительными длинами магистралей низкого напряжения и малой мощностью трансформаторов, избирательная работа плавких предохранителей будет обеспечена в очень ограниченном числе случаев. Это дополняет вывод проф. А. А. Глазунова [Л. 4] о нецелесообразности применения ограниченно-замкнутых схем в сетях больших городов.

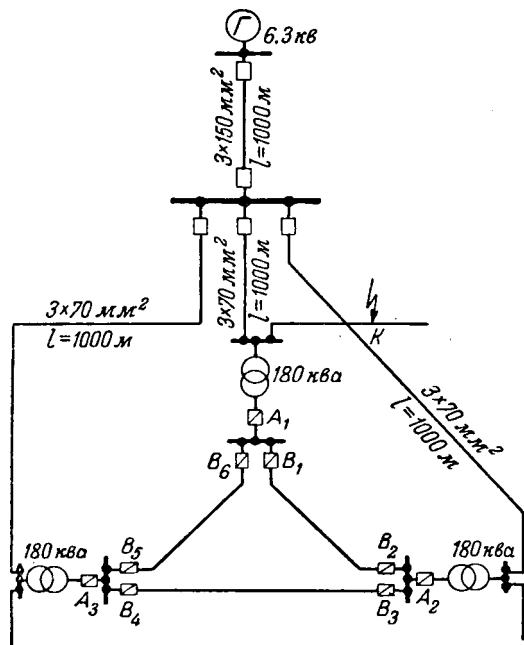


Рис. 1.

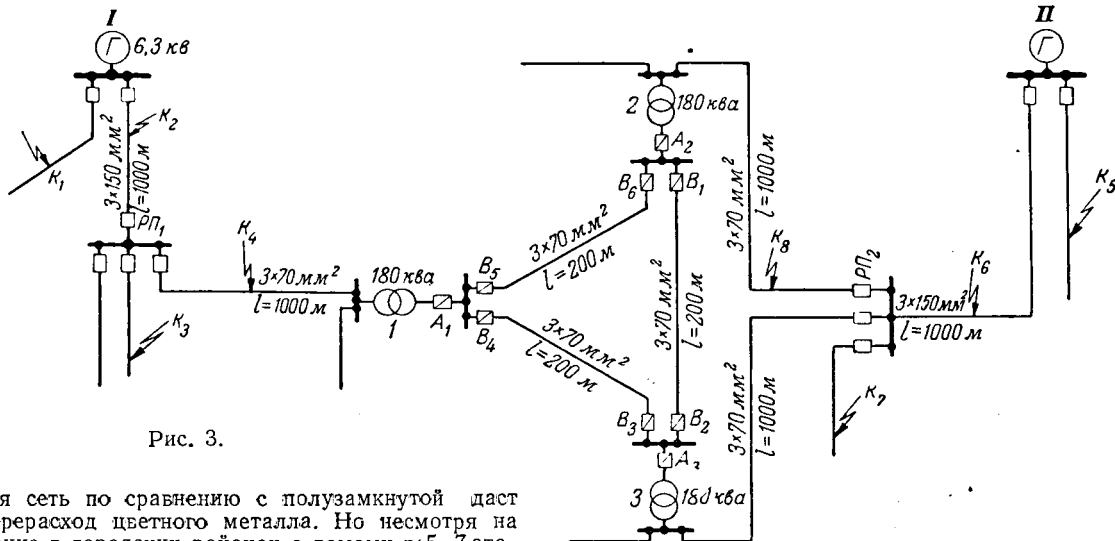


Рис. 3.

Замкнутая сеть по сравнению с полузамкнутой даст некоторый перерасход цветного металла. Но несмотря на это, ее внедрение в городских районах с домами в 5...7 этажей, по нашему мнению, является вполне целесообразным. Однако мы решительно возражаем против упрощений, допускаемых при рассмотрении данного вопроса авторами рассматриваемой статьи. По их мнению, «замкнутая схема в части сети низкого напряжения такая же, как и полузамкнутая». Это совершенно неправильно. А. П. Щеглов и В. К. Косареву следовало бы знать, что полузамкнутая сеть низкого напряжения рассчитывается по условному режиму выхода из работы одного трансформатора, в то время как замкнутая сеть рассчитывается по условию реального выхода из работы всех трансформаторов, связанных

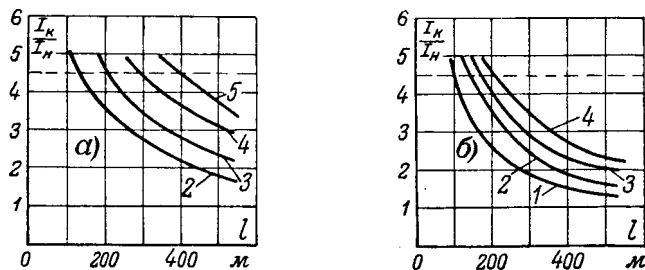


Рис. 2. Зависимость кратности тока короткого замыкания от длины магистрали кабельной (а) и воздушной (б) сети при сечении кабеля или провода: 1— $3 \times 25 \text{ мм}^2$; 2— $3 \times 35 \text{ мм}^2$; 3— $3 \times 50 \text{ мм}^2$; 4— $3 \times 70 \text{ мм}^2$; 5— $3 \times 95 \text{ мм}^2$.

с повредившимся направлением сети среднего напряжения. При замкнутой схеме конфигурация и сечения сети среднего напряжения определяют конфигурацию и сечения сети низкого напряжения. При полузамкнутой схеме такой зависимости не существует.

В рассматриваемой статье неоднократно указывается, что замкнутая схема по расходу кабеля равноценна полузамкнутой и что на каком-то участке сети при переходе от полузамкнутой схемы к замкнутой было даже сэкономлено 15% кабеля среднего напряжения. Для подтверждения этого авторы на рис. 5 своей статьи дают единственный пример сравнения вариантов замкнутой и полузамкнутой схем.

Однако из сопоставления рис. 5а и б рассматриваемой статьи нетрудно установить, что при полузамкнутой схеме одним кабелем среднего напряжения меньше, чем при замкнутой. Следовательно, замкнутая сеть требует для своего осуществления кабелей среднего напряжения на 30% больше, чем полузамкнутая. Таким образом, этот пример доказывает как раз обратное тому, что с его помощью хотят доказать авторы.

Во всех случаях, когда замкнутая сеть питается от двух источников, напряжения которых совпадают по фазе, избирательная работа плавких предохранителей не обеспечивается. Что же касается случая, при котором напряжения источников питания не совпадают по фазе, то в этих условиях говорить о замкнутой схеме вообще не представляется возможным.

Невозможность избирательной работы предохранителей при питании замкнутой сети от двух источников питания, имеющих совпадающие по фазе напряжения, можно подтвердить на простом примере сети, схема которой приведена на рис. 3. Параметры сетей низкого и среднего напряжений приняты по средним данным таким образом, чтобы кратность тока короткого замыкания была более 4,5.

Результаты расчетов схемы рис. 2 показывают, что при трехполюсных замыканиях в точках K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 , K_6 и K_7 сети среднего напряжения предохранитель A_1

трансформатора перегорит через 0,05 сек, в то время как он не должен перегорать, так как перечисленные точки, кроме K_4 , относятся к внешней по отношению к рассматриваемому «треугольнику» сети среднего напряжения. Таким образом, любое внешнее короткое замыкание в сети среднего напряжения любого источника питания длительностью более 0,05 сек будет вызывать неизбежную работу предохранителей в сети низкого напряжения.

При коротком замыкании в точке K_8 предохранитель A_1 трансформатора перегорит через 0,05 сек. Затем после отключения поврежденного кабеля среднего напряжения со стороны распределительного пункта $РП_2$ ток короткого замыкания будет протекать через трансформаторы 2 и 3 и сеть низкого напряжения. Вероятность перегорания предохранителей A_2 и A_3 , B_1 и B_2 будет совершенно одинакова. При перегорании предохранителя A_3 сеть низкого напряжения будет полностью погашена.

Из сказанного следует, что избежать неизбежной работы плавких предохранителей при питании сети низкого напряжения от двух источников невозможно.

Авторы рассматриваемой статьи не отрицают наличия «краевого эффекта» на обоих участках замкнутой сети, имеющих в ЛКС. Но предлагаемый ими «легкий» способ ликвидации краевого эффекта в виде дополнительных связей в сети низкого напряжения может в некоторых случаях поставить под сомнение целесообразность внедрения замкнутой схемы.

В настоящее время следует говорить не о повсеместном внедрении замкнутых сетей, а о внедрении их опытных участков в ряде городов Советского Союза, как это

указано в решении Технического управления быв. Министерства электростанций с тем, чтобы накапливать опыт проектирования и эксплуатации замкнутых сетей. При этом надо не упрощать решение ряда серьезных вопросов, связанных с внедрением замкнутых сетей, а вскрывать встречающиеся трудности, преодолевать их и создавать действительные предпосылки повсеместного внедрения замкнутых схем.

Рассматриваемая статья и работы Б. Л. Айзенберга по данному вопросу носят односторонний характер и не способствуют правильному решению вопросов внедрения замкнутых сетей.

Литература

1. В. А. Козлов. Выступление по статье Ф. Д. Мокрыцкого. Электричество, № 6, 1951.
2. Руководящие указания по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока. Госэнергоиздат, 1940.
3. Б. Л. Айзенберг. Замкнутые электрические сети без сетевых автоматов. Госэнергоиздат, 1948.
4. А. А. Глазунов. Пути развития и реконструкции электрических сетей больших городов Советского Союза. Электричество, № 10, 1949.
5. Д. А. Герман. Ввод в эксплуатацию опытного участка замкнутой городской сети. Материалы Первой всесоюзной сессии по городским электрическим сетям, вып. III, Ленинград, 1948.

Терминология теоретической электротехники

(Электричество, № 1, 1953, стр. 65)

**Кандидат техн. наук,
доц. Б. В. ГРУШЕВСКИЙ**

Донецкий индустриальный институт

Определения основных терминов в области теоретической электротехники должны, очевидно, отражать наши представления о сущности электрических и магнитных явлений.

Мы можем изучить эти явления, установить существование электрических зарядов и электромагнитного поля, недоступных непосредственному восприятию, только в условиях преобразования электромагнитной энергии в другие формы: механическую, тепловую и др.

Общей основой всех электромагнитных процессов, основой всей электротехники является преобразование энергии. Преобразование энергии как важнейшая характеристика всех физических процессов в области микрофизики и микрофизики стало прочным достоянием науки.

В проекте терминологии теоретической электротехники такое представление не нашло достаточно полного отражения. Так, например, некоторые основные величины определяются как «множители», лишенные ясного физического смысла.

Проект терминологии не свободен и от ряда других недостатков. Переходя к рассмотрению отдельных терминов и определений, можно сделать следующие замечания:

1. Исходя из твердо установленного представления о локализации энергии в объеме поля, в определении термина 14 следует добавить: энергия электромагнитного поля, сосредоточенная (локализованная) в объеме поля и состоящая из электрической и магнитной энергии.

2. В определении э. д. с. (44) в целях уточнения физического смысла следует добавить: величина, характеризующая энергию стороннего электрического поля, поступающую в данный контур. Аналогично в определении напряжения (45): величина, характеризующая энергию электрического поля... и т. д. Кроме того, следует сократить термин. Достаточно двух слов:

«электрическое напряжение», так как остальное ясно из определения.

3. Электрическая емкость (38) определяется как свойство проводящих тел накапливать и удерживать электрический заряд.

Пусть два проводящих тела, разделенных диэлектриком, находятся под действием постоянного напряжения и «удерживают» заряды. Достаточно заменить диэлектрик другим диэлектриком и величина заряда каждого тела изменится, т. е. изменится «свойство... накапливать и удерживать электрический заряд». Кому же принадлежит это свойство: проводникам или диэлектрику?

Обратимся к энергии. При некотором напряжении U между проводниками имеем:

$$C = \frac{2}{U^2} W_s.$$

Отсюда следует, что емкость можно понимать как величину, пропорциональную энергии в данном объеме диэлектрика, например в объеме, ограниченном проводящими телами. В последнем (частном) случае можно говорить о свойстве диэлектрика удерживать заряды на проводниках.

Итак, можно предложить следующее определение емкости: величина, характеризующая свойство среды накапливать электрическую энергию и удерживать электрические заряды на проводниках и равная отношению заряда одиночного тела к его потенциалу.

4. Электрическую проницаемость следует отнести к числу основных характеристик среды. В основу определения физического смысла может быть положено соотношение

$$W_s = \frac{\epsilon E^2}{2} V,$$

или

$$\epsilon = \frac{2}{E^2} \cdot \frac{W_s}{V}.$$

Таким образом, получается определение: величина, пропорциональная электрической энергии в единице объема, а также равная отношению вектора электрического смещения к вектору напряженности электрического поля.

5. В основу определения удельного сопротивления (64) положено соотношение

$$\bar{E} = \epsilon \delta,$$

затрудняющее физическое толкование. Между тем удельное сопротивление входит множителем в выражения других величин, имеющих ясный физический смысл. В частности, для постоянного неизменяющегося тока имеем:

$$P = I^2 R = \frac{I^2 \rho l}{S} = \frac{I^2}{S^2} \rho V = \delta^2 \rho V,$$

где V — объем тела; отсюда

$$\rho = \frac{P}{V \delta^2} = \frac{1}{\delta^2} \cdot \frac{P}{V}.$$

Таким образом, получается следующее определение: величина, характеризующая скорость преобразования энергии (ибо P — энергия в секунду) в единице объема среды при наличии электрического тока проводимости и равная отношению мощности, поглощаемой в единице объема к квадрату плотности тока.

Аналогичное определение можно получить для удельной проводимости: величина, характеризующая скорость преобразования энергии в единице объема среды и равная отношению квадрата плотности тока проводимости к мощности, поглощаемой в единице объема.

6. В определениях ряда терминов (35, 62, 111 и др.) смешиваются два понятия: свойство среды, тела и т. д. и величина, характеризующая это свойство.

Термин «проводимость» (35) определяется как «свойство тела..., измеряемое...» и т. д.

Подобное же выражение в определении термина «сопротивление» (62). Здесь возникает ряд возражений. Во-первых, измеряются величины, а не свойства; во-вторых, оба термина плохо увязаны. В самом деле, каждое «свойство», о которых идет речь в определениях — «свойство проводить электрический ток» (35) и «свойство превращать электрическую энергию в тепловую» (62), может характеризоваться как проводимостью (в смысле величины), так и сопротивлением. Именно на этом основано построение эквивалентных схем.

Кроме того, выражение «проводить электрический ток» наводит на мысль о перемещении электрических зарядов, сторонних для среды. Лучше сказать: свойство создавать электрический ток (под действием приложенного напряжения или э. д. с.).

Наконец, оба термина (35 и 62) не могут претендовать на общую характеристику всякого сопротивления и всякой проводимости. Подразумеваются, очевидно, проводимость и сопротивление при постоянном токе. В таком случае целесообразно заменить термины 35 и 62 соответственно следующими:

а) омическая проводимость (проводимость при постоянном токе) — величина, определяемая отношением постоянного неизменяющегося тока в цепи к напряжению на зажимах цепи;

б) омическое сопротивление (сопротивление при постоянном токе) — величина, определяемая отношением напряжения на зажимах цепи постоянного неизменяющегося тока к величине тока.

7. Не выдержана система в определениях сопротивлений. В одних случаях сопротивление определяется как отношение мощности к квадрату тока (62, 139), в других — как отношение напряжения к току (141, 153, 157, 191), затем как функция других сопротивлений (143) и, наконец, как функция частоты и индуктивности (144) или емкости (145).

Все сопротивления, как величины однородные, одной размерности, должны иметь однородные определения. В качестве основных характеристик тока в цепях уместно принять величину тока, напряжение и их составляющие. Отсюда получается возможность определения любого сопротивления как отношения напряжения (или его составляющей) к току. Это не мешает добавлениям, поясняющим физический смысл величины, например, активное сопротив-

ление — величина, определяемая отношением действующего значения активного напряжения к действующему значению тока, а также равная отношению активной мощности к квадрату действующего значения тока. Вторая часть определения говорит о том, что активное сопротивление характеризует преобразование энергии в цепи.

8. Термин «индуктивность» (111) следует определить как величину. Наведение э. д. с. нельзя понимать как свойство цепи, вернее это свойство электромагнитного поля.

9. В определениях некоторых терминов смешиваются такие понятия, как явление и величина. Несомненно, один и тот же термин может относиться и к явлению и к величине. В таком случае нужны два определения термина, например ток (48): 1) явление переноса заряженных частиц... и т. д., 2) величина, определяемая интегралом от вектора плотности тока по данной поверхности.

