

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1946



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

2

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР
И НАРОДНОГО КОМИССАРИАТА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

СОДЕРЖАНИЕ

К новым задачам послевоенного развития энергетики основных районов СССР	3
<i>Б. Е. Веденев</i> — Молотовская область — энергетическая база Урала	5
<i>В. И. Вейц</i> — Основные вопросы энергетического баланса и направления развития энергостроительства Западного Урала	9
<i>С. М. Брагин</i> — Высоковольтный кабель постоянного тока	16
<i>В. П. Вологдин</i> — От лейденской банки до конденсатора будущего	20
<i>Р. М. Кантор</i> — Коммутационные перенапряжения при отключении линий, работающих в режиме холостого хода	25
<i>В. А. Трапезников</i> — Обобщенные условия соразмерности трансформаторов и электрических машин	31
<i>Ф. А. Горяинов и Г. К. Салгус</i> — К расчету амплитудного генератора	37
<i>Л. М. Пиотровский</i> — Геометрическое место токов асинхронной машины с переменным насыщением стали	42
<i>А. Б. Иоффе</i> — О коммутации тяговых двигателей при неустановившихся режимах	45
<i>К. А. Андриялов, Э. И. Пюрговская, С. В. Шишкин</i> — Новая изоляция электрических машин	49
<i>М. А. Гаврилов</i> — Методы синтеза релейно-контактных схем	54
<i>К. М. Поливанов</i> — Теорема вариации параметров линейной электрической цепи	60
<i>М. И. Левин</i> — Общи: свойства измерительных схем	63
<i>В. Г. Холмский</i> — Питание разомкнутых электрических сетей по схеме независимых нитей	66
<i>В. В. Бургсдорф</i> — Расчет тока и времени плавления гололеда на линиях электропередачи	69
<i>В. А. Веников и С. А. Ульянов</i> — Упрощенный метод расчета токов короткого замыкания с учетом качаний генераторов	73
<i>В. С. Комельков</i> — Синхронизация импульсных схем заторможенным искровым разрядом	75
<i>И. Е. Бальвин</i> — О некоторых физических процессах в 35 kV кабелях в связи с частичными пробоями изоляции	77
Хроника	79
Стандарты	91
Рефераты	92



И
ВКА

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик **Б. Е. Веденеев** (отв. редактор), член-корр. АН СССР
А. И. Берг, доктор техн. наук, проф. **Ю. В. Буткевич**, доктор техн. наук,
проф. **А. А. Глазунов**, член-корр. АН СССР **М. П. Костенко**, академик
В. Ф. Митневич, академик **Н. Д. Палалекси**, доктор техн. наук, проф.
Г. Н. Петров, канд. техн. наук **И. А. Сыромятников**, инж. **А. И. Товсто-**
палов, член-корр. АН СССР **М. А. Шателен**.
Ответственный секретарь инж. **Я. А. Климовицкий**

Адрес редакции: Москва, проезд Владимирова, 4, тел. К 5-21-22.
Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

К новым задачам послевоенного развития энергетики основных районов СССР

Вопросы энергетики на конференции по изучению производительных сил Западного Урала

26 ноября — 1 декабря 1945 г. в г. Молотове работала конференция, организованная Академией наук СССР и Исполнительным комитетом советов депутатов трудящихся Молотовской области по изучению производительных сил Западного Урала. В работах конференции участвовало около 1 500 человек: виднейшие ученые страны, руководящие инженерно-технические работники отдельных отраслей промышленности, транспорта, сельского хозяйства, местные научные работники, инженеры и хозяйственники Урала. На обсуждение конференции были вынесены результаты обширных исследований, проведенных в 1945 г. в научно-исследовательских институтах, в наркоматах и в самой области.

Труды этой конференции имеют значение, далеко выходящее за пределы одного района.

Эта была первая в условиях мирного времени большая конференция работников науки и практики, посвященная обсуждению коренных проблем послевоенного развития одного из важнейших районов страны. Партия, правительство и лично товарищ Сталин постоянно уделяли и уделяют огромное внимание росту производительных сил Урала. Урал, как известно, был в годы Великой Отечественной войны основным арсеналом, снабжавшим фронт всеми видами вооружения и боеприпасов. Исключительно богаты перспективы развития Урала, как одного из ведущих индустриальных районов страны и в послевоенные годы; все растущее значение в экономике Урала и страны в целом приобретают производительные силы Западного Урала (Молотовская область).

Энергетика имеет весьма большое значение для дальнейшего подъема производительных сил Урала и, в частности, Западного Урала.

Структура и качественные характеристики энергоресурсов Западного Урала в сочетании с другими природными ресурсами выдвигают Молотовскую область как один из *ведущих энергохимико-металлургических центров страны*: вместе с тем исключительно богатые гидроэнергоресурсы выдвигают Молотовскую область как *одну из важнейших энергетических баз Урала в целом*.

За годы войны мощность и электробаланс Уральской энергосистемы примерно удвоились,

а по Молотовской области увеличились примерно на одну треть. Уральская энергосистема смогла обеспечить растущие потребности военной промышленности в электроэнергии и освоение многочисленных эвакуированных предприятий, которые разместились на всем протяжении трансуральской электрической сети. Однако темпы развития промышленности Урала были значительно выше темпов развития энергетики. Необходимость всемерного форсирования роста энергетической базы Урала в послевоенные годы определила особо важное место, которое заняли проблемы энергетики в работах конференции.

На пленуме конференции был заслушан доклад академика Б. Е. Веденеева «Молотовская область — энергетическая база Урала»*. Задача подъема энергетики Западного Урала была остро поставлена и в докладах секретаря Молотовского обкома ВКП(б) И. И. Гусарова «Природные экономические ресурсы и перспективы развития хозяйства Молотовской области» и члена Госплана СССР А. Н. Лаврищева «Роль Молотовской области в хозяйстве Урала и Советского Союза».

Научно-технические проблемы и перспективы развития энергетики Западного Урала были подробно обсуждены на энергетической секции конференции, работавшей под председательством академика А. В. Винтера. В работе секции были использованы исследования по энергетике Урала, проведенные в Энергетическом институте им. Кржижановского Академии наук СССР. Результатам этих исследований был посвящен доклад члена-корреспондента Академии наук СССР В. И. Вейц «Основные вопросы энергетического баланса и направление развития энергохозяйства Западного Урала»*.

Особо важная роль в развитии электрохозяйства Молотовской области и всего Урала принадлежит освоению гидроэнергоресурсов реки Камы и ее притоков.

Гидроэнергетические ресурсы Молотовской области составляют 44% от гидроэнергоресурсов всего Урала и Башкирии. А между тем современное состояние электроснабжения Молотовской области находится в явном противоречии с

* Извлечение из доклада печатается в этом номере.

энергетическими ресурсами. Электробаланс области в настоящее время дефицитен. Основной причиной неудовлетворительного состояния электроснабжения области является неиспользование богатых гидроэнергетических ресурсов наряду с медленным темпом расширения теплоэнергетической базы.

Постройка каскада гЭС на р. Каме изменит энергетический баланс не только Молотовской области, но и всех районов Урала. Большое количество гидроэнергии пойдет в те районы, которые в значительной степени пользуются привозным углем.