Кроме того нельзя говорить: «явление..., измеряемое...» и т. д. (48...52). Измеряются не явления, а величины.

10. Термины 48...61, 121, 122 и др. излишне длинны. Следует исключить прилагательное «электрический».

11. Следует сократить термины 147...150, как неудобные для употребления. Целесообразно принять в качестве основных следующие термины: активный ток, реактивный ток, активное напряжение, реактивное напряжение, определенные как составляющие соответственно полного тока и полного напряжения.

12. В определениях, связанных с понятием тока (62, 66, 67, 68, 72, 76 и др.), следует устранить неудачные выражения, производные от «текущий ток», «прохождение тока» и т. д. Подобные выражения недопустимы с точки зрения грамматики и искажают физический смысл. В самом деле «течет», «проходит» и т. п. не ток, а электричество, заряженные частицы (см. определение термина ток — 48).

13. В примечании к определению термина 118 содержится определение постоянного тока как такого тока, значение которого сохраняется неизменным. Такое определение лишает возможности пользоваться установившимися в электротехнике терминами: цепь постоянного тока, машина постоянного тока и т. д., где подразумевается ток неизменного направления. Указанное примечание следует исключить и вместо него добавить термин постоянный ток, определяя его как ток неизменного направления.

14. Под переменным током (120) в широком смысле слова следует понимать ток, изменяющийся с течением времени по величине и направлению.

15. В определении 156 смешиваются три понятия: эквивалентная схема, схема замещения и электрическая цепь, что не одно и то же.

Эквивалентными могут быть или схемы замещения, или структурные схемы. Различные схемы замещения одной и той же электрической цепи могут быть, но могут и не быть эквивалентными. Наконец, схему нельзя называть цепью. Термин 156 следует, очевидно, заменить следующими двумя терминами:

а) структурная схема (электрической цепи) — графическое изображение электрической цепи с указанием ее элементов: источников и преобразователей энергии, аппаратов и соединительных проводов;

б) схема замещения (электрической цепи) — графическое изображение электрической цепи с условными обозначениями ее параметров: сопротивлений или проводимостей и э. д. с.

16. Определение электрической цепи (66) наряду с определениями многополюсников (70 и 71), нельзя признать удачным по следующим причинам.

1) Когда рассматривается часть электрической цепи, не всегда удобно пользоваться терминами двухполюсник, многополюсник и т. д.

2) Выражение «могут протекать электрические токи» неприемлемо в силу соображений, приведенных выше (п. 12).

3) Элементы электрической цепи необязательно трактовать как сопротивления, индуктивности и емкости.

4) Выражения «источник тока» вообще следует избегать, заменяя его более правильным — источник энергии.

В определениях 70 и 71 слова «источники тока» следует заменить словами «э. д. с.» или «источники э. д. с.». Наличие в цепи э. д. с. не означает наличия «источников тока»; например, якорь двигателя постоянного тока — источник э. д. с., но не «источник тока».

На основании сказанного представляется целесообразным внести следующие коррективы.

1) Изменить редакцию определения электрической цепи (66), например: совокупность источников и приемников электрической энергии, соединенных проводниками.

2) Добавить примечание: часть электрической цепи также может называться электрической цепью, когда это не вызывает недоразумений.

3) Термины 70 и 71 заменить более общими, а именно: а) активная цепь — электрическая цепь, содержащая источники э. д. с.; б) пассивная цепь — электрическая цепь, не содержащая источников э. д. с.

Доктор техн. наук, проф. Р. А. ВОРОНОВ

Томский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта

Опубликованный проект является значительным шагом вперед по пути к установлению удобной и ясной терминологии, но в нем имеется так много недостатков, что в качестве окончательной терминологии его, конечно, принять нельзя. Остановимся только на некоторых из них.

Проект включает около 200 терминов, но они не охватывают даже те термины, которые широко используются в теоретических основах электротехники, а не в теоретической электротехнике вообще. Не лучше ли его так и называть: «Терминология теоретических основ электротехники».

В проекте нет очень многих понятий, которые широко используются и правильные толкования которых весьма нужны. Так, например, нет источников и потребителей энергии, векторов и векторных диаграмм, фазовых и линейных величин, вихревых токов, рассеяния, поверхностного эффекта и многого другого. А все эти понятия столь же нужны, как и все другие, помещенные в проекте. Нет даже термина «электротехника», а с него-то и следовало бы начать.

Новых терминов, более удобных, чем применяемые сейчас, в проекте не предлагается, а это было бы очень нужно. Считать за термин целое предложение из шести-восьми слов никак нельзя. Единственно, что дано новое, это отброшена приставка «ди» — в термине «электрическая проницаемость», хотя сам диэлектрик остался без изменения. Введено еще понятие «кулоновское поле», но в том объяснении, которое приведено, это поле должно включать небольшую слагающую электромагнитного поля (вихревого), т. е. уже не будет полностью подчиняться закону Кулона. Зачем-то вместо «вакуума» введена «пустота», хотя до сих пор эти понятия считали различными. Зачем-то опять говорится о «постоянных» цепи, хотя они часто далеко не постоянны. Гораздо удобнее говорить о параметрах цепи, как это обычно и делают.

Объяснения, данные к терминам, часто весьма неполны и вызывают сомнения, а иногда и совсем ошибочны. Какая, например, разница между токами проводимости и конвекции? Судя по объяснению, даже ток, получающийся при переносе заряженных частиц при электрической очистке газов, происходящий из-за воздействия электрического поля, будет током проводимости. Термин «емкость» имеет объяснение, пригодное для уединенного тела, а таких в электротехнике не встречается, о собственной же емкости и о емкости системы двух тел нет ничего. Термин «многополюсник» пояснен как часть цепи, имеющая не менее двух зажимов, но что это за часть цепи с одним зажимом и может ли таковая существовать? Да и вообще лучше многополюсники не объединять с двухполюсниками

Термин «действующее значение» имеет объяснение, верное лишь до тех пор, пока мы забываем о существовании поверхностного эффекта, что и сделано в проекте. Если еще приведенное объяснение при этом может быть отнесено к току, то для напряжения или э. д. с. оно вообще уже не подходит. В объяснении некоторых терминов говорится об источнике тока, причем подразумевается не источник, дающий определенный ток, а обычный источник напряжения. Следовало бы тогда пояснить и этот термин с такой точки зрения.

Ряд терминов непонятен. Так, какая разница между «диэлектриком» и «изолятором»? Из пояснений следует, что изолятор — это плохой диэлектрик, так как он может частично проводить электричество. К тому же «изолятором» называют детали электрической цепи не иногда, а всегда, так как других наименований для этих частей нам не известно. Почему двухфазная система должна иметь угол сдвига только в 90° ? А какой же системой будут две э. д. с. со сдвигом на другой угол? Объяснение термина «эквивалентная схема, схема замещения» пригодно лишь к простому эквивалентному сопротивлению, а не для схем.

Есть и ошибочные термины. Нельзя говорить об уравновешенной многофазной системе, так как может быть только уравновешенный режим цепи, системы же напряжений и токов никак не уравновешиваются. Неверны и такие термины, как «свободный апериодический ток» и «постоянная времени контура», так как следует говорить об апериодической составляющей (а их может быть несколько) и о постоянной времени для составляющей.

Некоторые объяснения терминов вообще ошибочны. Так, «феррорезонанс» имеет объяснение, которое ничего не объясняет и пригодно лишь для последовательного соединения, да и то не всегда. При параллельном соединении в обычных условиях вообще не может быть неустойчивого состояния и скачка. Кроме того, может быть «катушка» со стальным сердечником, а не «индуктивность».

Очень многие термины имеют пояснения лишь как результат математических действий. Неужели о магнитной проницаемости или удельной проводимости ничего нельзя сказать, кроме как «множитель, стоящий при... в выражении для...»? Или для реактивного сопротивления, кроме как «корень квадратный из разности квадратов...». Эх, ведь не их пояснение, а указание пути, по которому может быть найдено их числовое значение.

Некоторые термины излишни. Совершенно ненужными терминами являются «непериодический ток» или «несимметричная многофазная цепь», являющиеся противоположностями для уже имеющихся терминов без приставки «не—». Лишним является и термин «трехфазная симметричная система», являющийся частным случаем общего термина для многофазной системы.

Термин «симметричные составляющие» отнесен к многофазной системе вообще, а пояснение дано как для трехфазной. В таких случаях следует что-то изменить: или термин, или объяснение.

Можно привести еще ряд замечаний. Но ограничимся пока следующим резюме: 1) надо переработать проект, дополнив его терминами так, чтобы он был полным хотя бы для теоретических основ электротехники; 2) термины следует давать краткими, а не в виде длинных фраз; остальное следует считать уже пояснениями к терминам; 3) все пояснения должны даваться так, чтобы была ясна физическая сторона термина, а не только математическое действие; 4) в пояснениях к терминам не должно быть неточностей и неправильностей. Пояснения должны быть возможно более четкими и ясными.

При выполнении этих условий можно принять проект за основу для окончательной редакции терминологии.

МНОГОКРАТНАЯ НАПЛАВКА МАШИННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Возможность многократной наплавки позволяет получить значительные выгоды. Лаборатория сварки ЛИИВТ провела специальное исследование с целью изучения влияния неоднократных наплавов на остаточные (внутренние) напряжения и структурные изменения металла вала или детали.

В результате исследований получены следующие выводы, указанные автором статьи. Судовой вал или другая машинная деталь может наплавляться сколько угодно раз без ухудшения качества металла детали при соблюдении некоторых условий, а именно: 1. Наплавка должна производиться только качественными электродами типа Э-42 по ГОСТ 2523-51. 2. Перед новой наплавкой слой старой наплавки, если она была выполнена электродами Э-34 по ГОСТ 2523-51 или электродами неизвестного происхождения, должен быть удален. 3. Каждый раз перед наплавкой вал должен быть подогрет до температуры 180...200°С. 4. Наплавку могут производить только сварщики с дипломом 1, 2 или 3 степени.

При соблюдении этих основных условий отжиг вала после наплавки не производится.

(„Речной транспорт“, № 2, 1953, А. М. Богданова)

ШАГАЮЩАЯ ЗЕМЛЕСОСНАЯ УСТАНОВКА

Перемещение сухопутных землесосных установок очень трудоемкая операция. Авторы статьи разработали новую конструкцию землесосной установки, передвигающейся на шагающем ходу. Шагающий механизм позволяет, не прерывая работу по фазыву породы и гидротранспорту, производить передвижку землесоса даже на слабых грунтах.

Для землесоса принят электродвигатель мощностью 320 кВт при 750 об/мин; механизм передвижения приводится в действие электродвигателем мощностью в 7 кВт при 1440 об/мин.

Включение электродвигателей производится при помощи кнопок с общего пульта управления. При работе зажигаются сигнальные лампочки — зеленая при вращении электродвигателя в одну сторону и красная при вращении в другую.

Для освещения забоя на крыше установки смонтировано два прожектора.

Производительность шагающей землесосной установки — 1 200 м³/час.

Статья содержит описание устройства механической части конструкции и результаты испытаний.

Использование шагающих электрифицированных землесосных установок повышает производительность работ.

(„Механизация трудоемких и тяжелых работ“, № 2, стр. 29, 1953, О. В. Водопьянов, Г. П. Давидяц)

34 РУБЕЖОМ

АМПЛИТУДНЫЙ КАТОДНЫЙ АНАЛИЗАТОР (Обзор)

Амплитудные селекторы импульсов тока являются одним из существенных элементов современной электроизмерительной и контрольной аппаратуры, применяемой как в научно-исследовательской работе, так и для решения ряда прикладных задач. В этих устройствах пользовались до последнего времени преимущественно дифференциальными амплитудными анализаторами, построенными на электронных лампах или тиратронах [Л. 2], несмотря на то, что катодные амплитудные анализаторы [Л. 1], описываемые в настоящем обзоре, значительно более просты в изготовлении, наладке и последующей эксплуатации.

Широкое внедрение катодных амплитудных анализаторов в электроизмерительную аппаратуру тормозилось в течение длительного промежутка времени относительно малой популярностью этих устройств среди инженеров-электриков, обусловленной в первую очередь господствовавшим длительное время мнением о чрезмерной сложности катодных коммутаторов и экспериментальной техники, основанной на их применении. Это мнение преобладало в течение длительного промежутка времени, несмотря на то, что метод амплитудной селекции был предложен [Л. 1] и экспериментально проверен впервые в Советском Союзе, а также несмотря на то, что в Советском Союзе более 15 лет назад были созданы портативные, простые, надежные в работе конструкции катодных коммутаторов [Л. 3, 4].

Опыт успешного применения амплитудной катодной селекции в экспериментальной и прикладной электроизмерительной аппаратуре и в том числе в амплитудных анализаторах спектров энергии быстрых элементарных частиц способствовал широкому признанию рассматриваемого метода.

Катодная амплитудная селекция возникла как один из методов селекции (отбора) сигналов в телемеханических и автоматических установках [Л. 1, 3]. Этот метод отбора электрических сигналов основан на использовании катодного коммутатора, отклоняемый пучок электронов которого замыкает ту или иную ламель в зависимости от амплитудного значения тока отбираемого сигнала. Действие подобного устройства, обладающего одной степенью свободы, показано на принципиальной схеме рис. 1.

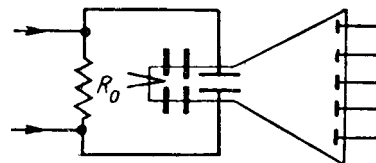


Рис. 1.

Приходящие и анализируемые импульсы тока поступают на отклоняющие пластины коммутатора. Сопротивление R_0 определяет отклонение пучка электронов замыкающего ламель коммутатора. Для предотвращения замыкания электронным пучком промежуточных ламелей целесообразно подобрать такой режим работы катодного коммутатора, при котором пучок электронов все время заперт и отклоняется лишь при амплитудном значении отбираемого сигнала кратковременным импульсом напряжения, подаваемым на управляющий электрод коммутатора от специального устройства.

На рис. 2 показана принципиальная схема амплитудного катодного анализатора с магнитным отклонением пучка электронов катодного коммутатора. Такая схема пригодна, в частности, для целей автоматического контроля или сортировки изделий по их линейным размерам, в случае использования в качестве индикатора I датчика линейных размеров, или для автоматического отбора изделий по их электрическому сопротивлению при включении объекта измерений в плечо моста вместо индикатора I .

Для целей двухпозиционного контроля (отбора по двум признакам) может быть использован катодный коммутатор с двухмерным расположением ламелей, принципиальная схема которого показана на рис. 3. Контролируемые импульсы тока поступают на этот коммутатор из двух каналов, к которым подключаются соответственно

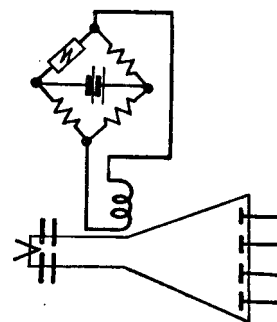


Рис. 2.

сопротивления R_1 и R_2 . На ламели подключаются исполнительные цепи [Л. 1].

Применение амплитудной селекции оказывается оправданным [Л. 1, 3] в тех случаях, когда селекторное устройство связано с генератором отбираемых импульсов при помощи надежного проводного канала связи, гарантированного от значительных колебаний сопротивления. Именно поэтому амплитудные катодные селекторы не нашли значительного применения в телемеханических и автоматических установках с длинными проводными, а также иными каналами связи и используются преимущественно в качестве амплитудных анализаторов. Решающим фактором, определяющим целесообразность использования катодных амплитудных анализаторов в конкретных задачах, является воз-

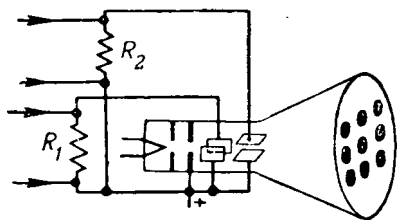


Рис. 3.

можность получения простых и надежных в работе катодных коммутаторов. Одним из удачных решений этой проблемы являлась успешная разработка катодных коммутаторов с малорасходящимися пучками, ускоряемыми в однородных полях.

На рис. 4 показана принципиальная схема электронной пушки, используемой для получения круглого пучка из электронов, эмиттируемых точечным катодом 1 и ускоряемых затем однородным электрическим полем, получающимся между плоскими параллельными анодом 2 и управляющим электродом 3. При точечном катоде и небольшом круглом отверстии в аноде диаметром порядка 0,5...0,8 мм, расстоянии между электродами 2 и 3 около 10 мм и при анодном напряжении порядка нескольких сот вольт получается малорасходящийся пучок, телесный угол которого в этих условиях обычно колеблется в пределах 1...1,5°. Дальнейшее сокращение угла расхождения пучка электронов достигается за счет использования диафрагм с малыми круглыми отверстиями, расположенными за анодом по ходу электронов пучка. На рис. 5 приведена типичная

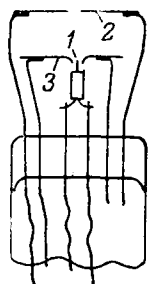


Рис. 4.

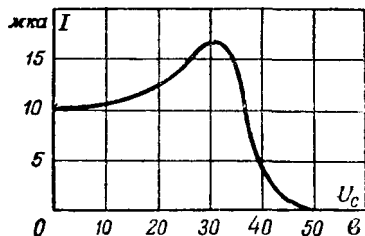


Рис. 5.

характеристика зависимости тока пучка I , генерируемого этой пушкой, от величины напряжения управляющего электрода по отношению к накаленному катоду.

Небезинтересно отметить, что условия концентрации пучка электронов, ускоряемых в однородном поле, относительно мало зависят от величины анодного напряжения. Последняя особенность выгодно отличает эти системы в отношении устойчивости по отношению к режиму работы источников питания от систем коммутаторов, имеющих более сложные электронно-оптические системы. Помимо осуществления катодных коммутаторов с круглыми пучками электронов, предназначенных для двухпозиционной селекции, нами была показана возможность [Л. 3, 4] получения плоских пучков ускорением образующих их электронов в однородных полях. Такое решение позволило осуществить простую конструкцию катодного коммутатора с одномерной разверткой пучка; основным преимуществом

коммутаторов одномерной развертки с плоскими пучками электронов является возможность повышения тока пучка за счет его расширения в направлении, перпендикулярном плоскости качания пучка при относительно небольшом изменении плотности электронного тока в пучке.

Эта особенность катодных коммутаторов одномерной развертки позволила применить простые, надежно работающие катодные коммутаторы, дающие значительный ток при относительно невысоком анодном напряжении. Такие катодные коммутаторы плоских пучков нашли применение в современной электроизмерительной аппаратуре.

На рис. 6 показана принципиальная схема упрощенной электронной оптики, служащей для получения плоских пучков электронов, ускорением их в однородном поле [Л. 3, 4]. В этой системе нить катода непосредственного накала расположена в щели плоского управляющего электрода. В плоском аноде также сделана щель, параллельная щели в управляющем электроде.

На рис. 7 приведена типичная характеристика зависимости тока круглого пучка коммутатора от напряжения на его управляющем электроде (относительно катода). Для сравнения приведем некоторые параметры одного из катодных коммутаторов с плоским малорасходящимся пучком. При расстоянии между управляющим электродом и анодом, равном 10 мм, размером 0,5 × 5 мм и анодном напряжении около 600 в ток пучка оказался порядка 1 мА, т. е. раз в 50 большим, чем в аналогичном коммутаторе с круглым пучком.

Размеры поперечного сечения пучка электронов на экране, расположенном на расстоянии 50 мм от анода,

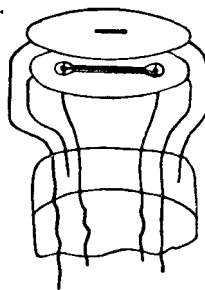


Рис. 6.

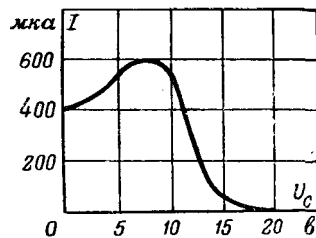


Рис. 7.

получились примерно 3 × 8 мм. Видимые размеры пятна на экране оказались относительно малозависящими от колебаний анодного напряжения в довольно широких пределах. Дальнейшее сужение пучка электронов в направлении его качания достигается при помощи одной или двух щелевых диафрагм, устанавливаемых за анодом по ходу электронов пучка.

Применение амплитудных катодных анализаторов позволяет отказаться от использования в электроизмерительной аппаратуре дифференциальных амплитудных анализаторов, построенных на электронных лампах и тиратронах как в простых контрольно-измерительных устройствах, так и в сложной экспериментальной аппаратуре [Л. 2, 5]. Так в частности, хорошие результаты дают амплитудные катодные анализаторы для селекции импульсов тока, даваемых ионизационными камерами [Л. 3—8]. Применение амплитудного катодного селектора позволяет значительно упростить счетные устройства и повысить быстроту их работы. Ваткинс [Л. 5], описавший одну из конструкций счетной установки с десятипозиционной амплитудным катодным селектором, указывает, что аналогичное устройство, построенное на электронных лампах, имело бы 168 ламп.

Здесь уместно отметить, что замена дифференциальных амплитудных анализаторов амплитудными катодными селекторами позволяет получить не только большую надежность и устойчивость работы электроизмерительных установок, но и повысить одновременно их разрешающую силу.

Небезинтересно отметить, что установки, служащие для одновременного наблюдения нескольких процессов на экране одного электронного осциллографа при помощи катодного коммутатора, могут быть дополнены автоматическим счетным устройством, регистрирующим одновременно амплитуды импульсов напряжения, поступающих из контролируемых цепей.

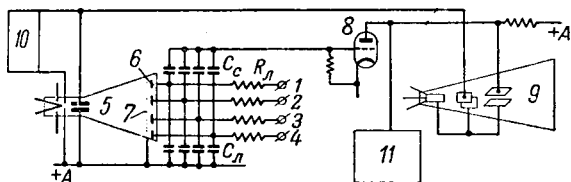


Рис. 8.

На рис. 8 показана схема установки, используемой для одновременного наблюдения значений ряда величин, характеризующих напряжениями, снимаемыми с точек 1, 2, 3, 4. Как видно из схемы, катодный коммутатор 5 соединен эвонными ламелями 6 (поверхность которых обладает коэффициентом вторично-электронной эмиссии, большим единицы) с контролируемыми точками через большие сопротивления R_d . Ламели шунтируются малыми емкостями C_d порядка сотен сантиметров. При периодическом замыкании ламели пучком электронов емкость C_d разряжается вторично-электронным током на сетчатый анод 7, а в паузы между замыканиями относительно медленно заряжается через сопротивление R_d . Импульсы напряжения, получающиеся в момент разрядки конденсаторов, проходят последовательно через малые емкости C_c ($C_c \ll C_d$) на сетку усилительной лампы 8, откуда они попадают на пластины вертикального отклонения осциллографической трубки 9. Горизонтальная развертка пучка электронов этой трубки осуществляется пилообразным напряжением, даваемым тем же генератором 10, который дает напряжение для развертки пучка электронов катодного коммутатора 5. Благодаря этому движение пучка электронов обеих электронно-лучевых трубок оказывается синхронным и места отсчета напряжений контролируемых точек жестко фиксированными. Амплитуды импульсов при подходящем подборе величин параметров R_d , C_d и C_c оказываются прямо пропорциональными напряжениям контролируемых точек.

Соединяя с усилителем 8 также амплитудный катодный анализатор 11, распределяющий эти импульсы по группам и затем подсчитывающий их, мы получим возможность регистрировать еще один критерий электрического состояния исследуемой системы.

Литература

1. А. А. Солодовников. Основы автоматики и телемеханики. КУБУЧ, Ленинград, 1935.
2. А. М. Бонч-Бруевич. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. ГТТИ, 1951.
3. Л. А. Гончарский. Автоматика и телемеханика, т. 1, стр. 27, № 3, 1936.
4. Л. А. Гончарский. Журнал технической физики, т. 8, стр. 530, № 16, 1938.
5. D. A. Watkins. Rev. Sc. Instrum. т. 20, стр. 245, № 7, 1949.
6. W. E. Glenn. Nucleonics, т. 7, стр. 50, № 6, 1949.
7. W. E. Glenn. Nucleonics, т. 9, стр. 24, № 6, 1951.
8. M. Langevin et G. Alart. Com. Rend. Acad. Sciens (Paris), т. 234, стр. 515, №5 1952.

Кандидат техн. наук, доц. Л. А. ГОНЧАРСКИЙ

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ЗАЖИГАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Люминесцентные лампы мгновенного включения в противоположность лампам с подогревными катодами зажигаются без предварительного нагрева катодов при достаточно высоком напряжении, создаваемом специальным автотрансформатором.

Минимальное значение напряжения зажигания определяется конструктивными особенностями лампы. Однако такие факторы, как наличие заземления, температура внешней среды, влажность окружающего воздуха, могут потребовать при определенных условиях значительного повышения напряжения, необходимого для зажигания лампы.

Для выяснения влияния влажности окружающего воздуха на зажигание люминесцентных ламп были проведены

исследования с лампами мгновенного включения мощностью 40 вт типа 48Т12. Длина таких ламп составляет 1220 мм, диаметр — 38 мм. На рис. 1 показана схема включения одной лампы, помещенной в заземленной armature. При включении лампы полное напряжение действует как между электродами, так и между armатурой и незаземленным электродом на некотором промежутке d . В случае нормальной влажности при напряжении примерно 135 в на незаземленном электроде возникает кистевой разряд. При дальнейшем повышении напряжения разряд расширяется и примерно при 185 в достигает заземленного электрода. Для получения стабильного дугового разряда между электродами требуется напряжение 250...300 в. При

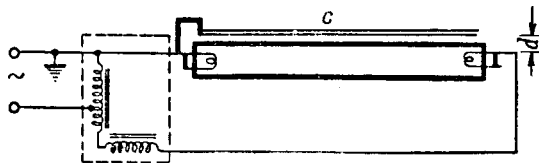


Рис. 1. Схема включения лампы мгновенного зажигания.

c — заземленная armатура; d — расстояние между заземленной armатурой и незаземленным электродом.

отсутствии armатуры, или если armатура не заземлена, первый кистевой разряд возникает лишь при 185...300 в, а напряжение зажигания стабильной дуги повышается примерно на 10%.

В специальной камере искусственного климата были проведены испытания ряда ламп при различных температурах и значениях влажности. На рис. 2 показаны результаты этих испытаний, из которых видно, что с ростом влажности значительно повышается напряжение зажигания лампы.

Влияние влажности на напряжение зажигания можно объяснить возникновением тонкой водяной пленки на поверхности лампы, что в свою очередь приводит к изменению поверхностного сопротивления трубки между цоколями. При тщательных исследованиях в камере искусствен-

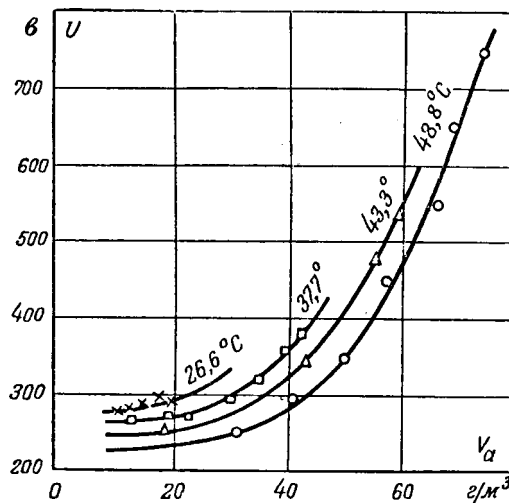


Рис. 2. Зависимость напряжения зажигания лампы 48Т12 от влажности, выраженной в г/м³, при различной температуре окружающего воздуха.

ного климата было обнаружено, что напряжение зажигания повышается лишь в определенном интервале поверхностных сопротивлений от 10 до 10 000 мгом. При сопротивлениях, меньших 10 мгом и больших 10 000 мгом, напряжение зажигания сохраняется в пределах 300 в (рис. 3, кривая А).

Для проверки этих результатов была изготовлена специальная опытная лампа, которая позволила провести аналогичные эксперименты без использования камеры искусственного климата.

Опытная лампа представляла собой обычную лампу, на которую на достаточно близком расстоянии друг от

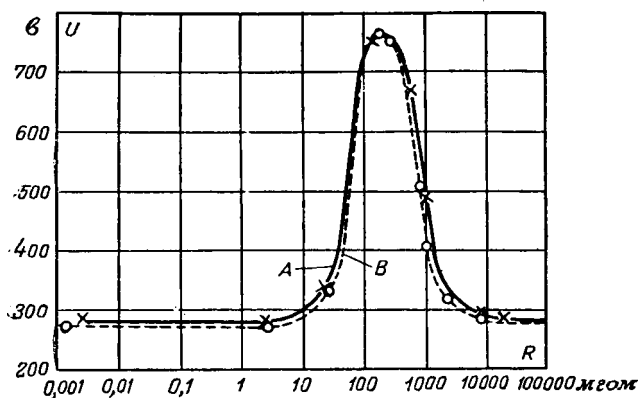


Рис. 3.

друга были укреплены металлические кольца, выполненные из тонкой фольги. Между отдельными кольцами можно было включать любое сопротивление, имитирующее поверхностное сопротивление данного участка лампы. На рис. 4 изображена схема включения опытной лампы. Результаты испытания такой лампы показаны на рис. 3 (кривая В). Достаточно хорошее совпадение кривых А и В подтверждает высказанное предположение о том, что влияние влажности заключается в изменении поверхностного сопротивления лампы. Это можно объяснить следующим образом.

Под действием приложенного к лампе напряжения от одного электрода к другому через крайние кольца вдоль поверхности трубки протекает емкостный ток. В зависимости от поверхностного сопротивления лампы этот ток создает различное падение напряжения по поверхности трубки. Вдоль большей части длины лампы напряжение между соседними кольцами распределяется приблизительно равномерно и лишь на концах лампы оно несколько уменьшается. Так, например, при наличии 30 колец и напряжении зажигания 300 в напряжение между соседними кольцами на концах лампы составляет примерно 0,5 в и достигает 4 в в центральной части. При этом напряжение между каждым из электродов и крайним кольцом равно 100...120 в.

Опыты показали, что при изменении сопротивления R от нуля до бесконечности и постоянном значении $r = 100\,000\text{ ом}$ (рис. 4) напряжение зажигания соответственно уменьшается от 1800 до 300 в. При этом изменяется падение напряжения вдоль лампы, а напряжение между крайним кольцом и электродом сохраняется в пределах 100...120 в. Следовательно, можно заключить, что последнее положение является необходимым условием для зажигания лампы.

Емкостный ток составляет примерно 10^{-6} а и при малых поверхностных сопротивлениях до 10 мгом создает падение напряжения вдоль поверхности лампы лишь в несколько вольт. Таким образом, почти все напряжение практически распределяется между сопротивлениями R . Так как для обеспечения зажигания лампы падение напряжения на сопротивлениях R должно быть равно 100...120 в, то лампа надежно зажигается при напряжении 250...300 в.

При увеличении поверхностного сопротивления до определенного предела растет падение напряжения вдоль поверхности трубки за счет емкостных токов и, следовательно, для обеспечения необходимых 100...120 в между электродом и крайним кольцом, требуется повышенное напряжение зажигания.

При поверхностных сопротивлениях, значительно превышающих емкостное сопротивление между поверхностью

лампы и заземленной арматурой, т. е. больших 500 мгом, все напряжение практически ложится между нами, и напряжение зажигания — уменьшается до 250...300 в.

Таким образом, выяснилось, что зажигание лампы зависит от распределения падений напряжения вдоль поверхности трубки за счет емкостных токов утечки.

В лампах со вспомогательными электродами также наблюдается влияние влажности на напряжение зажигания. Если при нормальных условиях такая лампа зажигается при 125 в, то при повышенной влажности напряжение зажигания повышается до 300...450 в.

Для устранения влияния влажности на напряжение зажигания ламп необходимо обеспечить постоянство поверхностного сопротивления при любой влажности. Это можно достигнуть двумя путями.

Во-первых, посредством покрытия поверхности лампы прозрачным проводящим слоем, который имеет сопротивление, меньшее 10 мгом. В этом случае вопрос заключается лишь в выборе подходящего для этой цели материала, который имел бы достаточно большой коэффициент пропускания света. Того же эффекта можно достигнуть введением внутрь лампы проводящей полоски, концы которой расположены достаточно близко к электродам. Как показывает опыт, напряжение зажигания такой лампы не зависит от влажности окружающей среды.

Второй путь состоит в изоляции поверхности трубки от влаги и сохранении, таким образом, поверхностного сопротивления в пределах 10 000 мгом. Сопротивление, большее 1 000 мгом, можно получить путем специальных несмачиваемых силиконовых покрытий. На такой поверхности влага не может образовать сплошную пленку, а собирается в виде многочисленных отдельных капелек, изолированных друг от друга. Если при нормальной влажности такая лампа зажигается от 275 в, то при 100% влажности напряжение зажигания составляет меньше 300 в.

Силиконовые покрытия достаточно прозрачны и стойки к механическим воздействиям. Загрязнение поверхности такой лампы ведет лишь к незначительному повышению напряжения зажигания.