Следует особо отметить, что в перспективе освоения Камского каскада гидроэлектростанций важную роль может иметь практическое разрешение проблемы передачи электроэнергии постоянным током высокого напряжения.

Ввод в эксплуатацию камских гидроэлектростанций не только повысит надежность и экономичность Уральской энергосистемы в целом, но будет способствовать еще более быстрому подъему народного хозяйства всего Урала.

Вопросам гидроэнергетики были посвящены доклады академика А. В. Винтера «Гидроресурсы Молотовской области и их использование», инж. Б. К. Александрова «Молотовская гЭС и задачи ее строительства» проф. М. М. Гришина «Перспективы строительства Соликамской и средних гЭС Молотовской области» и инж. А. А. Твердислова «Влияние камских гЭС на речной транспорт и условия судоходства». Вопросы энергетики и электрификации нашли широкое отражение в других докладах.

Вопросы добычи кизеловских углей были освещены в докладе начальника комбината «Мо-

лотовуголь» И. Н. Кратенко — «Перспективы развития кизеловского угольного бассейна и его техническое перевооружение». Текущим вопросам развития Молотовской электросистемы было посвящено сообщение инж. Е. П. Шлопова (Молотовэнерго).

Кроме того были заслушаны доклад начальника технического отдела Главсельэлектро Наркомзема СССР инж. А. П. Златковского и сообщение кандидата сельскохозяйственных наук А. Г. Захарина (ЭНИН АН СССР), посвященные развитию электрификации сельского хозяйства области. Вопросы электрификации железных дорог были освещены в докладе академика В. Н. Образцова и члена научно-технического совета НКПС С. И. Ярцева. Вопросы развития новых энергопромышленных районов были поставлены в докладе зам. председателя Молотовского облисполкома кандидата экономических наук В. Ф. Тиунова «Вишеро-Печорский район и комплексное его освоение».

Материалы конференции с неопровержимостью доказали, что со стороны энергетических ресурсов нет никаких ограничений к всестороннему развитию производительных сил Западного Урала, который имеет все необходимые предпосылки, чтобы стать одним из передовых районов страны по уровню энерговооружения.

Значение трудов конференции определяется не только фактом высококвалифицированного анализа путей развития энергетики одного из важнейших районов страны, но и актуальностью поставленных вопросов для развития энергетики многих других районов в новой послевоенной пятилетке.



Молотовская область — энергетическая база Урала

Академик Б. Е. ВЕДЕНЕЕВ

В период Великой Отечественной войны Урал стал основным тыловым промышленным районом и мощным арсеналом, непрерывно увеличивавшим поток вооружения и боеприпасов для фронта. Быстрому развитию хозяйства Урала способствовали следующие основные условия: во-первых, наличие мощной производственной базы, созданной на Урале за годы сталинских пятилеток; во-вторых, наличие огромного количества полезных ископаемых Урала; в-третьих, его географическое положение — удаленность Урала от западных и восточных границ СССР.

Распределение электрических нагрузок Урала между отдельными областями характеризуется следующими цифрами (округленно):

Молотовская	24%
Челябинская	33%
Свердловская	43%
	100%

Такое распределение электрических нагрузок останется примерно и после войны. Из этого следует, что электропотребление Восточного Урала примерно в 3 раза больше — Молотовской области. Поэтому, рассматривая Молотовскую область, как энергетическую базу Урала, надо иметь в виду необходимость значительной передачи энергии на Восточный склон Урала. Для анализа этого вопроса следует прежде всего рассмотреть энергетические ресурсы Молотовской области.

В Молотовской области расположен крупнейший и наиболее важный из всех угольных бассейнов Урала — Кизеловский угольный бассейн. Активные угольные его запасы, т. е. запасы действующих и строящихся шахт и разведанных резервных участков, по данным на 1943 г. определяются по категориям А₂ + В в огромном количестве при глубине залегания до 300 м. По геологическим своим запасам Кизеловский бассейн занимает первое место среди угольных бассейнов Урала. Добыча кизеловского угля в 1945 г. на

В статье, представляющей извлечение из докладов автора на конференции Академии наук СССР по изучению производительных сил Молотовской области (в ноябре 1945 г.), освещаются: структура энергетических ресурсов Молотовской области и их значение для электроснабжения Урала; основные характеристики каскада Камских гэс и очередность их строительства в сочетании со строительством средних и небольших гэс.

25% выше, чем в 1941 г.; в ближайшее пятилетие следует ожидать дальнейшего примерно полуторного роста добычи кизеловских углей.

Около 30% кизеловского угля идет на Губа-

хинскую и Ново-Тагильскую обогатительные фабрики, так как кизеловский уголь является на Урале единственно пригодным для коксования. Кроме промышленных предприятий и электрических станций, кизеловский уголь широко потребляют и железные дороги. Топливной базой вновь строящихся электростанций должны служить отходы обогащения кизеловских углей и многозольные кизеловские угли — матовики. Добыча многозольных углей может составить около 20% от общей добычи угля.

На самом Восточном Урале имеются два буроголивых бассейна: Челябинский и Богословский. В Челябинском бассейне следует ожидать в ближайшее пятилетие примерно удвоения добычи по сравнению с довоенным уровнем, но этот прирост составит всего 15—20% по сравнению с современной добычей. Ограничивающим фактором выступает относительный недостаток детально разведанных угольных запасов.

Следует заметить, что калорийность челябинских углей в среднем на 30% ниже калорийности кизеловских углей.

Исключительно высокий темп развития получает в послевоенные годы Богословский бассейн (пятикратный рост по сравнению с довоенным уровнем). Калорийность богословских углей примерно в 1,5 раза ниже калорийности кизеловских углей.

Уровень добычи кизеловских углей в единицах условного топлива заметно выше соответствующей добычи в других бассейнах Урала. Кизеловский бассейн, однако, не может служить топливно-энергетической базой для всего Урала. Рассмотрение топливного баланса Урала на ближайшие послевоенные годы свидетельствует о высокой напряженности топливоснабжения этого индустриального района страны.

Другая картина получается, если обратиться к гидроэнергетическим ресурсам Молотовской об-

ласти. Последние составляют 44% от гидроэнергоресурсов всего Урала и Башкирии, что видно из следующих данных:

Р а й о н ы	Среднего- довая мощность, тыс. kW	Энергия среднего- дового стока рек, млрд. kWh	Удельный вес района, %
Молотовская облсть	2 110	18,5	4,0
Башкирская АССР	1 555	13,6	32,5
Свердловская область	635	5,6	13,1
Челябинская область	510	4,5	10,4
Итого	4 810	42,2	100,0

Основными наиболее мощными водотоками Молотовской области являются реки Кама, Вишера, Косьва и Чусовая, что видно из нижеследующих данных:

Название реки	Среднего- довая мощность, тыс. kW	Энергия среднего- д вого стока, млрд. kWh	Удельный вес, %
Кама	887	7,8	42,0
Вишера	254	2,2	12,0
Косьва	162	1,3	7,7
Чусовая	122	1,1	5,9
Остальные реки	675*	6,1	32,4
Итого	2 100	18,5	100

Для того чтобы оценить количество энергии, которое может быть получено при использовании энергии среднегодового стока на гидроэлектростанциях, надо учесть: во-первых, неполное использование стока рек; во-вторых, неполное использование их падения, и, в-третьих, потери при преобразовании в электрическую энергию.