(R. H. Mc Farland and J. C. Sargent, Illum. Eng., т. 4, 1950. R. H. Mc Farland, Illum. Eng., т. 46, 1951. W. Mathis, Bull. ASE., № 25, 1952)

Инж. Н. Г. ПЕТРОВА

РАДИОПОМЕХИ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ ЛИНИЯМИ ПЕРЕДАЧИ

В обычной лабораторной практике радиочастотные напряжения измеряются между проводом и землей в микровольтах посредством прямой емкостной связи измерительного прибора с проводом, вызывающим радиопомеху. Помехи радиоприему вызываются наличием связи между приемной антенной через пространство непосредственно с высоковольтной линией или посредством связи через промежуточное звено в виде низковольтной распределительной сети. Амплитуда мешающего поля, обычно измеряемого в микровольтах на метр, как показывают авторы, не может быть определена по высокочастотному напряжению, измеренному между проводами и землей той линией, к которой подключено оборудование, являющееся источником радиопомех. Вследствие отсутствия норм на радиопомехи автором был выбран произвольный предельно-допустимый уровень силы поля в сухую погоду — 15 мкв/м на расстоянии 60 м от линии. В плохую погоду поле помех увеличивалось в 10...50 раз, но еще оставалось достаточно низким и не вызывало жалоб на радиопомехи. Расстояние в 60 м было выбрано потому, что оно больше предельного расстояния, на котором еще отмечается влияние электростатического поля провода.

Результаты лабораторных испытаний. К некоронирующему проводу подсоединялось 5 гирлянд из 16 стандартных тарелочных изоляторов (254 × 146 мм). Гирлянды снабжались обычным и некоронирующим линейным зажимом. Высокочастотное напряжение, измеренное на проводе посредством емкостной связи, оказалось практически одинаковым при подключении как одной гирлянды, так и

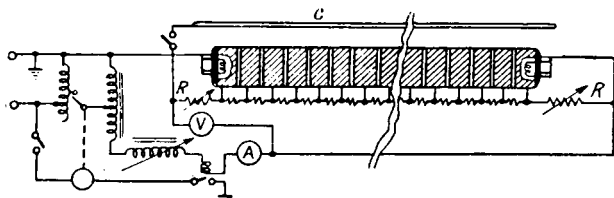


Рис. 4.

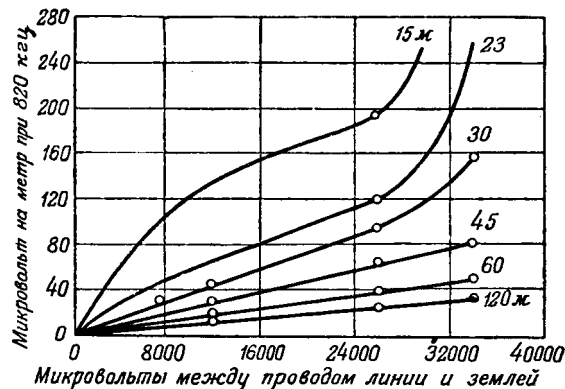
ости, включенных параллельно при обычном и при некотором напряжении. Высокочастотные напряжения появляются при 80 кВ эфф. При 127 кВ, соответствующем фазному напряжению линии 220 кВ, генерируется напряжение помех около 1000 мкВ на частоте 1000 кГц.

Опыты по изучению влияния искусственного дождя на высокочастотные напряжения, создаваемые короткой гладкой трубкой диаметром 25 мм, показали, что на влажном проводнике высокочастотное напряжение в 30..50 раз больше, чем на сухом.

На мокром проводнике генерируются во много раз большие высокочастотные напряжения, чем на сухом, даже при тех напряжениях, которые создают на сухом проводнике пучковые разряды, вызывающие резкое увеличение высокочастотных напряжений. Водяные капли вызывают большие радиочастотные напряжения, чем частичные разряды на изоляторах или неровности, могущие быть на проводниках в эксплуатации.

Результаты исследований на линиях. На рисунке показана зависимость напряженности поля, измеренного на разных расстояниях от 220-кВ линии, от высокочастотного напряжения в линии, полученная при дождях разной интенсивности. Эта зависимость дает количественные соотношения только для линии данной конструкции. Для другой линии (опытный пролет однофазной линии) были получены другие количественные соотношения. Отсюда автор делает вывод, что нужно измерять именно напряженность электромагнитного поля, а не непосредственно напряжение в проводе, генерирующем помехи.

Влияние помех, генерируемых в локальной точке линии. Был проделан следующий опыт: на эксплуатируемой линии 220 кВ гирлянда и около 1,5 м провода по обе стороны от опоры поливались искусственным дождем; вода попадала также на расположенный под гирляндой конденсатор связи. Сильные всплески короны с многочисленных точек мокрой поверхности были ясно заметны визуально, но не было отмечено никакого увеличения показаний ни на измерителе высокочастотного напряжения, связанном с проводом через конденсаторы связи, ни на приборе, связанном с проводом через антенну.



При втором опыте на каждой из 16 опор 5-км участка линии на проводе устанавливались гребенки, смазанные жиром. Высокочастотное напряжение изменилось всего с 2300 до 2900 мкВ. Это изменение в несколько раз меньше ежедневного обычного изменения в сухую погоду. На основании этих опытов авторы делают заключение, что экранирующие устройства для гирлянд и линейной арматуры с точки зрения предупреждения радиопомех не нужны даже в том случае, если изоляторы и арматура находятся под постоянной короной. Подавление короны на изоляторах, зажимах, армирующих прутках, демпферах вибраций и подобных устройствах не может улучшить общую характеристику радиопомех, создаваемых линиями.

Исследования по влиянию высоты проводника показали, что на антеннах, расположенных не ближе 60 м от линии, изменение высоты проводника в практических пределах не сказывается на поле помех.

Связь через распределительные сети. Проникновение радиопомех в приемные системы происходит главным образом не непосредственно с высоковольтной линии через приемные антенны, но путем промежуточного заема в виде

распределительной сети. Поэтому, если уменьшить связь между высоковольтной и низковольтными линиями, то, вероятно, можно будет допустить в высоковольтной линии больший уровень высокочастотных напряжений. Уменьшение связи может быть достигнуто несколькими способами, которые еще нужно проверить на опытных участках: 1) устройством защитных тросов; 2) включением высокочастотных реактивных катушек на низковольтной линии по обеим сторонам участка, на котором имеется наибольшая связь с высоковольтной линией; 3) включением емкостей между проводами и землей в низковольтной линии.

Диаметр проводника на высоковольтной линии. Наблюдения над уровнем помех в 220 кВ системе при разных диаметрах проводов позволили авторам рекомендовать следующие наименьшие диаметры проводов, допустимые для данного напряжения с точки зрения отсутствия существенных радиопомех: 24 мм для 230 кВ, 32 мм для 300 кВ и 38 мм для 345 кВ.

На этом основании в системе Bonneville предложено приступить к установке повышающих автотрансформаторов на ряде магистральных линий с целью повышения напряжения линии до предельных значений, допустимых по уровню помех и увеличения пропускаемых мощностей.

(H. L. Rorden u. R. S. Gens. El. Eng. № 10, 1952)

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

ЭЛЕКТРОВАЗ С ИГНИТРОННЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ ПЕНСИЛЬВАНСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ (США)

В 1952 г. на Пенсильванскую железную дорогу (США), для электрификации которой применен однофазный ток 25 Гц, 11 000 В в контактом проводе, поступили 2 электроваза с игнитронными выпрямителями и тяговыми двигателями постоянного тока.

Постройке мощного преобразовательного электроваза предшествовали лабораторные исследования и сооружение опытного моторного вагона с игнитронными выпрямителями, прошедшего линейные испытания на той же Пенсильванской железной дороге.

Лабораторно были исследованы: влияние тряски и ударов на выпрямитель и влияние качения руты на работу катода выпрямителя, влияние пульсации выпрямленного тока на нагрев и коммутацию двигателей, влияние гармоник выпрямленного тока на линии связи. Все эти исследования дали положительные результаты. Испытания моторного вагона в эксплуатационных условиях подтвердили выводы лабораторных исследований.

Каждый из новых электровазов состоит из двух секций. В одном электровазе секция имеет три двухосные тележки, в другом — две трехосные. Секции каждого электроваза совершенно одинаковы. Длительная мощность секции 3000 л. с., а электроваза в целом 6000 л. с. Применение в одном случае двухосных, а в другом — трехосных тележек сделано с целью проверки в эксплуатационных условиях преимуществ и недостатков устройств обоих типов.

Основные данные по обоим электровазам приведены в таблице.

Характеристики электровазов

Ходовая формула	2 (BBV)	2 (CC)
Количество ведущих осей	12	12
Вес (полный и сцепной), т	340	330
Давление на ось, т	28,3	27,5
Сила тяги при длительном режиме, т	60	60
Скорость при длительном режиме, км/час	27,3	27,3
Сила тяги при трогании, т	85	82,5
Максимальная скорость, км/час	102	102
Количество тяговых двигателей	12	12
Диаметр колеса, мм	1 120	1 120
Передаточное число	15:68	15:68
Полная длина, м	37,9	37,9
Высота до опущенного пантографа, м	4,57	4,57

На электровозе установлены тяговые двигатели постоянного тока длительной мощностью по 500 л. с. Двигатели шестиполусные с дополнительными полюсами, обычной конструкции, применяемой на тепловозах. Изоляция обмоток якоря и полюсов — кремнийорганическая. Якорные подшипники — роликовые, осевые — подшипники скольжения.

Тяговая характеристика электровоза представлена на диаграмме рис. 1. На этой диаграмме нанесены характеристики стандартного сочлененного из трех секций (12 осей) тепловоза, с дизелем мощностью 4500 л. с. (по тяговым двигателям 3700 л. с.) (кривая 1) и сочлененного электровоза (12 осей) с непосредственными двигателями однофазного тока 25 кв, мощностью 5625 л. с. (кривая 2).

Оборудование обеих секций электровоза идентично.

На рис. 2 показано расположение оборудования и аппаратуры в одной из секций электровоза с двухосными тележками.

Трансформатор по конструкции аналогичен трансформатору электровоза с двигателями однофазного тока, однако его вторичная обмотка имеет 15 выводов и мощность ее на 45% выше, так как она обтекает током только полпериода. Длительная мощность трансформатора 4200 кв. Трансформатор залит «инертином», радиатор его охлаждается вентилятором.

Принципиальная силовая схема одной секции электровоза представлена на рис. 3. На рис. 4 показана схема при реостатном торможении.

Реакторы в цепях тяговых двигателей сглаживают волнистость тока приблизительно на 30%.

На тяговом режиме имеется 35 позиций, в том числе ряд позиций, получаемых за счет регулирования зажигания игнитрона. Угол запаздывания достигает 30° при тяговом режиме и 50° при торможении.

Контакты ответвлений (8 на рис. 3) заключены в кожух с окнами для искрогасительных камер. Кожух охлаждается вентилятором, с расходом воздуха 85 м³/мин. В этом же кожухе размещаются контакторы вспомогательной аппаратуры.

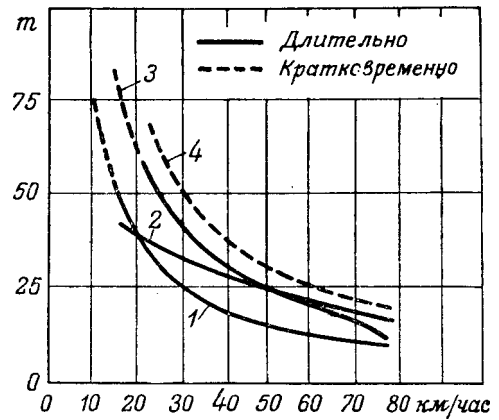


Рис. 1. Тяговые характеристики электровозов и тепловоза.

1 — тепловоз; 2 и 4 — электровоз однофазного тока 25 кв с непосредственными двигателями; 3 — электровоз с игнитронами.

Игнитроны одной секции электровоза смонтированы в двух ячейках и закреплены приблизительно в центре тяжести на амортизирующей конструкции, которая, в свою очередь, опирается на изоляторы. Игнитроны стандартного образца с добавочными ртутными отражателями.

От обратных зажиганий игнитроны защищены анодными выключателями. Испытания игнитронов в лаборатории и двухгодичная эксплуатация их на мотор-вагонной секции показали, что тяжелые обратные зажигания в игнитронах вообще не имеют места.

Анодный выключатель рассчитан на 1200 а постоянного или переменного тока.

Первоначально на электровозе было установлено сглаживающее устройство, но опыт эксплуатации показал,

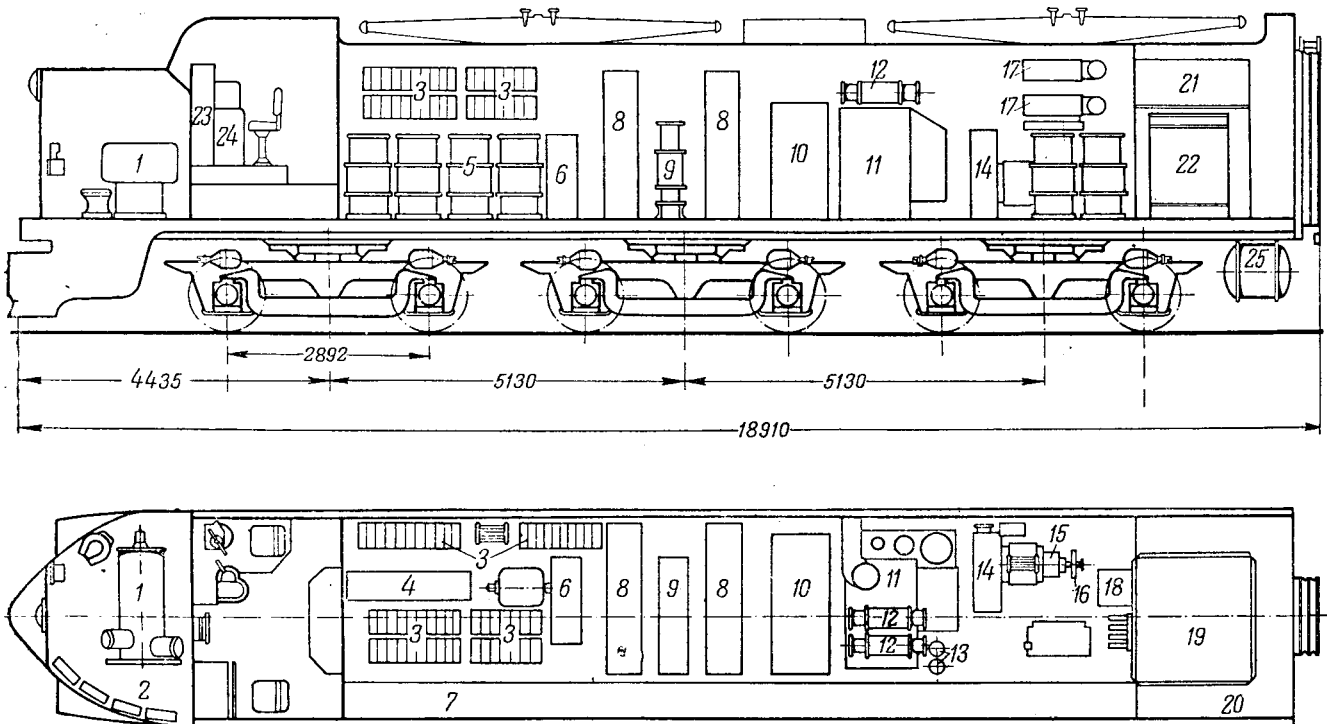


Рис. 2. Размещение оборудования и аппаратуры в секции электровоза.

1 — компрессор; 2 — батарея; 3 — конденсаторы сглаживающего устройства; 4 — сглаживающее устройство постоянного тока; 5 — сглаживающие реакторы; 6 — вентилятор тяговых двигателей; 7 — проход; 8 — ячейки игнитронов; 9 — анодный реактор; 10 — контакторы выводов вторичной обмотки трансформатора; 11 — трансформатор; 12 — дроссельные катушки; 13 — огнетушители; 14 — вентилятор трансформатора; 15 — генератор для цепей управления; 16 — насос; 17 — кулачковый механизм переключения на реостатное торможение; 18 — расширитель; 19 — вентилятор; 20 — радиатор для охлаждающей воды; 21 — горючие сопротивления; 22 — радиатор и вентилятор; 23 — приборы; 24 — контакторы; 25 — главный резервуар.

На электровозе установлены тяговые двигатели постоянного тока длительной мощностью по 500 л. с. Двигатели шестиполусные с дополнительными полюсами, обычной конструкции, применяемой на тепловозах. Изоляция обмоток якоря и полюсов — кремнийорганическая. Якорные подшипники — роликовые, осевые — подшипники скольжения.

Тяговая характеристика электровоза представлена на диаграмме рис. 1. На этой диаграмме нанесены характеристики стандартного сочлененного из трех секций (12 осей) тепловоза, с дизелем мощностью 4500 л. с. (по тяговым двигателям 3700 л. с.) (кривая 1) и сочлененного электровоза (12 осей) с непосредственными двигателями однофазного тока 25 гц, мощностью 5625 л. с. (кривая 2).

Оборудование обеих секций электровоза идентично.

На рис. 2 показано расположение оборудования и аппаратуры в одной из секций электровоза с двухосными тележками.

Трансформатор по конструкции аналогичен трансформатору электровоза с двигателями однофазного тока, однако его вторичная обмотка имеет 15 выводов и мощность ее на 45% выше, так как она обтекается током только полупериода. Длительная мощность трансформатора 4200 ква. Трансформатор залит «инертином», радиатор его охлаждается вентилятором.

Принципиальная силовая схема одной секции электровоза представлена на рис. 3. На рис. 4 показана схема при реостатном торможении.

Реакторы в цепях тяговых двигателей сглаживают волнистость тока приблизительно на 30%.

На тяговом режиме имеется 35 позиций, в том числе ряд позиций, получаемых за счет регулирования зажигания игнитрона. Угол запаздывания достигает 30° при тяговом режиме и 50° при торможении.

Контакты ответвлений (8 на рис. 3) заключены в кожух с окнами для искрогасительных камер. Кожух охлаждается вентилятором, с расходом воздуха 85 м³/мин. В этом же кожухе размещаются контакты вспомогательной аппаратуры.

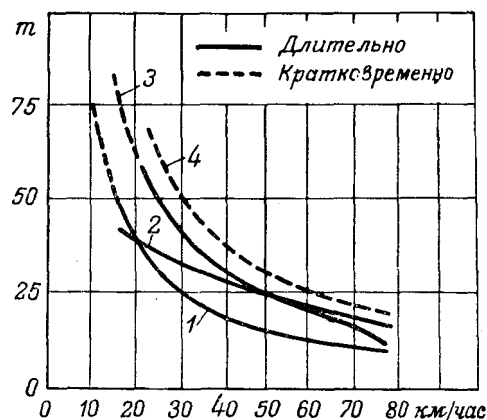


Рис. 1. Тяговые характеристики электровозов и тепловоза.

1 — тепловоз; 2 и 4 — электровоз однофазного тока 25 гц с непосредственными двигателями; 3 — электровоз с игнитронами.

Игнитроны одной секции электровоза смонтированы в двух ячейках и закреплены приблизительно в центре тяжести на амортизирующей конструкции, которая, в свою очередь, опирается на изоляторы. Игнитроны стандартного образца с добавочными ртутными отражателями.

От обратных зажиганий игнитроны защищены анодными выключателями. Испытания игнитронов в лаборатории и двухгодичная эксплуатация их на мотор-вагонной секции показали, что тяжелые обратные зажигания в игнитронах вообще не имеют места.

Анодный выключатель рассчитан на 1200 а постоянного или переменного тока.

Первоначально на электровозе было установлено сглаживающее устройство, но опыт эксплуатации показал,

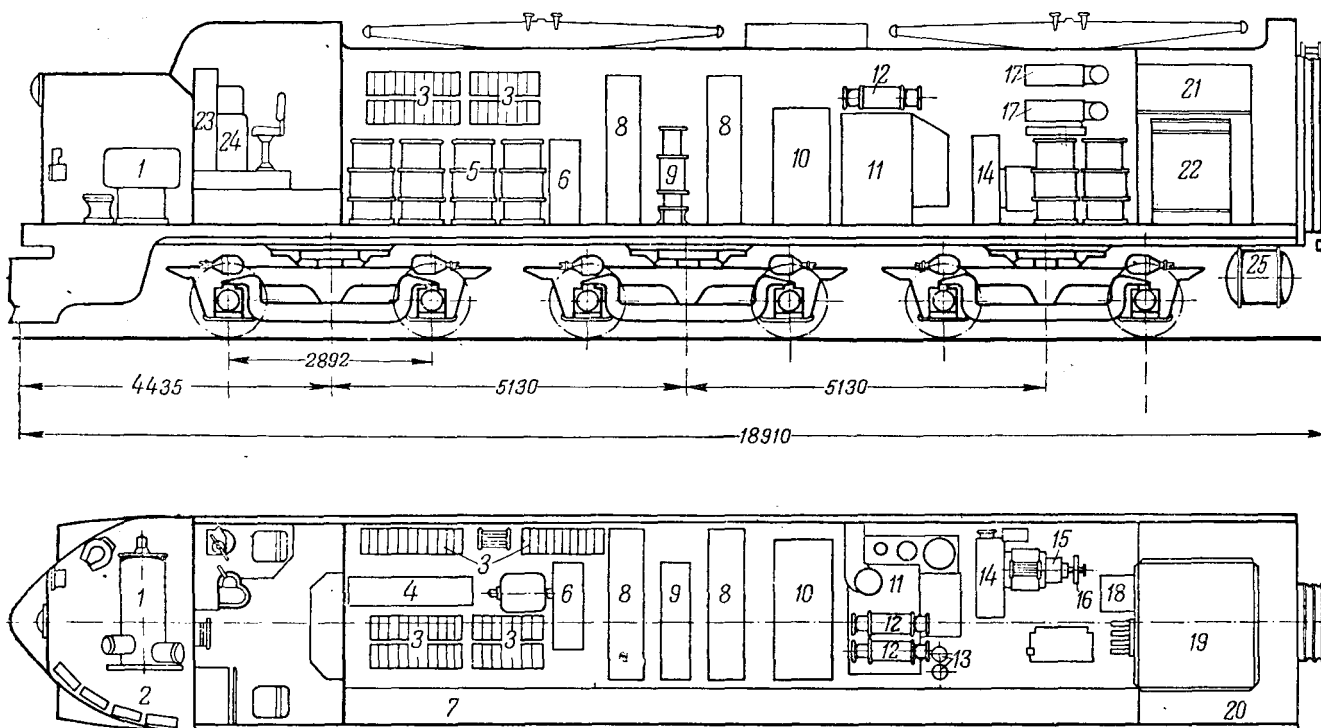


Рис. 2. Размещение оборудования и аппаратуры в секции электровоза.

1 — компрессор; 2 — батарея; 3 — конденсаторы сглаживающего устройства; 4 — сглаживающее устройство постоянного тока; 5 — сглаживающие реакторы; 6 — вентилятор тяговых двигателей; 7 — проход; 8 — ячейки игнитронов; 9 — анодный реактор; 10 — контакторы выводов вторичной обмотки трансформатора; 11 — трансформатор; 12 — дроссельные катушки; 13 — огнетушители; 14 — вентилятор трансформатора; 15 — генератор для цепей управления; 16 — насос; 17 — кулачковый механизм переключения на реостатное торможение; 18 — расширитель; 19 — вентилятор; 20 — радиатор для охлаждающей воды; 21 — горючие сопротивления; 22 — радиатор и вентилятор; 23 — приборы; 24 — контакты; 25 — главный резервуар.

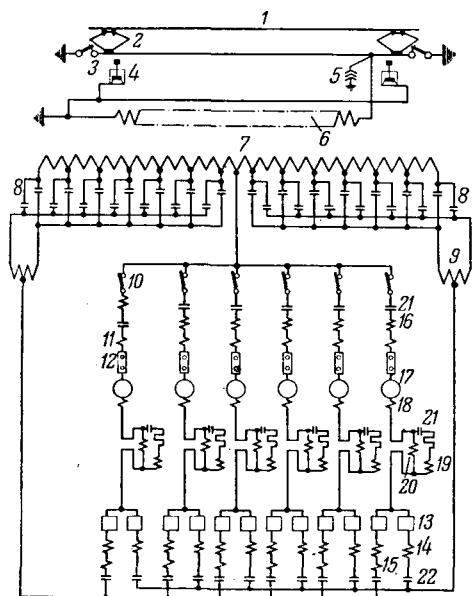


Рис. 3. Силловая схема при тяговом режиме.

1—контактный провод; 2—пантограф; 3—блокировка и заземление пантографа; 4—контактор заземления пантографа; 5—разрядник; 6—обмотка высшего напряжения трансформатора; 7—обмотка низшего напряжения; 8—контакты ответвлений; 9—дроссель; 10—разъединитель тяговых двигателей; 11—реле перегрузки тяговых двигателей; 12—шунты; 13—игнитроны; 14—анодные реакторы; 15—анодные реле перегрузки; 16—реакторы для сглаживания волнистости тока; 17—якоря двигателей; 18—дополнительные полюса тяговых двигателей; 19—индуктивный шунт; 20—главные полюсы двигателей; 21—контакты; 22—анодные выключатели.

что со стороны постоянного тока оно может быть снято, а со стороны переменного — уменьшено по мощности на половину.

Всего было снято около 5 т конденсаторов и резонансных реакторов.

При реостатном торможении два игнитрона работают для питания цепи возбуждения (рис. 4). Имеется 14 позиций реостатного торможения, получаемых за счет ответвлений от обмотки трансформатора, а также изменения сопротивления в цепи возбуждения и регулирования угла запаздывания. Нагрузочные сопротивления каждого двигателя защищены от чрезмерного перегрева соответствующими тепловыми реле.

Вспомогательное оборудование включает компрессор, вентиляторы и генератор постоянного тока.

Компрессор с приводом от индукционного двигателя дает 6,3 м³/мин воздуха при 750 об/мин. Тяговые двигатели охлаждаются мотор-вентилятором 43 л. с. 1450 об/мин. Этот же вентилятор дает воздух для обогрева стекол кабины машиниста.

Вентилятор трансформатора имеет привод от мотор-генератора. Двигатель этого агрегата мощностью 21,5 кВт при 1450 об/мин одновременно приводит в действие генератор управления 45 в, 60 а и центробежный насос водяного охлаждения игнитронов. Вентилятор дает воздух для охлаждения радиатора трансформатора, контакторов в ответвлениях обмотки трансформатора и реакторов для сглаживания пульсации тока.

Радиатор водяного охлаждения игнитронов охлаждается особым вентилятором, имеющим привод от индукционного двигателя 26 кВт, 1450 об/мин. Воздух охлаждает радиатор и затем проходит через тормозные сопротивления, расположенные над вентилятором. При реостатном

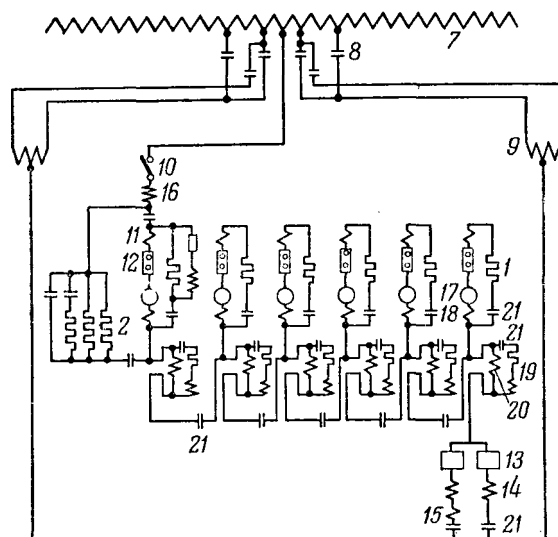


Рис. 4. Силловая схема при реостатном торможении.

1 — нагрузочное сопротивление; 2 — сопротивления в цепи возбуждения; остальные номера те же, что и на рис. 3.

торможении срабатывают особые заслонки, и воздух пропускается в сопротивления помимо радиатора.

На случай пожара на электровозе установлены 4 баллона с углекислотой. Углекислота может быть выпущена из баллонов нажатием рычага из любой кабины машиниста. При выпуске углекислоты все вентиляторы данной секции электровоза автоматически останавливаются.

За первые 100 000 км пробега электровозы показали свои положительные качества.

Большое количество пусковых позиций позволяет плавно трогать тяжелые составы. Во время поездок вес поезда достигал 12 000 т (162 вагона). На подъеме 2,88‰ длиной 34 км скорость поезда доходила до 37 км/час.

Параллельное соединение всех двигателей значительно ослабило возможность буксования. Этому также способствовала равномерная развеска локомотива. Управление электровозом весьма несложное.

Электровозы с игнитронными выпрямителями позволяют весьма просто использовать в контактном проводе однофазный ток нормальной частоты (для США — 60 гц), что экономично.

Аппаратура при большей частоте имеет меньшие размеры и вес и является продукцией массового производства.

Литература

1. Электровозы Пенсильванской железной дороги с выпрямителями. Railway Gazette, т. 96, стр. 656, № 24, 1952.
2. С. С. Whittaker, W. M. Hutchison. Электровоз Пенсильванской железной дороги с игнитронным выпрямителем. El. Engineering стр. 432, № 5, 1952.
3. С. С. Whittaker, W. M. Hutchison. Пенсильванская железная дорога получает два электровоза с игнитронными выпрямителями. Railway Age, т. 132, стр. 63, № 6, 1952.
4. С. С. Whittaker, W. H. Hutchison. Результаты эксплуатации электровозов с игнитронными выпрямителями. Railway Mech. and Electr. Engineer, стр. 63, № 9, 1952.
5. L. J. Hibbard и др. Применение на электроподвижном составе выпрямителей. Trans. AIEE, т. 69, стр. 519, 1950.

Инж. Л. А. ВИСЛОУХ



Научно-техническая сессия по электроприводу подъемно-транспортных механизмов

Секция электропривода и промэлектрооборудования ВНИТОЭ и энергетическая секция Латвийского совета НИТО провели в Риге в декабре минувшего года научно-техническую сессию по электроприводу подъемно-транспортных механизмов для обобщения опыта проектирования, наладки и эксплуатации различных типов привода и выявления тенденций дальнейшего развития привода в этих областях на основе директив XIX съезда КПСС по пятому пятилетнему плану.

В работах сессии принял участие 141 делегат от разных министерств и ведомств, представлявших свыше 40 промышленных центров СССР.

На сессии были заслушаны доклады по общим вопросам электропривода подъемно-транспортных механизмов (выбор мощности двигателя, определение его номинальной скорости, создание систем непрерывного управления с широким диапазоном регулирования скорости), по вопросам привода отдельных классов механизмов—кранов, подъемников, экскаваторов, земснарядов, механизмов гидротехнических сооружений и по вопросам эксплуатации электрооборудования.

Инж. А. И. Шейнман (МПКУ треста «Центроэлектромонтаж») в докладе «Выбор рода тока и привод кранов металлургических заводов» в основном сосредоточил внимание на обосновании целесообразности расширения пределов применимости приводов переменного тока для кранов металлургической промышленности. Инж. А. Г. Меклер (ВНИИПТМАШ) в докладе «Результаты исследовательских работ ВНИИПТМАШ по крановому электрооборудованию» предложил новую классификацию режимов работы кранового электрооборудования, учитывающую использование его по грузоподъемности и по времени работы. Инж. М. М. Перельмутер (Харьковское ПКУ треста «Южэлектромонтаж») в докладе «Электрооборудование грейферных перегружателей» рассмотрел различные варианты по системе генератор—двигатель и с двигателями переменного тока. Инж. О. Б. Тухшнай (ЦНИИМФ) сделал доклад «Требования к электроприводу судовых грузовых электрических лебедок переменного тока». Инж. Б. В. Жданов (завод «Подъемник») в докладе «Электрооборудование пассажирских и грузовых подъемников для жилых домов и промышленных предприятий» сформулировал основные требования к подъемникам различных категорий и их электрооборудованию и указал на целесообразность широкого применения приводов переменного тока с двухскоростными асинхронными двигателями. Кандидат техн. наук М. Н. Губанов (ИАТ АН СССР) в докладе «Система управления асинхронным приводом посредством дросселей насыщения» сообщил о разработанной методике расчета дросселей насыщения и выборе оптимальных значений индукции. Кандидат техн. наук А. А. Сиротин (МЭИ им. Молотова) в докладе «Регулирование скорости асинхронных двигателей при помощи колебательных контуров, включенных в ротор» рассмотрел поведение асинхронного двигателя при работе его в предложенной схеме и дал математический анализ влияния параметров на свойства механических характеристик. Кандидат техн. наук Л. В. Карнюшин (Львовский политехнический институт) в докладе «Вопросы выбора передаточного числа редуктора для электроприводов крановых механизмов и экскаваторов» сообщил о разработанной им совместно с инж. Ф. А. Горайко методике предварительного выбора мощности электродвигателя и оптимального передаточного числа редуктора для приводов, работающих в повторно-кратковременном режиме с трапециoidalным и треугольным графиком скорости.