Наиболее полно использование стока и падения может быть осуществлено на р. Каме, где можно построить каскад из трех станций с водохранилищами, подпирающих друг друга.

На остальных реках положение с использованием стока и падения значительно хуже. В общем, ориентировочно можно оценить возможность производства гидроэнергии в области в следующих цифрах (млрд. kWh):

ГЭС на р. Кама	5,5—6,0
ГЭС на остальных реках	3,5—5,0
Всего	9,0—11,0

Современное состояние электроснабжения Молотовской области находится в явном противоречии с ее энергетическими ресурсами. Самая богатая по своим гидроэнергоресурсам область имеет наименее благоприятное состояние энергообеспечения. Электробаланс области дефицитен. Область получает электроэнергию из Свердловской системы по линии передачи Н. Тагил — Тура — Чусовая — Молотов.

Основной причиной такого неудовлетворительного состояния электроснабжения области является неиспользование богатых гидроэнергетических ресурсов наряду с медленным темпом расширения теплоэнергетической базы области.

Генеральная схема электроснабжения Молотовской области должна исходить из следующих основных положений:

1. Молотовская область должна являться областью, полностью обеспечивающей свои нужды в электроэнергии и выдающей энергию на Восточный склон Урала (в Свердловскую и Челябинскую области).

2. Основой энергетики области должен явиться каскад из трех крупных ГЭС на р. Каме — Соликамской, Молотовской и Восткинской. Одновременно должны строиться менее крупные ГЭС для работы в Уральскую энергосистему и ряд мелких колхозных ГЭС.

3. Тепловые электростанции должны развиваться в основном на использовании отходов углеобогащения и многозольных углей, так называемых «матовиков». В центрах потребления тепла должны получить развитие теплоэлектроцентрали.

Из Камского каскада должна в первую очередь строиться Молотовская ГЭС.

Молотовский гидроузел проектируется на Каме, выше г. Молотова, в 18 км выше железнодорожного моста и в 1,5 км ниже впадения р. Чусовой в Каму.

Постройка Молотовского гидроузла сложна, так как сооружение гидроузла расположено на сильно загипсованной толще. Это обстоятельство потребовало длительных геологических изысканий и длительной проектировки. Начало проектно-изыскательских работ по гидроузлу относится к 1933 г. Но только к 1937 г. был окончательно оформлен технический проект и смета к нему.

В 1938 г. начатые работы по Молотовской ГЭС были приостановлены в связи с решением строить в первую очередь Соликамскую ГЭС. Проектное задание Соликамской ГЭС было рассмотрено и утверждено Советом научно-технической экспертизы Госплана СССР в 1940 г., но к сооружению Соликамской ГЭС не было приступлено.

В 1942 г. инж. Б. К. Александров предложил другой проект Молотовского узла, сильно отличающийся от проекта 1937 г.

Основное отличие проекта 1942 г. заключается в подъеме на 16 м основания сооружений, благодаря чему сооружения основаны на вапновой толще. Этого удалось достичь изменением типа ГЭС. В новом проекте ГЭС совмещена с водосливной плотиной; число агрегатов увеличено (до 24), а мощность каждого из них уменьшена в 3 раза (21 тыс. kW). Благодаря такому решению противифльтрационные мероприятия сильно упростились и ограничиваются мероприятием в пределах понура плотины. Благодаря этому удалось избежать мерзлотной завесы.

Другое изменение касается судоходного шлюза. Он сделан в две нитки шестикамерный, что тоже значительно снизило объем выемки и бетона по нему.

Водосливная гидростанция запроектирована в двух вариантах с турбогенераторами на вертикальном валу и с турбогенераторами с горизонтальным валом. Общая установленная мощность

гэс — 504 тыс. кВт. Мощность первой очереди — 380 тыс. кВт. Дальше следует русловая земляная плотина, затем две нитки шлюза и, наконец, пойменная плотина.

Ниже приведены основные технико-экономические показатели Молотовской гэс, которая на первом этапе до постройки следующих гидроузлов, должна будет работать изолированно (цифры относятся к I очереди):

Установленная мощность I очереди — 380 тыс. кВт.

Выработка энергии в средний год — 1 750 млн. кВт·ч.

Обеспеченная мощность:

а) в средний год	155 тыс. кВт
б) при 90% обеспеченности	120 тыс. кВт
в) при 99% обеспеченности	86 тыс. кВт
Капиталовложения, включая шлюз	1 154 млн. руб.
То же (без шлюза)	986 млн. руб.
Удельные капиталовложения (без шлюза) на 1 кВт·ч	0,56 руб.

Дальнейшее развитие мощности Молотовской гэс до 504 тыс. кВт будет связано с постройкой вышележащей Соликамской гэс.

По условиям электробаланса Южного Урала следующей за Молотовской следовало бы строить Всткинскую гэс, которая может быть готова к эксплуатации в 1955—1956 гг. Расстояние от Воткинской гэс, расположенной у южной границы Молотовской области, до Челябинска составляет около 500 км. Передать на такое расстояние энергию этой гэс можно будет постоянным током, так как разрешение проблемы передачи постоянным током в настоящее время сильно продвинулось вперед и можно рассчитывать, что к 1955—1956 гг. эта задача будет решена в промышленном масштабе. Но даже если передача постоянным током больших мощностей к тому времени не будет еще освоена, то можно будет передать энергию переменным током под напряжением около 300 кВ, так как по пути можно будет построить на р. Уфе Верхне-Ямбайскую гэс. Эта гэс по предварительным данным имеет следующую характеристику:

Установленная мощность	6 тыс. кВт
Обеспеченная среднесуточная мощность	34 тыс. кВт
Выработка энергии в средний год	406 млн. кВт·ч
Капиталовложения	295 млн. руб.
Удельные капиталовложения на 1 кВт·ч	0,75 руб.

Расстояние от этой гэс до Воткинской составляет кругло 230 км и до Челябинска — 270 км. Эти расстояния вполне устраивают передачу переменным током с напряжением порядка 300 кВ. Поэтому нет препятствий для постройки Воткинской гэс, тем более, что она может снабжать электроэнергией Казанский район, Шуевск и Воткинск.

Створ Воткинского гидроузла выбран в 4 км ниже дер. Тама и в 610 км от устья Камы.

Состав гидроузла и расположение сооружений от правого берега к левому следующий: правобережная пойменная плотина, шлюз, второй участок пойменной земляной плотины с примыкающей к нему повысительной подстанцией, водосливная гэс (аналогичная Молотовской) и рус-

ловая плотина, переходящая на пойму левого берега. Водосливная гэс длиной 342 м имеет 24 агрегата общей установленной мощностью в 504 тыс. кВт. Судходный шлюз шестикамерный откосного типа.