Инж. А. Г. Ефанов (трест «Электропривод») в докладе «Электропривод экскаваторов» охарактеризовал созданные в послевоенные годы заводами быв. Министерства тяже-

лого машиностроения и быв. Министерства строительного и дорожного машиностроения экскаваторы и дал классификацию их по емкости ковша и производительности, сообщив при этом особенности электрооборудования экскаваторов. Инж. Т. А. Дымшиц (Украинская производственная контора треста «Электропривод») представил доклад «Опыт наладки электроприводов экскаваторов». Кандидат техн. наук Д. Н. Липатов (МЭИ им. Молотова) в докладе «Результаты экспериментального исследования электроприводов шагающих экскаваторов» указал на возможность более эффективного использования этих приводов при тщательном подборе параметров и, в частности, на возможность обеспечения более благоприятного характера переходных процессов.

Инж. Ф. Н. Чеботарев (Управление гидромеханизации) выступил с докладом «Электропривод электрических землесосных снарядов».

Инж. Г. И. Семенов (Ленинградская контора «Гидростальпроект») в докладе «Электрооборудование механизмов гидротехнических сооружений» подробно осветил специфические требования, предъявляемые механизмами гидротехнических сооружений к электрооборудованию и аппарату управления. Учитывая громадный объем гидротехнического строительства по пятилетнему плану и большое народнохозяйственное значение снижения веса механизмов гидротехнических сооружений и металлоконструкций с целью получения надежных исходных данных для проектирования этих механизмов, докладчик указал на необходимость проведения комплексных исследований действующих механизмов гидротехнических сооружений.

Инж. Д. С. Лившиц (МПКУ треста «Центроэлектромонтаж») в докладе «Электрооборудование систем непрерывного транспорта» ознакомил участников сессии с существующими системами непрерывного транспорта, находящими применение в коксохимической, горнорудной, цементной и других отраслях промышленности и с применяемыми в этих системах электрическим и механическим оборудованием. Инж. П. И. Недужко (Днепропетровское ПКУ треста «Южэлектромонтаж») выступил с докладом «Централизованное управление сложными системами непрерывного транспорта».

В прениях по заслушанным докладам приняли участие свыше 30 делегатов, которые подвергли критике отдельные положения докладчиков и внесли ряд ценных технических предложений.

В выступлениях делегатов, в частности, указывалось, что работа приводов переменного тока в режимах, характерных для подъемно-транспортных и строительных механизмов, влечет за собой ухудшение коэффициента мощности. В связи с этим было обращено внимание проектных организаций на необходимость при проектировании оборудования на переменном токе предусматривать мероприятия, обеспечивающие высокий коэффициент мощности. В качестве одного из основных мероприятий было рекомендовано широкое применение для нерегулируемых приводов синхронных двигателей.

В связи с широким внедрением в практику современного электропривода землеройных и подъемных машин систем непрерывного управления указывалось на необходимость разработки инженерных методов расчета подобных систем и на целесообразность критического подхода при выборе типа электромашинных усилителей, на желательность использования наряду с усилителем с поперечным полем усилителей с самовозбуждением, однокаскадных с компенсационной обмоткой и др.

Отмечена настоятельная необходимость создания эффективно действующей защиты двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме работы.

В связи с широким жилищным строительством, происходящим в стране, с преобладанием зданий повышенной этажности, резко возрастает потребность в пассажирских подъемниках. В связи с этим необходима разработка типовых конструкций и электрооборудования подъемника массового применения, а также специальной для него аппаратуры. В целях повышения надежности работы и устранения радиопомех желательна проработка вопроса об использовании бесконтактных реле. В отношении подъемников высотных зданий рекомендовано при дальнейшей рационализации их схем упростить управление.

Сессия приняла развернутую резолюцию по общим вопросам проектирования и выбора систем привода, по вопросам электрооборудования различных типов подъемно-транспортных механизмов, по вопросам обеспечения электрическими машинами и аппаратами и по организационным вопросам.

Сессия обратилась в Правление ВНИТОЭ с просьбой совместно с Гидропроектом организовать в ближайшее время техническое совещание по вопросам электрообору-

дования и электропривода гидротехнических сооружений.

В резолюции отмечена недостаточная координация в работе отдельных научно-исследовательских институтов, проектных организаций и промышленных предприятий, которая в ряде случаев приводила к ненужному параллелизму в работе. Сессия указала на необходимость более широкого развертывания творческого сотрудничества научных и проектных учреждений с промышленными предприятиями, изготавливающими электрооборудование. Сессия обратилась к Президиуму Академии наук СССР с просьбой поручить Отделению технических наук возглавить координирование работ в области автоматизированного электропривода.

Сессия также отметила недостаточно широкое развитие научно-исследовательской работы по электроприводу в вузах.

Кандидат техн. наук, доц. В. П. АНДРЕЕВ

Кандидат техн. наук, доц. Ю. А. САБИНИН



Библиография

К настоящему времени издано три книги по общей электротехнике для неэлектротехнических вузов, а именно: Е. В. Китаев и Н. Ф. Гревцев «Курс общей электротехники» (рецензию на эту книгу см. ниже) И. Р. Бельский, В. А. Бесекерский, А. В. Донской, С. А. Пресс, Е. К. Юрковский «Общая электротехника» под ред. С. А. Пресса, Госэнергоиздат, 1951; А. С. Касаткин, М. А. Перекалин, П. С. Сергеев «Электротехника», изд. 5-ое совершенно переработанное, Госэнергоиздат, 1953.

Считая нецелесообразным разделять обсуждение на страницах журнала этих книг, редакция решила совместить их обсуждение и приглашает читателей журнала принять в нем участие.

Е. В. КИТАЕВ И Н. Ф. ГРЕВЦЕВ. КУРС ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.
4-е издание. 808 стр., ц. 28 руб. 30 коп. Госэнергоиздат. 1950.

Рассматриваемая книга представляет собой четвертое, переработанное издание одноименной книги авторов. Она предназначена служить в качестве учебного пособия для неэлектротехнических высших учебных заведений, где общая электротехника читается обычно на третьем году обучения после того, как пройдены курсы физики и высшей математики.

В отличие от предыдущего издания книги в ней значительно расширено введение, посвященное отечественным основоположникам электротехники, внесены дополнения в отдельные части курса, изменен порядок расположения некоторых глав и добавлена глава «Электротермия». Объем дополнительного материала составил около 200 страниц, а общий объем книги достигает 808 стр. (50¹/₂ печ. листов).

Рассматриваемая книга не ориентирована на какую-либо определенную специальность, охватывая в большей или меньшей мере почти все разделы электротехники.

Книга состоит из 15 глав. Первые 5 глав содержат сведения из основ электротехники и повторения некоторых вопросов курса физики. 6-я глава посвящена электроизмерительным приборам и технике электрических измерений. Последующие четыре главы содержат сведения об электрических машинах и трансформаторах. Главы 11, 12 и 13 посвящены электронным и ионным приборам, электротермии и электрическому освещению. Наконец, последние две главы относятся к электрическим сетям, станциям и подстанциям.

Подробное ознакомление с содержанием книги показывает, что, несмотря на четырехкратное издание, качество книги крайне низко, о чем свидетельствуют: содержащиеся в книге ошибки теоретического и практического характера, неправильные формулировки, методические погрешности, ненаучный язык и литературная неряшливость — неправильные обороты речи и фразы, лишённые смысла. Наконец, в ряде случаев искажены исторические факты, касающиеся работ русских ученых.

По данной книге, допущенной бывшим Министерством высшего образования в качестве учебного пособия для

высших учебных заведений, имеется столь большое количество замечаний, что перечислить их в рамках настоящей рецензии практически не представляется возможным.

Мы ограничимся здесь лишь изложением основных критических замечаний, сопровождая их некоторыми примерами.

Ошибки в изложении основных теоретических вопросов. В книге допущена грубейшая ошибка при рассмотрении такого элементарного вопроса, как понижение напряжения на зажимах источника электрической энергии с уменьшением сопротивления внешней цепи. На стр. 61 говорится: «Если мы будем уменьшать сопротивление внешней цепи r , то, очевидно, ток I при постоянной величине э. д. с. E будет увеличиваться. Как нетрудно увидеть из соотношения (1-30), напряжение на зажимах источника тока $U-Ir$ при этом также будет увеличиваться»¹.

Трудно поверить, что в учебном пособии для вузов, выпущенном четвертым изданием, могло найти место столь неверное утверждение.

Электромагнитная индукция и законы Фарадея и Ленца, являющиеся краеугольными камнями электротехники, изложены в книге совершенно неудовлетворительно. Из приведенной в книге формулировки правила правой руки выпало указание на направление движения проводника: «...если держать перед проводником ладонь правой руки (фиг. 3-17) так, чтобы магнитные линии были перпендикулярны ей и направлены к ладони, то вытянутые остальные пальцы укажут направление э. д. с. индукции» (стр. 131—132).

По поводу формулы (3-28) $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ в книге сказано (стр. 134): «Последнее равенство указывает на то, что величина э. д. с., индуцируемой в замкнутом контуре, равна скорости уменьшения магнитного потока, пронизывающего контур, или, как иногда говорят, равна магнитному

¹ Разрядка здесь и в дальнейшем сделана рецензентами.

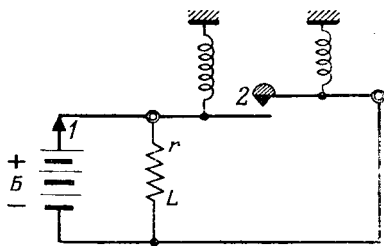
спаду". Между тем величина наводимой э. д. с. может быть в действительности равна как скорости убывания магнитного потока, так и скорости его возрастания. Поэтому объяснение, приведенное в книге, принципиально неверно.

В книге дано неправильное объяснение смысла знака „минус“ в формуле $e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}$, который якобы указывает на то, что „при увеличении абсолютной величины магнитного потока ... э. д. с. индукции отрицательна“ (стр. 135). В действительности, при возрастании абсолютной величины магнитного потока производная $\frac{d\Phi}{dt}$ может быть и отрицательной, вследствие чего э. д. с. e будет положительной.

Понятие о потокоцеплении введено столь неудачно, что у читателя неизбежно возникает неправильное представление, что формула (3-30) $e = -\frac{d\psi}{dt}$ является частным случаем формулы (3-29): $e = -\omega \frac{d\Phi}{dt}$. Авторы пишут: „При равенстве потоков, очевидно, $\psi = \omega\Phi$ и формулу (3-29) можно написать в виде: $e = -\frac{d\psi}{dt}$... (3-30)“. В действительности именно формула (3-30) и является наиболее общей, а формула (3-29) выражает частный случай.

Путано излагаются основные понятия, связанные с переходными процессами в цепи с активным сопротивлением и индуктивностью и в цепи с емкостью и активным сопротивлением. На стр. 155 дается следующая трактовка постоянной времени: «Постоянная времени выражает собой время, в течение которого с момента замыкания цепи ток достигает определенной доли своей окончательно установившейся величины» (а если окончательно установившийся ток равен нулю?). На стр. 105 сказано: «Произведение rC определяет собой скорость нарастания разности потенциалов на обкладках конденсатора u_c и тока в цепи i при переходном режиме заряда конденсатора через сопротивление r ». Между тем общеизвестно, что при заряде конденсатора от источника постоянного напряжения ток в цепи не нарастает, а убывает.

В § 3-19 «Выключение источника тока из цепи с индуктивностью» на стр. 153 приведена фиг. 3-29, указывающая исходное положение: контакт 1 замкнут. Затем замы-



кается контакт 2, а одновременно размыкается контакт 1. Рассмотрев соответствующий переходный процесс в цепи r, L , авторы получают формулу (3-64).

$$i = \frac{U}{r} e^{-\frac{r}{L}t},$$

а в заключение пишут: „Последняя формула указывает на то, что ток в цепи, обладающей индуктивностью, снижается постепенно с течением времени и достигает нулевого значения теоретически при $t = \infty$, практически же ток довольно скоро исчезает, так как в момент разрыва цепи численное значение r весьма велико по сравнению с L и,

следовательно, отношение $\frac{r}{L}$ очень велико. В этом случае в месте разрыва наблюдается искра, являющаяся одной из форм прохождения тока через воздух“. Здесь явная путаница в основных понятиях, связанных с переходными процессами в электрических цепях. Как может изменяться r , если речь идет о схеме фиг. 3-29, где замыкание контакта 2 и размыкание контакта 1 происходят одновременно, а r постоянно?

Никаких пояснений физического смысла переходных процессов, никаких указаний на энергетические соотношения в книге нет.

На стр. 108 смешиваются понятия «электрическая прочность» и «рабочее напряжение», допуская совершенно неправильное утверждение, что электрическая прочность диэлектрика должна превышать рабочее напряжение.

Нельзя признать удовлетворительным § 3-10, посвященный магнитной цепи. Параграф начинается фразой (стр. 127): «В электротехнике часто стремятся ограничить объем, занимаемый магнитным полем, и направить магнитные линии по определенным путям. В этом случае задачу расчета магнитного поля можно свести к более простой задаче расчета магнитной цепи». Но авторы нигде не говорят о том, что такое «расчет магнитного поля» и что такое «расчет магнитной цепи». В § 3-10 нет ни единой схемы, не указан также смысл применения ферромагнитных материалов, как материалов магнитопроводов.

Изложение символического метода, т. е. применения комплексных чисел для расчета цепей переменного тока, дано настолько путано и неверно, что весьма трудно дать подробные замечания по этому разделу. Достаточно указать, что на стр. 204 рекомендуется помнить, что выражение

$$I_m = I_m e^{j\varphi}$$

... является не чем иным, как сокращенной записью выражения

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi).$$

В четвертом абзаце стр. 205 говорится: «Важно отметить, что хотя комплексными (?— Рец.) можно выразить и ток, и напряжение, и сопротивление, но природа этих комплексов различна». Спрашивается, о каком различии природы комплексов может идти речь?

На стр. 210 читаем:

«Пользуясь комплексной формой записи мгновенных значений, мы можем выразить разность потенциалов двух соседних узлов формулой

$$\dot{\varphi}_{n-1} - \dot{\varphi}_n = \dot{E}_{n-1} - I_n Z_{n-1},$$

в которой принято, что положительным направлением тока и э. д. с. является направление от n к $(n-1)$. В действительности же, приведенное уравнение вопреки утверждению авторов не является «комплексной формой записи мгновенных значений».

Неправильно также указание в отношении способа изменения направления вращения магнитного вращающегося поля (гл. 5, стр. 271): «Для изменения направления вращения результирующего потока необходимо переменить направление тока в двух каких-либо обмотках. На практике... изменение направления вращения ... достигается путем применения переключателя Π на двух фазах, как это схематически изображено на фиг. 5-22». В действительности переключатель Π на фиг. 5-22 не изменяет направление тока в обмотках, а меняет порядок чередования фаз.

Ошибки прикладной части курса. Неправильные формулировки, заключения и путаница, отмеченные выше, остаются и в прикладной части курса. Здесь много неправильных сведений практического характера, ошибки в чертежах и описаниях конструкций. Часто в книге рассматриваются устаревшие приборы и аппараты вместо современных отечественных конструкций. Приведем некоторые примеры.

На стр. 281 неправильно говорится, что «Арретир применяется в особо точных приборах». Арретир обязательно применяется, например, в гальванометрах, которые никак нельзя отнести к особо точным приборам.

На стр. 284 к достоинствам электромагнитных приборов авторы относят «возможность изготовления на большие токи, что избавляет от необходимости применения шунтов и трансформаторов тока». Такой текст может привести к неправильному выводу, что амперметры электромагнитной системы вообще применяются без измерительных трансформаторов, а шунты к ним не изготавливают потому, что есть возможность изготовить обмотку прибора на большие токи.

На стр. 286 во втором абзаце читаем: «По ...чувствительности электродинамические приборы лучше всех других систем, применяемых на переменном токе». Здесь много не столько то, что «...приборы лучше... систем», сколько утверждение о чувствительности этих приборов: оно не соответствует действительности.

В примере 6-1 на стр. 293 требуется определить сопротивление шунта к пятиамперному амперметру, чтобы им можно было измерять ток в цепи, равный 100 а. Пример неправилен, так как амперметр на 5 а уже имеет шунт, а шунт к шунту никогда не ставится.

Говоря о ферродинамических приборах (стр. 266—287), авторы не отмечают, что точность их ниже, чем электродинамических приборов, а это нужно отметить.

На фиг. 6-25 (стр. 304), иллюстрирующем устройство индукционного ваттметра с диском, ошибочно пропущена нижняя часть магнитной системы напряжения. На фиг. 6-27 даны неправильные соотношения сопротивлений. На фиг. 6-34 (стр. 320) приведена столь грубо неправильная схема включения однофазного счетчика, что включенный по этой схеме счетчик сразу же будет поврежден. Кроме того, подпись под фиг. 6-35 не соответствует приведенной схеме, которая изображает не включение двухэлементного счетчика, а схему измерения энергии двумя однофазными одноэлементными счетчиками.

Лобовые соединения трехфазных обмоток асинхронных двигателей всегда перекрещиваются. Поэтому неправилен принятый авторами термин «без перекрещивания» (в подписи к фиг. 8-9 на стр. 392 и соответственно в тексте этого параграфа).

На стр. 457 указывается, что «...роторы, делающие свыше 1000 об/мин, представляют собой цилиндр, снабженный пазами, в которые укладывается обмотка возбуждения». Между тем известно, что отечественной промышленностью серийно изготавливаются синхронные машины с явно выраженными полюсами, имеющие скорость свыше 1000 об/мин. Там же авторы неправильно ориентируют читателей, указывая, что мощность возбудителя составляет 0,5—10% мощности генератора.

На стр. 605 во втором абзаце указывается, что к недостаткам газотронов «...следует отнести весьма большую чувствительность к перегрузкам, необходимость поддерживать определенную температуру...». Эти общие замечания неосновательны, так как газотроны способны выдержать значительные перегрузки в течение короткого промежутка времени и могут работать в значительном температурном интервале. Анодное напряжение типовых электронно-лучевых трубок вопреки указанию авторов (стр. 632) не равно 200—400 в, а значительно выше. Стекланные ртутные выпрямители не изготавливаются на указываемую в книге мощность 100—150 квт (стр. 610).

В ряде случаев описываются устаревшие, несовременные схемы и конструкции, приводятся весьма неудачные чертежи. Одним из примеров такого рода является примитивная схема фиг. 9-41 на стр. 499 и пояснения к ней. Другими примерами такого рода могут служить: фиг. 11-28, 11-53, сопровождаемые совершенно неудовлетворительными пояснениями, фиг. 12-16, 15-23 и другие; описание на стр. 549—651, где в роли «более совершенной индукционной печи» приводится печь Рехлина-Роденгаузера, которая применялась еще в период до первой империалистической войны 1914 г.!

§ 11-3 описывает устаревшую схему лампового вольтметра, которая в настоящее время не применяется.

В тексте применяются термины: глобальные (по наименованию американской фирмы) и силовые (немецкое название) нагреватели (стр. 645), но не используется принятая у нас терминология (карборундовые нагреватели).

Неверно даны величины удельного сопротивления нагревателей (стр. 645), пределы температуры высокотемпературных электрических печей, а на стр. 653 — пределы емкости индукционных печей и частоты тока.

Искажение исторических фактов, касающихся работ русских ученых. Особо следует отметить, что, говоря о работах русских ученых и роли их в развитии электротехники, авторы много путают, часто допускают совершенно ненужное утрирование. Приведем некоторые примеры.

На стр. 13—14 читаем, что М. В. Ломоносов «...построил первый в мире электронизмерительный прибор — «электрический указатель»» (§ 6-2). В § 6-2 на стр. 281

читаем: «Первый в мире электронизмерительный прибор — электрический указатель или электрический «гномик» (??? — ред.) — был создан отцом русской науки М. В. Ломоносовым (примерно в 1745 г.)». Однако на стр. 87 оканчивается, что Рихманом «...был придуман прибор, названный им «электрическим указателем» и явившийся первым по времени появления «электрометром». Между тем общеизвестно, что Рихман построил электронизмерительный прибор, названный им «электрическим гномом».

Под фотографией Яблочкова на стр. 21 читаем: «Изобретатель .. трансформатора — П. Н. Яблочков», а на стр. 332 подпись под портретом гласит: «Изобретатель трансформатора — И. Ф. Усагин».

На стр. 29 читаем: В своей работе «Исследование функций намагничивания мягкого железа» А. Г. Столетов установил «Закон магнитной цепи». На стр. 128 формулу (3-19), выражающую закон полного тока для частных случаев, авторы называют «законом магнитной цепи». Встает вопрос, идет ли речь об одном и том же законе на стр. 29 и на стр. 128?

На стр. 30 под портретом А. Г. Столетова имеется подпись, в которой А. Г. Столетов назван основоположником учения об электромагнитизме. Соответствует ли это действительности? А. Г. Столетов внес большой вклад в учение о ферромагнитизме, установив функцию намагничивания мягкого железа, и разработал метод экспериментального исследования ферромагнитных материалов, имеющих большое практическое значение до настоящего времени. Но нельзя, конечно, смешивать электромагнитизм и ферромагнитизм.

На стр. 30 читаем «...проблема передачи больших мощностей на большое расстояние была блестяще решена в России Федором Аполлоновичем Пироцким и Дмитрием Александровичем Лачиновым». Зачем такое преувеличение? Русская наука в этом не нуждается. На стр. 32 сказано, что «Доливо-Добровольский разрешил все вопросы теории и практики трехфазного тока». Нельзя так терять всякое чувство меры. Иное дело было бы отметить, что М. О. Доливо-Добровольский является не только создателем трехфазных систем, но что он сумел сделать очень многое для внедрения их в жизнь, проявив себя талантливым изобретателем — конструктором, что он сумел разрешить ряд теоретических вопросов, которые выдвигались в то время практикой развития его трехфазных систем.

Методические ошибки. Курс Общей электротехники следует в вузах за курсами высшей математики и физики. Это позволяет в курсе Общей электротехники, во-первых, свободно пользоваться элементами высшей математики и давать компактные и вполне обоснованные выводы, а, во-вторых, помогает рассматривать в этом техническом курсе именно технические вопросы, к чему должен подготавливать учащихся курс физики. Те или иные общетеоретические положения, законы и теоремы нужно использовать для обоснования технических расчетов или напоминать их, распространяя на технические вопросы, подлежащие рассмотрению и требующие теоретических обоснований.

Стремление авторов рассматриваемой книги дать элементарные, «популярные» объяснения и выводы при рассмотрении общетеоретических вопросов приводит к математическому упрощенчеству (так как они именно здесь старательно избегают применения высшей математики), к ошибкам, путаным, вульгарным и неверным определениям.

Первыми параграфами гл. 1 (Цепь постоянного тока) являются: § 1-2 (Закон Кулона), § 1-3 (Напряженность электрического поля), § 1-4 (Электрический потенциал. Напряжение).

Все это — неправильно упрощенные и часто путанные повторения сведений, известных из курса физики. Например, дается определение диэлектрической проницаемости (стр. 41): «Эта величина характеризует окружающую наэлектризованное тело среду в отношении ее участия в электрических явлениях...», или на стр. 46. «Последние два соотношения указывают на то, что напряженность поля равна падению потенциала, приходящегося на единицу длины силовой линии». Это неверно, так как соотношения

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta e} \text{ и } E = -\frac{d\varphi}{de},$$

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ СПРАВОЧНИК под общей редакцией профессоров Московского энергетического института им. Молотова — А. Т. Голованова, П. Г. Грудинского, Г. Н. Петрова, А. М. Федосеева и М. Г. Чиликина (главный редактор). Допущен быв. Министерством высшего образования СССР в качестве учебного пособия для энергетических и электротехнических институтов и факультетов. 640 стр., ц. 41 руб. 55 коп. Госэнергоиздат, 1952.

Инициатива коллектива научных работников МЭИ по выпуску справочника-пособия является весьма ценной.

В книге три части: общие сведения, электротехнические материалы и оборудование; производство, передача и потребление электрической энергии.

Часть первая (Общие сведения) содержит данные об истории электротехники, разделы математики, физики, теоретических основ электротехники, раздел о графических и буквенных обозначениях.

Часть вторая (Электротехнические материалы и оборудование) содержит ряд разделов об электротехнических материалах — изоляционных, проводниковых, магнитных и т. д., а также разделы, касающиеся электрических машин, аппаратов, ионных выпрямителей и т. п.

Часть третья (Производство, передача и потребление электрической энергии) содержит большое число разделов — схемы и распределительные устройства электрических станций, электрические сети, электроснабжение, электропривод, релейная защита, токи короткого замыкания, техника безопасности и т. д.

Даже этот далеко не полный перечень отдельных разделов показывает, что рецензируемый справочник охватывает большой и разнообразный круг вопросов, необходимой работе.

Поскольку подобного рода издание подготовлено впервые, то, естественно, перед авторами стояли сложные задачи в части отбора необходимого материала по разным разделам справочника. Справочная книга, предназначенная специально для студентов, должна содержать полный минимум необходимых сведений по отдельным электротехническим дисциплинам, пользование которой должно освободить студентов от постоянного обращения к другой справочной литературе, зачастую весьма разрозненной.

По охвату материала, по полноте содержания, по качеству подбора и составлению справочных данных рецензируемый «Электротехнический справочник» можно сравнить лишь с общеизвестной «Справочной книгой для электротехников» (СЭТ), под редакцией М. А. Шателена, В. Ф. Миткевича и В. А. Толвинского, изданной в 1934 г.

В «Электротехническом справочнике» МЭИ отражены как теоретические, так и практические сведения, необходимые при решении вопросов проектирования и расчета электротехнических установок. Ценной чертой рецензируемого справочника является стремление коллектива авторов к сочетанию техники и экономики, что имеет большое воспитательное значение для студентов. По каждому из разделов справочника наряду с изложением теоретических вопросов приводятся каталожные данные, стоимость не только отдельных типов оборудования, но и комплектов установок, а в ряде разделов приводятся данные по расходу цветных металлов и удельным расходам электроэнергии.

Наряду с этим в справочнике имеется большое число недостатков, неточностей, местами просто ошибочных положений, что, естественно, затрудняет пользование материалом справочника и подлежит исправлению при следующих повторных изданиях, которые будут необходимы, ибо тираж книги 25 000 экз. в сравнении с потребностью в ней настолько мал, что книга с первых же дней стала библиографической редкостью.

Общий недостаток всех разделов — отсутствие достаточно полной библиографии по затронутым вопросам. Ссылки на литературу ограничены только основной учебной и руководящей литературой; совершенно не использована журнальная литература, в частности, нет ссылок на журналы «Электричество», «Электрические станции» и др.

Рассмотрим отдельные недостатки и неточности, имеющие место в «Справочнике».

В разделе 1-1 «Важнейшие памятные даты» слабо отражен послевоенный период, в частности, работа завода «Уралэлектромаш», который за последние годы вырос в один из крупнейших электромашиностроительных заводов страны. Нет совершенно упоминаний о ряде новых электромашиностроительных заводов, возникших в период Великой Отечественной войны и быстро развивающихся в послевоенные годы. Этот раздел было бы весьма целесообразно дополнить виднейшими работами в области электротехники, удостоенными Сталинских премий.

В разделе 2 «Математика» слабо отражены методы решения дифференциальных уравнений, что в настоящее время имеет весьма существенное значение при решении различных задач переходных процессов в электрических машинах и электроприводах. Жаль, что в этом разделе не нашел отражения простой и оригинальный способ решения характеристических уравнений высших степеней, разработанный научным сотрудником МЭИ О. М. Богатыревым.

По разделу 6 «Электроизоляционные материалы» имеются следующие замечания.

В § 6-1 (Диэлектрики. Термины и обозначения) приводится наименование величины ϵ , как «диэлектрическая постоянная среды», в то время как в таблице буквенных обозначений основных электрических величин для ϵ первым поставлено наименование «диэлектрическая проницаемость». Нет смысла в качестве основных применять в справочнике устаревшие наименования.

В табл. 6-1 (Физические и электрические характеристики изоляционных масел) не приведены значения ϵ и степени полярности. Нет указаний о токсичности масел, о кислотном числе. Совершенно случайный характер для справочника носят рис. 6-1, 6-2; ими, в сущности, и ограничивается справочный материал по выбору изоляционных промежутков в масле. По данному параграфу справочник не достигает цели, ибо дает лишь приближенное понятие о сортах масла, а студент на основании имеющихся материалов не может выбирать размеры изоляционных промежутков в масле.

В § 6-3 (Смола) в табл. 6-2, 6-3 нет указаний о полярности смол. Наряду с данными о полистироле и полиэтилене необходимо было дать данные и о полиизобутилене и политетрафторэтилене. Совершенно не приводятся зависимости $\tan \delta$, ϵ и μ от температуры и частоты, без которых нельзя судить об электроизоляционных смолах и правильно их выбирать.

§ 6-8 приводимые характеристики галювакса и олеовакса не отражают недостатков этих материалов, ограничивающих их применение (резкая зависимость ϵ и $\tan \delta$ от температуры, токсичность).

Непонятно значение рис. 6-13, 6-14, 6-15, ибо приведенные графики, без указания их сущности, никак не могут быть использованы в качестве фактического справочного материала.

Можно высказать сожаление, что в § 6-14 (Керамические материалы) нет указаний о конденсаторной керамике.

В целом о разделе 6 (Электроизоляционные материалы) можно заметить, что в нем достаточно подробно приведены физико-механические характеристики изолирующих материалов, но слабо отражены их электрические характеристики. В подобного рода справочнике необходимо иметь графики зависимостей пробивного напряжения в функции размера изоляционного промежутка для различных форм электрического поля, графики зависимостей μ , ϵ , $\tan \delta$ и удельных потерь от температуры и частоты, графики зависимости пробивного напряжения от температуры и т. д. Приведенные в справочнике сведения не обеспечивают проектанту возможность выбрать изоляционные промежутки и рассчитать изоляционные конструкции.

По разделу 7 «Изоляционные конструкции и изоляторы» имеются следующие замечания. В § 7-2 (Электрическая прочность воздуха и испытательные напряжения) допущено ошибочное указание о способе внесения поправки на атмосферные условия. Прочность при нормальных условиях необходимо не делить на σ , а умножить. В этом параграфе все сведения ограничены лишь электрической прочностью устройств игла — плоскость и игла — игла.

В справочнике совершенно не отражено применение различных газов в качестве электроизолирующих материалов. Нет указаний об электрической прочности газа в тонких слоях и о зависимости электрической прочности от давления.

§ 7-3 (Фарфоровые изоляторы) содержит весьма ограниченный материал; нет данных о проходных изоляторах на 35 кВ и изоляторах на напряжения ниже 6 кВ.

Изоляционные конструкции в главе совершенно не получили отражения. В § 7-4 дается описание только маслонаполненных вводов, нет совершенно сведений о конденсаторных и фарфоровых (без масла) вводах. Не дано ни одного разреза проходного изолятора, показывающего его внутреннее устройство. Не приводятся расчетных формул для определения размеров, что является необходимым при проектировании вводов.

Разделы 14—19 охватывают большой круг вопросов различного типа электрических машин постоянного и переменного тока. Основным и принципиальным недостатком этих разделов является практически полное отсутствие данных по курсовому проектированию электрических машин, ибо отдельные, отрывочные сведения, разбросанные по разным параграфам, никакой помощи при курсовом проектировании оказать не могут. В теоретической части все эти разделы можно было бы сильно сократить, ибо повторение многих элементарных положений для студентов-электриков старших курсов не вызывает необходимости.

Ряд основных обозначений (§ 14-1) нельзя признать удачными. В частности: x — режим холостого хода, постановка звездочки в качестве нижнего индекса для величин в относительных единицах и т. д.

В § 15-4 (короткое замыкание трансформатора) необходимо было указать расчетную формулу для установившегося тока короткого замыкания через номинальный ток и напряжение короткого замыкания.

На рис. 15-5 в таблице допущена опечатка, схема группового соединения ($V/y_0 = 12$).

В разделе нет формул для расчета уравнивательных токов при параллельной работе трансформаторов; нет указаний для определения механических усилий при внезапных коротких замыканиях, отсутствуют данные о специальных типах трансформаторов — нерезонирующих, сварочных и т. п.

В разделе 16 (асинхронные машины) в § 16-3 понятие о принципе устройства трехфазной асинхронной машины целесообразнее было целиком опустить из текста и заменить принципиальной схемой включения в сеть трехфазного асинхронного двигателя. Здесь же было бы уместно поместить рис. 16-16, дающий продольный и поперечный разрезы двигателя.

В этом разделе основную ценность для студентов представляют таблицы с техническими данными двигателей, которые действительно при проектировании могут быть полезны.

Раздел 17 «Синхронные машины» при краткости изложения содержит материал, который для студентов при курсовом проектировании, выполнении домашних заданий представляет значительный интерес. В частности, хорошо подобрана табл. 17-2 (параметры и постоянные времени синхронной машины).

По разделу имеются следующие замечания: нет смысла параллельно наименованию «статор» давать второе наименование «якорь», это у студентов вызовет только ненужную путаницу.

§ 17-14 (Токи короткого замыкания) целесообразно было бы объединить с разделом 42, где более детально излагается вопрос о коротких замыканиях.