Предварительная технико-экономическая характеристика этого узла, составленная на основании схематической проектировки, следующая:

Отметка верхнего бьефа гидроузла	89,0 м
Установленная мощность	420 тыс. кВт
Выработка электроэнергии в средний год	2,1 млрд. кВт·ч
Обеспеченная мощность:	
а) в средний год	190 тыс. кВт
б) при 90% обеспеченности	160 тыс. кВт
Капиталовложения:	
а) включая шлюз	1 045 млн. руб.
б) без шлюза	857 млн. руб.
Удельные капиталовложения на 1 кВт·ч (без шлксз)	0,41 руб.

С учетом затрат на Верхне-Ямбайскую гэс удельные капиталовложения в среднем по обеим гэс составят 0,47 руб. на 1 кВт·ч.

Таким образом средние удельные капиталовложения по этим двум гэс будут примерно соответствовать удельным капиталовложениям в Молотовскую гэс.

Последним и завершающим этапом по сооружению каскада гэс будет сооружение Соликамского гидроузла.

Проектное задание, составленное до войны «Гидростроем» НКВД, предусматривало отметку верхнего бьефа в 135 м. В Совете научно-технической конференции Госплана СССР была утверждена отметка верхнего бьефа в 132,0 м. К постройке Соликамской гэс не было приступлено. Не был подготовлен и технический проект. «Гидростройпроект» НКВД представил в 1943 г. новый проект, с отметкой верхнего бьефа в 125,0 м, с уменьшенным водохранилищем и предлагал его строить в первую очередь, вместо Молотовского гидроузла. Но при рассмотрении этого проекта в Госплане СССР было отдано предпочтение постройке Молотовского гидроузла.

Состав Соликамского гидроузла и расположение сооружений от правого берега к левому следующее: русловая земляная плотина, гэс, совмещенная с водосливной плотиной, судходный шлюз и левобережная пойменная плотина.

Постройка Соликамского гидроэнергетического узла сопряжена с длительными дополнительными геологическими изысканиями и лесосводкой на громадной площади затоплений. Кроме того придется переносить Вишерский бумажный комбинат. Поэтому его трудно намечать к постройке вслед за Молотовской гэс и придется им завершить постройку каскада из трех гидроэлектростанций.

Основной вопрос, который необходимо будет разрешить во время проектировки этого гидроузла, является отметка верхнего бьефа. В проектном задании Соликамского гидроузла подпорная отметка была принята равной 135,0 м. При этой отметке полный объем водохранилища определится равным 47 км³, при полезном объеме его в 25 км³, т. е. немного меньше среднегодово-

го стока в створе гидроузла. При проектной отметке (132,0 м) полный объем водохранилища составляет 31,0 км³, а полезный — 20 км³ или кругло 75% от среднегодового стока.

Снижение в проектном задании 1943 г. подпорной отметки гидроузла до 125,0 м и полезного объема водохранилища до 6,75 км³ резко уменьшает регулирующее значение Соликамского водохранилища. Тем самым Соликамская гЭС теряет самое ценное свое качество. Это иллюстрируют ниже приводимые показатели каскада Камских гЭС для различных отметок Соликамского водохранилища, а именно: 125,0 м, 128,0 м, 132,0 м.

I. Годовая выработка электроэнергии млн. kWh			
Соликамская гЭС	860	1 100	1 400
Молотовская гЭС	1 976	1 980	2 050
Воткинская гЭС	2 428	2 500	2 550
Всего:	5 264	5 580	6 000
II. Обеспеченная мощность в год — 90% обеспеченности (тыс. kW)			
	385	440	492
III. Капиталовложения без шлюзов (млн. руб.)			
по Соликамской гЭС	683	876	1 110
по Молотовской гЭС	961	931	931
по Воткинской гЭС	936	936	936
	2 580	2 773	3 067
V. Удельные капиталовложения (руб.)			
а) на 1 kWh	0,49	0,50	0,50
б) на 1 kW обеспеченной мощности	6 700	6 300	6 110

Эти данные показывают, что оптимальная отметка водохранилища близка к 128,0 м. При этом средние удельные капиталовложения не превосходят 0,50 руб. на 1 kWh, что характеризует Камский каскад, как весьма эффективный.

Параллельно со строительством Камского каскада гидроэлектростанций должно идти строительство средних и небольших гЭС и совсем мелких гЭС колхозного типа.

Из средних гЭС можно назвать Широковскую гЭС, которая вступит в строй в 1946 г. и будет давать 125 млн. kWh энергии. Вслед за ней должна строиться Нижне-Широковская гЭС, которая будет давать 38 млн. kWh.

Далее желательно построить Кумышскую и Поньшскую гЭС на р. Чусовой, которые могут дать 165 + 105 = 270 млн. kWh. К ним можно прибавить Вашкурскую гЭС, которая может дать 56 млн. kWh.

Всего эти пять гЭС могут дать около 1/2 млрд. kWh, удельные капиталовложения по этим гЭС значительно выше, чем по гЭС Камского каскада — 1—1,5 руб. на 1 kWh против 0,5 руб. на 1 kWh в среднем по гЭС Камского каскада.

Когда будет осуществлена эта программа строительства гЭС, то будет использовано около 65% гидроэнергетических ресурсов области.

Появление мощных гЭС на Урале вызовет значительное увеличение электросетевого строительства с переходом на более высокие напряжения. Молотовская гЭС должна быть связана со Средним Уралом линиями электропередачи на напряжении 220—230 kV. На это же напряжение будет работа в систему и Соликамская гЭС. Для связи с Южным Уралом Воткинской гЭС можно применить то же напряжение, если одновременно с Воткинской будет строиться Верхне-Ямбайская гЭС, либо постоянный ток, если к тому времени будет полностью освоено применение его для передачи электроэнергии на дальние расстояния.

Постройка каскада гЭС на р. Каме изменяет энергетический баланс не только Молотовской области, но всех районов Урала, в первую очередь Свердловской области, очень бедной ресурсами гидроэнергии. Большое количество гидроэнергии пойдет в эти районы, которые в значительной степени пользуются привозным углем. Ввод в эксплуатацию Камских гЭС резко повысит надежность и экономичность Уральской энергосистемы, что в целом будет иметь огромное значение для развития народного хозяйства всего Урала.



Основные вопросы энергетического баланса и направление развития энергохозяйства Западного Урала

Член-корреспондент Академии наук СССР В. И. ВЕЙЦ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Западный Урал является наиболее богатым по энергетическим ресурсам районом Урала. Выявленные на его территории энергетические ресурсы составляют около $\frac{2}{3}$ по углю и гидроэнергии и около $\frac{1}{2}$ по торфу и древесине от общих

уральских запасов. Западный Урал располагает также богатыми месторождениями нефти, геологические запасы которой пока еще выявлены в небольшой степени. Рассмотрение энергетической характеристики Молотовской области в системе Урала и других районов страны (структура энергетических ресурсов, обеспеченность энергетическими ресурсами и экономичность их эксплуатации) опровергает распространное представление об органически присущей Уралу, и в том числе Молотовской области, дефицитности энергетического баланса, представление о том, что количественный и качественный недостаток энергоресурсов ограничивает полное и всестороннее развертывание производительных сил района.

По характеристикам энергообеспеченности и экономичности эксплуатации энергоресурсов Молотовская область выдвигается в первый ряд после группы районов, в которых размещены всесоюзные угольные и гидроэнергетические базы страны.

Со стороны энергетических ресурсов нет ограничений к всестороннему развитию производительных сил Молотовской области.

I

1. Изучение опыта мирового хозяйства, в частности за период войны, ярко подтверждает ведущую роль энергетики в производственной специализации отдельных районов и центров и в формировании энергопромышленных комбинатов на передовой технической основе.

Рассмотрение структуры и качественных характеристик энергетических ресурсов Западного Урала в сочетании с другими природными ресурсами позволяет определить производственную специализацию района, как одного из веду-

В статье, представляющей краткое извлечение из доклада автора на конференции Академии наук СССР по изучению производительных сил Молотовской области, освещаются: 1) энергетическая характеристика Молотовской области в системе Урала и других районов страны и особенности современного энергетического баланса области; 2) рациональное направление использования местных энергетических ресурсов; 3) направление и неотложные задачи послевоенного развития энергетического хозяйства Западного Урала.

щих энергохимикометаллургических центров страны с широко развитыми машиностроением и качественной металлургией.

Сочетание богатых гидроэнергетических ресурсов с крупными месторождениями карнолита

и доломитов, уникальными месторождениями бокситов на Северном Урале (Богословские) и возможностями в перспективе использования местных в Молотовской области источников глинозема определяет развитие производства магния, алюминия и их сплавов, электролитического кальция и некоторых других продуктов на базе отходов этих производств.

Физико-химические характеристики кизеловских углей определяют развитие широкой гаммы химических производств на основе комплексного энергохимического использования углей. Богатые ресурсы нефти, древесины, торфа в свою очередь служат основой развития в области химической промышленности.

2. Энергетика Молотовской области, как составная часть энергетического хозяйства Урала, прошла значительный путь в своем развитии.

Серьезные изменения произошли в структуре топливного баланса, в направлении использования отдельных видов топлива и в топливном режиме отдельных групп потребителей области.

Электроэнергетическая база Молотовской области, как часть Уральской электросистемы, совершенно заново создана на передовой для того периода технической основе.

В годы Великой Отечественной войны уральская электросистема обеспечила растущие потребности военной промышленности в электроэнергии, освоение в короткие сроки многочисленных эвакуированных предприятий, которые разместились на всем тысячекилометровом протяжении трансуральской сети.

В трудных условиях военного времени мощность и электробаланс Уральской системы примерно удвоились; в настоящее время Уральская

система заняла по своим масштабам и структуре ведущее место в электрохозяйстве страны и находится в первом ряду электросистем мира.

В Уральской системе параллельно работают 28 электростанций с годовым электробалансом, превышающим 10 млрд. kWh. Электровооруженность Молотовской области возросла за годы войны примерно на $\frac{1}{3}$ и составляет около $\frac{1}{3}$ установленной мощности Уральской системы.

Необходимо подчеркнуть следующие основные недостатки энергетического баланса и развития энергохозяйства Молотовской области:

а) Темпы развития энергетической базы были ниже темпов развития промышленности области как в предвоенные годы, так и в период войны. За годы сталинских пятилеток (1928—1940) промышленная продукция области выросла кругло в 12 раз, а электровооруженность области — по выработке электроэнергии — в 5 раз, добыча местных углей — в 4 с лишним раза. За военные годы (1940—1943) промышленная продукция выросла в 2,5 раза, а электровооруженность области и добыча местных топлив — кругло на $\frac{1}{3}$.

Как показывает анализ статистических рядов промышленной продукции и электробаланса по Союзу, тенденция повышения к. п. д. и снижения удельных расходов электроэнергии перекрывалась ростом электроемкости продукции: за первые две пятилетки промышленная продукция Союза выросла в 5,3 раза, а промышленный электробаланс — в 7,5 раза.

Приведенное выше соотношение темпов роста промышленной продукции и электровооруженности Молотовской области свидетельствует об относительном отставании в развитии электроэнергетической базы области.

б) В непосредственной связи с этим находится и сложившаяся диспропорция между местом, занимаемым областью в энергетических ресурсах, и местом — в энергетическом балансе Урала. Молотовская область является богатейшим районом Урала по запасам всех основных видов энергетических ресурсов. Вместе с тем ее современный энергетический баланс дефицитен и по уровню энерговооруженности она уступает другим районам Урала. Молотовская область вынуждена покрывать часть своего лимитированного электробаланса за счет станций Свердловской системы, топливноэнергетическая характеристика которых значительно менее благоприятна, чем Молотовской области.

в) В энергетическом балансе Молотовской области гидроэнергия практически по настоящее время не представлена, несмотря на достаточно благоприятные энергоэкономические показатели проектируемых электростанций различной мощности, от единиц до сотен тысяч киловатт, на Каме и ее притоках.

г) Несмотря на значительные достижения в минерализации топливного баланса, удельный вес дров продолжает оставаться еще высоким (около 20%), что по существу, во-первых, ограничивает рациональное направление использования древесных ресурсов на строительные и тех-

нологические нужды и, во-вторых, снижает производительность и экономичность энергетического хозяйства.

д) Удельный вес торфа в топливном балансе области составляет десятые доли процента в условиях благоприятного размещения ряда крупных торфяных массивов в непосредственной близости от основных промышленных центров области (Закамский, Молотовский, Соликамский) и крайней напряженности баланса отдельных сортов топлива.

е) Несмотря на заметные результаты, достигнутые в промышленной эксплуатации выявленных нефтяных месторождений, ресурсы мазута в состоянии обеспечить меньше $\frac{1}{3}$ потребности области; остальные $\frac{1}{3}$ покрываются дальнепригодным мазутом. Это не в малой степени определяется и резким отставанием газификации высокотемпературных процессов промышленности.

ж) Коэффициент полезного действия энергетических установок Молотовской области является относительно низким, что обостряет напряженность топливного баланса. Это в частности относится к электрическим станциям, которые расходуют около $\frac{1}{5}$ топливного баланса области.

В условиях напряженного топливного баланса имеет место явно недостаточное использование богатых запасов вторичных энергетических ресурсов промышленности, которые либо нерационально используются, либо вовсе теряются (коксовый газ Губахинского коксохимического завода, доменные газы Чусовского металлургического завода и др.).

з) Относительно низкий уровень энерговооружения городов и сельского хозяйства.

Рассмотрение направления послевоенного развития энергетического хозяйства области требует в качестве обязательного условия учет взаимосвязей с энергетикой Урала. Игнорирование этого условия может привести к односторонним и неправильным выводам.

II

3. Использование гидроэнергетических ресурсов Молотовской области является одной из первоочередных и неотложных задач и необходимым условием подъема энергетической базы области и Урала. Одновременно это решает ряд важных народнохозяйственных проблем Урала и страны в целом (развитие электроемких производств, освоение важных для страны водных магистралей, электрификация железнодорожного транспорта).

Выявленные проектными организациями объекты возможного строительства гЭС в Молотовской области (на Каме, Чусовой, Усьве, Косье, Вильве, Койве, всего — 21 гЭС) могут дать в среднем по водности году свыше 5 млрд. kWh, что более чем в 2,5 раза выше современного электробаланса области. Сооружение этих гЭС эквивалентно освоению нового угольного бассейна с годовой добычей около 4 млн. т углей, т. е. больше половины современной добычи углей в Кизеловском бассейне.

Определяющими являются Молотовская и Соликамская гэс, на долю которых падает около $\frac{1}{3}$ суммарной выработки выявленных объектов строительства гэс в области.

Основные энергетические вопросы использования водных сил Молотовской области сводятся к следующему:

а) В перспективной программе развития энергетики области должно быть обеспечено правильное сочетание крупных—Молотовской и Соликамской гэс—со средними и небольшими гэс. При этом должны быть учтены энергоэкономические характеристики и особенности отдельных гэс. (Попытки противопоставления этих групп электростанций несостоятельны.)

б) Первоочередной энергетической стройкой по всей системе энергоэкономических показателей является Молотовская гэс, основные характеристики которой даны в докладе автора проекта инж. Б. К. Александрова.

в) Молотовская гэс является межрайонной электроцентралью; необходимо, однако, уточнить следующие два вопроса: во-первых, направление использования электроэнергии Молотовской гэс. Например, нельзя признать правильным предложение об использовании энергии Молотовской гэс в Серовско-Богословском районе, поскольку этот район располагает богатыми запасами малотранспортабельных энергетических углей; последнее определяет целесообразность размещения энергоемких производств в данном районе; следовательно, нельзя оправдать передачу туда гидроэнергии. Во-вторых, необходимо уточнить влияние Молотовской гэс на строительную программу тепловых электростанций и высоковольтных сетей на Урале в так называемый «переходный» период (до пуска первой очереди Молотовской гэс) и на последующих этапах.

г) Окончание первой очереди Молотовской гэс должно быть одновременно началом строительства Соликамской гэс. К числу основных энергетических вопросов этой гэс относятся: выбор основных параметров (напор, мощность и др.) с учетом возможной и экономически мотивированной очередности; развитие существующих и размещение новых энергоемких производств; направление использования электроэнергии и размещение мощности в графиках объединенной Уральской системы. В непосредственной связи стоит большой значимости проблема переброски стока северных рек на Каму и Волгу (проблема повышения уровня Каспийского моря) путем сооружения объединенного Печерско-Вычегодско-Камского водохранилища.

д) Основная энергетическая задача средних и небольших гэс — участие в покрытии прироста электрических нагрузок основных промышленных узлов Молотовской области до пуска Молотовской гэс и в интервалах между пуском Молотовской, Соликамской и Воткинской гэс. Очередность строительства новых гэс небольшой и средней мощности определяется как энергоэкономическими характеристиками отдельных объектов и возможными сроками их ввода в эксплуатацию, так и в решающей степени энергетическим ба-

лансом отдельных узлов размещения гэс и Молотовской системы в целом.

Строительство в области средних гэс с капиталовложениями свыше 1,25—1,5 руб. на 1 kWh не оправдано; нецелесообразен приступ к строительству тех гэс, ввод которых в строй практически по срокам совпадает с вводом в строй крупных камских гэс. Особый интерес представляет каскад гэс на Чусовой, поскольку они наряду с энергетикой решают и задачи транспортного освоения реки Чусовой.

4. Даже при максимальном освоении гидроэнергетических ресурсов доминирующая роль в энергетическом балансе, естественно, остается за местным топливом и прежде всего за кизеловскими углями. Наряду с форсированием геолого-разведочных работ, новым шахтным строительством и дальнейшим резким повышением добычи кизеловских углей (в ближайшее пятилетие следует ожидать как минимум полуторного роста добычи по сравнению с 1945 г.) основной является проблема рационального направления использования отдельных сортов углей.

Техническая политика в этой области должна исходить из следующих основных положений:

а) Полное вытеснение из топливного баланса энергетических установок, в частности электростанций, тех сортов углей, которые по своим качественным показателям могут служить сырьем для химической и коксовой промышленности.

б) Топливный режим электростанций области должен быть ориентирован, во-первых, на многозольные сорта кизеловских углей и так называемые матовики, которые по настоящее время, как правило, не используются; во-вторых, — на отходы обогащения коксующихся кизеловских углей, а в дальнейшем и на полукоксы. Известную роль в топливном режиме электростанций должны играть и избыточные вторичные энергетические ресурсы.

Новый топливный режим электростанций окажет серьезное влияние на размещение, тип и мощность вновь проектируемых генерирующих мощностей в Молотовской области.

в) Наряду с использованием коксующихся сортов углей для коксохимической промышленности необходимо развернуть и комплексное энергохимическое использование кизеловских углей, отдельные сорта которых являются высокоценным сырьем для химической промышленности. Например, угли Скальского и Обманковского месторождений, как известно, дают летучих свыше 50%, а первичных смол свыше 20%, что резко выделяет по этим качественным показателям кизеловские угли от углей не только Урала, но и других угольных бассейнов страны.

Опыт Германии (энергохимические комбинаты Эспехайм, Бэлен, Гиршфельде) подтверждает эффективность энергохимического использования углей на базе уже освоенной техники. Необходимо форсировать комплексное энергохимическое использование тех сортов кизеловских углей, которые могут и должны стать сырьевой базой для получения жидкого топлива (бензин, керосин),

высококалорийного газа, фенолов, серы, битумов и других химических продуктов.

Одностороннее энергетическое направление использования отдельных сортов кизеловских углей, являющихся ценным сырьем для коксовой и химической промышленности, должно быть решительно осуждено.

5. При современной технике и организации торфяного хозяйства показатели капиталовложений, себестоимости и трудоемкости по торфу еще значительно уступают соответствующим показателям по углю. Было бы, однако, неправильно отсюда сделать вывод о нецелесообразности развивать торфодобычу в Молотовской области и оправдывать ничтожно малый удельный вес торфа в современном энергобалансе. Применение новой техники и организации торфяного хозяйства должно обеспечить значительное улучшение экономических показателей торфодобычи. Первоочередное направление использования торфа для газификации (в Молотове и других узлах) высвобождает наиболее дефицитное жидкое топливо и отчасти дрова в высокотемпературных процессах промышленности и в коммунально-бытовом хозяйстве. Растущее значение должны приобрести торфяные брикеты, как наиболее квалифицированное бытовое топливо, заменяя дрова. Наконец, торф в качестве котельного топлива высвобождает кизеловские угли и дрова.

Рассмотрение материалов, характеризующих исследованные торфяные массивы, их размещение и условия топливоснабжения отдельных промышленных узлов в области приводит к выводу об актуальности форсирования торфодобычи Краснокамско-Нытвенской и Молотовской групп болот, а также отдельных торфомассивов, находящихся в непосредственной близости от Соликамска, Березняков, Чусовой. Торф с последнего места должен передвинуться на второе после кизеловских углей место в топливно-энергетическом балансе области.

III.

6. Энергетика должна получить опережающий по сравнению с другими отраслями хозяйства Урала темп развития. Это основная предпосылка дальнейшего развертывания производительных сил района.

Наряду с электрификацией определяющими уровень энерговооружения факторами выступают газификация и теплофикация области.

Послевоенный рост электропотребления области определяется главным образом полным освоением производственных мощностей промышленности области в условиях отсутствия ограничений по энергии, сырью и рабочей силе; дальнейшим развитием ряда электроемких производств, базирующихся на сырьевых ресурсах области; комплексной механизацией на электрической основе трудоемких процессов; широкой электрификацией железных дорог и резким подъемом уровня электрификации коммунального хозяйства и быта населения. Как показывают проведенные в

первом приближении подсчеты, в ближайшее послевоенное пятилетие электрические нагрузки и электробаланс области должны как минимум примерно удвоиться. При этом относительно наиболее высокий темп роста должна получить коммунально-бытовая электрификация городов и электрификация железных дорог (удельный вес коммунально-бытовой электрификации в электробалансе области должен повыситься с 5% в годы войны до цифры порядка 15%).

7. Промышленность Молотовской области характеризуется относительно высокими теплоэлектрическими коэффициентами — в среднем порядка 4 кг пара в час на 1 кВт электрического максимума (в 1,5—2 раза выше, чем по промышленности Челябинской и Свердловской областей). В перспективе будет иметь место тенденция снижения теплоэлектрической характеристики промышленности за счет опережающего роста электрификации.

В Молотовской системе мощность теплофикационного оборудования составляет около $\frac{2}{3}$ суммарной установленной мощности тепловых электростанций. По удельному весу тэц Молотовская система занимает первое место на Урале.

Однако современное состояние теплофикации на Урале, в том числе в Молотовской области, не обеспечивает решения основной задачи — экономии топлива за счет снижения удельных расходов его на производство электроэнергии по сравнению с отдельной выработкой электроэнергии на конденсационных станциях и тепловой — на центральных котельных. Фактически удельный расход топлива на 1 кВт·ч на тэц Урала, и в том числе Молотовской области, во многих случаях выше соответствующего удельного расхода топлива на передовых конденсационных станциях (Усть-Боровская, Молотовская № 2, Закамская и другие тэц — в Молотовской системе, тэц Тагильского металлургического завода, Уральского вагонного завода, Красногорская и другие тэц — в Свердловской системе). Это значит, что теплофикация на Урале пока не дает того энергетического эффекта, который она могла и должна была бы давать. Главными причинами этого являются: ненормальные условия эксплуатации теплофикационного оборудования, его загрузка преимущественно по электрическому графику ввиду отсутствия энергетических резервов; незначительная загрузка отборов теплофикационных турбин (в среднем около $\frac{1}{5}$ по отопитель-

ным отборам и около $\frac{2}{3}$ по технологическим отборам) в связи с недостаточностью тепловых сетей, неподготовленностью тепловых потребителей, а в ряде случаев неправильным выбором типов оборудования (Закамская тэц, Соликамская тэц и др.); недостатки довоенного стандарта наших теплофикационных турбин и относительно низкий общий уровень эксплуатации теплофикационных систем.

Основным направлением развития теплофикации Урала в послевоенные годы является прежде всего повышение эффективности действующих

тэц, которые должны обеспечить значительную экономию топлива и одновременно повысить уровень теплоснабжения в основных промышленных узлах Урала.

К числу основных мероприятий в области теплофикации относятся: повышение загрузки отборов турбин (технологических отборов до 90—100% и отопительных — до 60%) и общее улучшение качества эксплуатации; минимальная выработка электроэнергии по конденсационному циклу на теплофикационном оборудовании. При размещении теплоемких производств в ряде узлов Молотовской области необходимо особо учитывать и отмеченный выше фактор повышения тепловой загрузки действующих тэц. Реализация указанных выше мероприятий позволит снизить удельный расход топлива на тэц в среднем не менее чем на 20%.

В новом строительстве теплофикационных мощностей особое внимание должно быть обращено на полное фактическое обеспечение их тепловыми нагрузками и строгое соответствие типов и параметров турбин параметрам и режимам тепловых нагрузок. Тепловые сети должны быть готовы к моменту ввода в эксплуатацию теплофикационных мощностей: недопустимы никакие отклонения от этого установленного порядка. Необходимо широко применять мелкие турбины с противодавлением в промышленности, в частности на заводах, имеющих собственные котельные.

При решении вопросов о расчетных температурах тэц, выборе типов теплофикационного оборудования и др. необходим дифференцированный подход к различным центрам Молотовской области в зависимости от особенностей их энергетического баланса. В частности промышленные центры с неблагоприятными условиями топливоснабжения (Закамский, Молотовский и др.) должны иметь преимущественное право на получение нового оборудования на высоком давлении.

В соответствии с располагаемыми материалами о тепловых нагрузках ввод новых теплофикационных мощностей в перспективе ближайших лет обоснованы в Соликамском, Молотовском, Кизеловском узлах. Однако, как показывают подсчеты, обоснованные тепловыми нагрузками масштабы прироста теплофикационных мощностей составляют относительно небольшой процент потребного прироста электрических нагрузок в области.

Газификация в Молотовской области пока не развита. Даже имеющиеся ресурсы промышленных газов нерационально используются или выпускаются в воздух (коксовый газ используется на отопление котлов, доменный газ Чусовского металлургического завода в значительных количествах выпускается в атмосферу). Между тем в области имеются достаточные благоприятные предпосылки для широкой газификации промышленности и городов: на основе рационального использования промышленных газов, газификации торфа и энергохимического использования кизеловских углей, а в перспективе на основе использования природных газов Ухтинских место-

рождений по дальним газопроводам (необходимо форсировать поиски газовых месторождений и в районе Закамско-Молотовского узла).

На очереди, наряду со строительством источников газоснабжения, образование единой газоснабжающей системы, охватывающей газовыми сетями основные промышленные узлы области.

Урал может и должен стать одним из передовых районов страны по уровню газификации.

IV.

8. Требуют рассмотрения следующие вопросы послевоенного развития Молотовской электроэнергетической системы:

а) Направление и неотложные задачи развития электроэнергетической базы Молотовской области (и Урала в целом) на переходный период до вступления в строй Молотовской гэс.

б) Направление использования электроэнергии и электрической мощности Молотовской гэс в Уральской системе на различных этапах ее развития.

в) Общие перспективы развития гидроэлектростанций в области после вступления Молотовской гэс.

г) Общие перспективы развития тепловых электростанций в Молотовской области, их тип, мощность, размещение и топливный режим.

д) Развитие районных и межрайонных электрических сетей.

Ввод крупной гидромощности обычно вносит определенное ограничение в развитие тепловых мощностей в период, непосредственно предшествующий сроку вступления в эксплуатацию гэс, чтобы свести на-нет или к минимуму возможный период развития системы. Эти ограничения, определяемые размерами вводимой гидромощности, масштабами годового прироста электронагрузок системы, обычно заключаются в использовании резервной мощности системы для покрытия максимума и определенного лимитирования последнего в год, предшествующий вводу гидроэлектростанции. Кроме того строительная программа развития системы должна во всех своих частях (тип и размещение новых мощностей, развитие электросетей и т. д.) исходить и учитывать фактор появления крупной гидроэлектростанции, чтобы обеспечить наиболее высокую экономичность и надежность системы в целом.

Эти общие положения должны быть учтены и конкретизированы при оценке направления и неотложных задач развития электроэнергетической базы Молотовской области и Урала в целом на период до вступления в строй Молотовской гэс.

9. Можно принять, что первые агрегаты Молотовской гэс смогут участвовать в покрытии максимума 1949—1950 гг. На основе располагаемых материалов прирост электрического максимума Молотовской области в первые три года пятилетки может быть оценен цифрой порядка 150—160 тыс. кВт, т. е. прирост в 60—65% по сравнению с ожидаемым максимумом 1945 г. (прирост максимума за рассматриваемый период

по Уральской системе в целом может быть оценен цифрой порядка 550—600 тыс. кВт).

Критическое рассмотрение материалов по развитию генерирующих мощностей в Молотовской системе на ближайшие три года до пуска первых агрегатов Молотовской гэс приводит к следующим выводам:

а) Расширение Кизеловской электростанции путем установки теплофикационного агрегата с отопительным отбором в 25 тыс. кВт (взамен демонтируемых двух мелких агрегатов по 3 тыс. кВт).

б) Ликвидация разрыва между установленной и располагаемой мощностью Березниковской тэц.

в) Ввод в эксплуатацию двух агрегатов на электростанции БМЗ.

г) Ввод в эксплуатацию установленной мощности Левшинской электростанции.

д) Расширение Закамской тэц агрегатом в 25 тыс. кВт.

е) Ввод в эксплуатацию Широковской гэс.

ж) Установка мелких теплофикационных агрегатов на заводах.

Ввод в эксплуатацию перечисленных мощностей предусматривается в течение 1946—1947 гг.: они полностью участвуют в покрытии электробаланса системы на период до пуска Молотовской гэс.

При этом условии Молотовская система в состоянии обеспечить ожидаемый электробаланс, располагая при этом минимально необходимым эксплуатационным резервом.

10. В части, касающейся направления использования электроэнергии и мощности Молотовской гэс в объединенной Уральской системе на различных этапах ее развития, необходимо отметить некоторые из выводов, вытекающих из исследования, проведенного на эту тему нашей кафедрой энергетики Энергетического факультета Московского инженерно-экономического факультета им. Орджоникидзе.

а) Энергия Молотовской гэс должна быть размещена в наиболее трудных по условиям топливоснабжения промышленных узлах Молотовской и Свердловской систем, главным образом в Закамском, Молотовском, Тагильском и Свердловском.

б) Мощность Молотовской гэс должна быть использована в совмещенном графике Молотовской, Свердловской и Челябинской систем в отличие от проектировок, которые приходили к выводу о целесообразности передачи мощности Молотовской гэс только до Свердловска. Электрические потоки Свердловск—Челябинск будут реверсивными.

в) Наряду с участием гэс в покрытии графика нагрузки необходимо сосредоточение на ней части аварийного резерва системы.

Подлежит исследованию максимальная величина резерва системы, которая может быть размещена на Молотовской гэс, учитывая невозможность покрытия значительной аварийной выработки в маловодные годы, падение напора при

длительной работе аварийного резерва и другие факторы.

г) Рациональное использование электроэнергии и мощности Молотовской гэс первой очереди в 400 тыс. кВт обеспечивается при достижении совмещенного максимума объединенной Уральской системы (Молотовская, Свердловская, включая Серовско-Богословский район, Челябинская и Уфимская) порядка 2,5—2,6 млн. кВт, при суммарной установленной мощности средних и небольших гэс в 130 тыс. кВт.

При этих условиях Молотовская гэс участвует в покрытии совмещенного графика в 290 тыс. кВт и сосредоточивает аварийный резерв около 90 тыс. кВт. Если ограничить использование мощности Молотовской гэс только в Молотовской и Свердловской системах, то ее возможная к использованию без дублирования мощность ограничивается цифрой порядка 290 тыс. кВт. Дублирование же остальных 100 тыс. кВт экономически не оправдывается. Имеются все основания рассчитывать, что Уральская система в указанных границах достигнет совмещенного максимума 2,5—2,6 млн. кВт уже в первом году второй послевоенной пятилетки, т. е. через два года после вступления первых агрегатов Молотовской гэс в эксплуатацию.

д) Рациональное использование полной (500 тыс. кВт) мощности и электроэнергии Молотовской гэс обеспечивается при достижении совмещенного максимума Уральской системы в 3,5 млн. кВт.

На этом этапе включается в систему и Соликамская гэс на мощность 250 тыс. кВт, а гарантированная мощность Молотовской гэс повышается со 120 до 175 тыс. кВт.

е) Энергия Молотовской гэс обеспечивает ежегодно экономию около 400 тыс. т кизеловских углей и свыше полумиллиона тонн богословских углей. Она сокращает работу железнодорожного транспорта примерно на полмиллиарда тоннокилометров в год. Себестоимость электроэнергии, отдаваемой в сеть Молотовской гэс, втрое дешевле электроэнергии от тепловых электростанций. Дополнительные капитальные затраты, вызываемые строительством Молотовской гэс, компенсируются экономией в ежегодных издержках производства энергии меньше чем в пять лет для полной мощности и в семь лет — для первой очереди.

Режим работы тепловых электростанций значительно улучшается в связи с пиковым и полупиковым режимом гэс; повышается и надежность электроснабжения в целом. Ввод в эксплуатацию крупной мощности гэс позволяет по условиям электробаланса провести техническую модернизацию ряда тепловых электростанций Урала и в частности перевести их на высокие параметры.

11. Широкое освоение богатых гидроэнергетических ресурсов Западного Урала не исключает, а предполагает строительство и тепловых электростанций. В соответствии с ростом тепловых нагрузок будут развертываться теплофикационные мощности в Молотовском, Соликамском и других узлах. Что касается крупных конденса-

ционных мощностей в Молотовской области, то их строительство в перспективе будет оправданно необходимостью рационально использовать: во-первых, нетранспортабельные многозольные сорта кизеловских углей и матовиков; во-вторых, избыточные ресурсы отходов углеобогащения, поскольку будет принят вариант о развитии новых центральных обогатительных фабрик (на каждый миллион тонн кизеловских углей годовой производительности ЦОФ должна быть сооружена электрическая мощность на отходах обогащения в размере 75—100 тыс. кВт); в-третьих, полукоксы в связи со строительством энергохимических комбинатов на кизеловском угле (комбинат, перерабатывающий миллион тонн кизеловских углей в год, дающий бензин, керосин, высококалорийный газ, фенолы, серу, битум, обеспечивает электрическую мощность на полукоксе в 75—100 тыс. кВт).

Требуют специального рассмотрения вопросы мощностей, размещения и сроков строительства этих конденсационных станций в увязке как с общим электробалансом Урала в целом и Молотовской системы в частности, так и специальными вопросами развития коксохимических и энергохимических комбинатов.

13. Электрические сети Уральской системы представляют в настоящее время одно из самых отсталых звеньев в энергетике Урала и в том числе Молотовской области. Пропускная способ-

ность межрайонных электрических связей Урала составляет в настоящее время всего 15—20 тыс. кВт.

Неотложной задачей ближайших лет является создание 220 кV электросвязей, соединяющих Молотовскую гэс со Свердловской электросистемой (с Тагильским и Свердловским узлами), Свердловскую с Челябинской системой, Серовско-