Существенное значение имеет наличие всех основных технических данных, что бесспорно весьма удобно при курсовом проектировании. Досадно, что отсутствует таблица

технических показателей генераторов повышенной частоты (200 гц и выше).

В разделе 18 «Машины постоянного тока» отсутствуют данные о специальных генераторах постоянного тока поперечного поля с расщепленными полюсами. Крайне досадно, что в этом разделе нет технических данных серийных крановых двигателей, ибо таблица 18-3 при проектировании ничем не сможет помочь студентам.

Раздел 19 «Специальные машины» содержит только общие элементарные описания и в таком виде совершенно не удовлетворяет назначению справочника.

Содержание раздела 20 «Общие вопросы расчета электрических аппаратов», раздела 21 «Низковольтные электрические аппараты» и раздела 22 «Аппараты высокого напряжения» в основном удовлетворяют поставленным требованиям. Неудачен термин «низковольтные электрические аппараты», методически правильно ее озаглавить «аппараты низкого напряжения». В указанных разделах дается справочный материал по наиболее часто встречающимся вопросам проектирования электрической аппаратуры. К числу недостатков этих разделов необходимо отнести следующее.

В разделе 20 отсутствует материал по расчету постоянных магнитов. В разделе 20-2 (Расчет катушек) не дана наиболее важная для расчета формула, связывающая размеры катушки с величиной ампервитков и перегревом.

В разделах, посвященных проектированию электромагнитов, не даны зависимости коэффициента экономичности и оптимальной начальной индукции от величины конструктивного фактора $\frac{VF}{\delta_0}$, необходимые при проектировании электромагнитов.

В § 20-4 (Расчет времени срабатывания и отпущения электромагнитов) не дана формула Москвитина, дающая возможность во многих случаях просто оценить время срабатывания, в то же время излагается сложный графический метод Лысова.

В § 20-6 (Расчет дросселя насыщения на трехстержневом сердечнике) методика расчета не может быть признана удовлетворительной, так как не дает соотношений, необходимых для выбора оптимального варианта. Не уточняет расчет также и примечание, приведенное в конце параграфа.

В § 20-7 (Расчет электродинамических сил) табл. 20-5 составлена неудачно. Вместо № 5 и 6 необходимо было дать в № 4 значения моментов, далее № 9 и 10 повторяют друг друга. С другой стороны, не приводятся формулы для расчета электродинамических усилий для часто встречающихся случаев скрещивающихся проводов и проводов, лежащих в одной плоскости под углом, не равным 90°.

В § 20-9 (Контакты электрических аппаратов) вместо трех далеко не полных таблиц следовало бы дать развернутую таблицу с данными о применяющихся контактных материалах. Приведенные в справочнике сведения об эрозии недостаточны для их практического использования, по этому вопросу студентов целесообразнее отсылать к специальной литературе.

В § 20-10 (Восстановление напряжения на дуге промежутке) формула для расчета скорости восстановления напряжения дается без указаний на метод расчета f и область применения. Следовало поместить методы расчета скорости восстановления напряжения (определение частот и амплитуд), а также данные о реальных скоростях восстановления напряжения в сетях.

Раздел 21 «Низковольтные электрические аппараты», составленный весьма обстоятельно, все же следовало бы пополнить некоторыми дополнительными сведениями, например, о кнопочных автоматах, стабилизаторах напряжения, контакторах специального исполнения.

Раздел 22 «Аппараты высокого напряжения» достаточно полно и правильно освещает вопрос, правда, встречаются аппараты, не выпускаемые промышленностью, — выключатели МГ-10, ВМО.

Раздел 23 «Электротермическое оборудование» составлен явно неудовлетворительно, ибо его содержание ни в коей мере не отражает современного состояния рассматриваемой области прикладной электротехники.

По разделу 24 «Ионные выпрямители» имеют следующие замечания.

Осциллограмма формы кривой тока в первичной обмотке однофазного трансформатора будет иметь резко отличный от приведенной осциллограммы вид, если учесть намагничивающий ток. То же самое относится и к рис. 24-1. Кроме того, непонятно, зачем по оси абсцисс взят логарифмический масштаб?

Подпись рис. 24-2 правильно гласит, что он относится к двухфазной схеме, а в остальном тексте эта схема везде изымается... двухполупериодной.

На схеме, изображенной на рис. 24-9, непонятно, как происходит регулирование. Согласно приведенным на стр. 105 условным обозначениям следовало бы сопротивлению Z_1 или Z_2 обозначить переменной величиной. На рис. 24-12 надпись: «Принципиальная схема сеточного управления с пик-генератором», а в схеме есть все, кроме этого пик-генератора. Ничего не сказано по поводу того, что типовая мощность трансформатора за счет резкого изменения мощности первичной обмотки при регулировании будет резко меняться, что при инженерных расчетах надо учитывать.

По данному разделу («Ионные выпрямители») имеется одно существенное замечание о том, что существующая теория расчета мощностей обмоток, а также типовых мощностей трансформаторов, питающих вентильные преобразовательные установки, дает неправильные результаты.

Раздел 29 «Схемы электрических соединений станций и подстанций» рассматривает вопросы, связанные с выбором основного оборудования и схем электрических соединений станций и подстанций. Кратко изложена методика выбора генераторов и трансформаторов, приведена общая характеристика систем возбуждения генераторов и схем соединения станций с различными режимами выдачи электроэнергии потребителям, а также понизительных подстанций местного и районного значения. Здесь же рассмотрены вопросы состава потребителей собственных нужд станций и подстанций и их питания электроэнергией. Приведенный материал отображает разработанные советскими научными проектными организациями и практически широко применяемые решения в области схем электрических соединений станций и подстанций, обеспечивающие их высокую надежность в эксплуатации. Вместе с тем следует отметить слишком лаконичное изложение и некоторую поверхностность материала отдельных параграфов, что затрудняет его использование; так, например, из § 29-1 нельзя сделать каких-либо конкретных выводов о выборе генераторов тепловых и гидравлических станций.

В схемах соединений, к сожалению, имеются небольшие недоделки и неточности. В частности, на стр. 411 трубчатые предохранители типов ПК и ПКТ изображены как пластинчатые или пробочные. Вызывает сомнение необходимость разъединителя перед выключателем на рис. 29-24. В то же время на рис. 29-25 перед батареей конденсаторов желательна установка разъединителя.

Раздел 31 «Распределительные устройства высокого напряжения» содержит весьма ценный материал, который в сильной степени облегчит студентам курсовое проектирование.

В части конструкций открытых распределительных устройств следовало бы дать план распределительного устройства 110 кВ и указать расстояния между фазами сборных шин.

Раздел 32 «Распределительные устройства низкого напряжения» крайне беден по своему содержанию и нуждается в коренной переработке.

Материал разделов 33 «Электрические сети» и 34 «Воздушные линии электропередачи» для курсового и тем более дипломного проектирования недостаточен. В частности, не приводятся данных для проектирования дальних передач, не приводятся даже формулы для расчета индуктивного сопротивления линии с расщепленными проводами. Отсутствуют основные положения из руководящих указаний по проектированию сетей и систем, в частности: сведения о резерве мощности, сведения об условиях рассмотрения нормальных и аварийных режимов работы и т. д. Нет материалов по продольному и поперечному регулированию напряжения в замкнутых сетях. Не даны укрупненные стоимости установок статических конденсаторов, трансформаторов с регулированием напря-

жения под нагрузкой и т. д. Крайне недостаточно изложен раздел электрических систем. В нем попадают редакционные неточности. Расчетные формулы, сведенные в таблицы, даются без пояснений, без схем, для которых они справедливы, без ссылок на литературу, где дается их вывод. Такое построение справочного материала приучает студента к механическому применению формул.

Раздел 36 «Электроснабжение промышленных предприятий» содержит много практических сведений, облегчающих проектирование систем внутреннего электроснабжения. Основным недостатком раздела является то, что в нем совершенно не отражены вопросы технической политики, проводимой в области проектирования и монтажа систем электроснабжения. Нет никаких данных о критериях анализа технико-экономических вариантов при решении основных задач проектирования, а именно в этой области наиболее тесно переплетаются вопросы техники и экономики.

В разделе 37 «Электропривод» совершенно не отражены вопросы расчета мощности по нагрузочным диаграммам, не отражены новые способы непрерывного управления электроприводами.

По разделу 42 «Токи короткого замыкания» имеются следующие замечания. Недостаточно четко даны указания по составлению расчетных схем. Отмечается, что в схему вводятся все участвующие в питании короткого замыкания генераторы и все элементы связи их с местом короткого замыкания, что не согласуется с «Руководящими указаниями по расчету токов коротких замыканий».

Далее в справочнике указывается, что активное сопротивление должно учитываться только при коротких замыканиях в установках ниже 1000 в, в то время как в «Руководящих указаниях» отмечается, что активное сопротивление должно учитываться, если $R_{\Sigma} > \frac{1}{2} X_{\Sigma}$.

В § 42-3 указано, что сопротивление намагничивания трансформаторов для токов нулевой последовательности можно полагать $X_{\mu 0} = \infty$, что не всегда является справедливым.

В разделе 44 «Атмосферные перенапряжения и защита от перенапряжений» достаточно полно изложены основные материалы, необходимые для проектирования грозозащиты линий и подстанций. По этому разделу необходимо сделать следующие замечания.

Расчет расстояния в середине пролета построен в предположении, что волновое сопротивление молнии равно 180 Ом (половине волнового сопротивления троса, так что волна без отражения переходит на трос). Руководящие указания по защите от перенапряжений рекомендуют принимать 300 Ом, при котором расчетные расстояния возрастают на 25%. Целесообразность расчета расстояний между тросом и проводом в середине пролета по волне с косугольным фронтом сомнительна. Расчет по волне с косугольным фронтом проще и, вероятно, более соответствует физической картине явлений для этого случая. При равных средних крутизнах фронта тока молнии такой расчет дает в 1,5 раза меньшие расстояния (одинаковыми они получаются лишь при равных максимальных крутизнах). При малой вероятности поражения середины пролета (высота мала, напряжение в тросе снижается по мере удаления точки поражения от середины пролета) даже уменьшение расстояния между проводом и тросом на 30–35% прогиб приведенных в табл. 44-2 не вызовет заметного повышения общего числа отключений.

Правильное указание о целесообразности принимать за число поражений опоры половину всех поражений линий, но следовало указать, что определение удельного числа отключений требует также учета отключений из-за непосредственного поражения проводов, линии.

В случае выполнения линий с некоторой вероятностью перекрытия в пролете (что вполне допустимо) следует также учитывать и число отключений от перекрытий в пролете, считая, что примерно 20% от всех поражений линии приходится на опасную в этом случае зону.

Расчет защитного действия линий на деревянных опорах рекомендуется производить, только исходя из опасности перекрытия между фазами. Между тем для линий 110 кВ число перекрытий на землю, без перекрытий между фазами может быть значительно, снижая число отключе-

ний из-за меньшего коэффициента перехода импульсного перекрытия в силовую дугу. При наличии подкосов практически все перекрытия происходят на землю. Это следовало указать и учесть при определении числа отключений.

Целесообразно было привести эмпирические формулы М. В. Костенко для определения вероятности непосредственного поражения проводов, защищенных тросом, вероятности перехода импульсного перекрытия в силовую дугу; они удобны для студенческих работ, так как освобождают

от необходимости при расчетах иметь под рукой справочник с графиками.

В заключение еще раз необходимо отметить, что все перечисленные недостатки, вполне устранимые при повторном издании, хотя и снижают методическую ценность справочника, но все же в целом рецензируемая книга является весьма ценным и полезным справочным руководством и будет полезна не только студентам, но и инженерно-техническим работникам.

Бригада научных работников Уральского политехнического института им. Кирова:
Н. С. СИУНОВ, М. М. АКОДИС, Д. Е. ТРОФИМЕНКО, В. Г. СТЕПАНОВ, В. Е. ПОЛЯКОВ,
М. В. БЕЛЯЕВ, О. П. СИТНИКОВ, П. А. КРИЧЕНОВА, М. Г. ЧИСТОСЕРДОВ, Б. В. ПЕРЬ-
ПЕЛОВ, Я. И. ДРОБИНИН

Ю. И. АНОСОВ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МУФТЫ (КОНСТРУКЦИИ И СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ). 72 стр., ц. 2 руб. 30 коп. Государственное издательство оборонной промышленности, Москва, 1952.

Электромагнитные муфты, первоначально служившие лишь средством для соединения двух валов, в настоящее время получили множество разнообразных применений в промышленности и стали одним из важных элементов автоматизации электрических установок. Вопросы, связанные с конструированием, исследованием и применением электромагнитных муфт, составляют своеобразную область электротехники, не получившую до сих пор, насколько известно, исчерпывающего освещения в каком-либо едином труде или учебном руководстве. Известны лишь отдельные статьи по вопросам электромагнитных муфт, рассеянные в отечественных и зарубежных технических журналах.

Небольшая книга Ю. И. Аносова является первой попыткой дать систематизированное и сводное изложение вопросов электромагнитных муфт в книге, которая, однако, по своему объему может служить лишь введением в соответствующую область. Заглавие книги не совсем точно и шире ее содержания, так как книга посвящена только электромагнитным муфтам трения и совершенно не затрагивает электромагнитных асинхронных муфт или муфт с кольцами.

Несмотря на малый объем книги, автору удалось осветить в ней основные расчеты муфт, их конструкции (включая много оригинальных систем муфт, известных только из патентных материалов), схемы управления муфтами и их применения. Отдельную главу составляют вопросы переходных процессов в приводах с электромагнитными муфтами.

Книга содержит краткие сведения и о новом направлении в области электромагнитных сцепных муфт, выражающемся в создании и развитии муфт с магнитодиелектриком, в частности, жидкостных магнитных (гидромагнитных) муфт. Однако автор не отразил новейшие достижения в конструировании жидкостных магнитных муфт; это можно объяснить довольно быстрым развитием данной области техники. Не описаны, например, асинхронные короткозамкнутые двигатели с встроенной гидромагнитной муфтой, получающей возбуждение постоянным током без помощи контактных колец, т. е. трансформаторным путем, с соответствующим сухим выпрямителем.

Следовало дать больше примеров применения электромагнитных муфт в различных отраслях отечественной промышленности, а также подчеркнуть, что русские техники уже давно смело внедряли такие муфты в машиностроении и электроприводе. Например, известно применение еще во время войны 1914—1918 гг. электромагнитных муфт на русском флоте для точной остановки электропривода минных элеваторов.

Автор ограничивается расчетом только дисковой электромагнитной муфты и притом дает его в общем виде, не иллюстрируя числовым примером. Это следует признать

пробелом, так как на практике часто возникает необходимость в расчете и изготовлении электромагнитной муфты собственными средствами. В таких случаях наличие примерного числового расчета могло бы оказать читателям существенную помощь.

Раздел, касающийся применения электромагнитных муфт («схемы управления муфтами»), построен весьма схематично. Многие применения здесь упомянуты лишь одним словом, тогда как более подробное описание позволило бы полнее раскрыть возможности электромагнитных муфт. Например, следовало бы поместить краткое описание работы электромагнитных муфт в автоматизированных копировально-фрезерных станках, применения электромагнитных муфт в электроприводах для точной остановки и др.

Ссылка на существование электромагнитной муфты «для вентилятора доменной печи мощностью в 30 000 л. с.» является неполной и неточной, так как для суждения о величине муфты требуется еще указание числа ее об/мин. Кроме того, остаются неясными: тип муфты и ее функция в данной установке. Поэтому такая скупая ссылка в книге не имеет смысла.

Вообще материал, содержащийся в книге, требует большей конкретизации. Это является общим упреком по адресу книги. Все приведенные в ней конструкции муфт не снабжены размерами и весами, что не позволяет читателю получить реальное представление о габаритах муфт и о возможности их конструктивного сочетания с машинами. В табл. 6 (стр. 39) с параметрами одной серии муфт также отсутствуют указанные выше данные о муфтах; не приведены передаваемые муфтами крутящие моменты, чем таблица обесценивается. Кроме того, табл. 6 относится только к малым муфтам; таблицы же по муфтам больших типов в книге вообще нет.

При всем этом книга принесет известную пользу широким кругам техников как материал, пропагандирующий применение электромагнитных муфт и могущий служить толчком для новых идей и работ советских конструкторов в этой области.

Книга Ю. И. Аносова должна привлечь внимание и к общему вопросу об организации серийного производства электромагнитных муфт трения на заводах электропромышленности.

В заключение следует высказать пожелание о том, чтобы было подготовлено издание специальной книги и по другому виду электромагнитных муфт, имеющему важное промышленное значение, — по электромагнитным муфтам с кольцами.

Доктор техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР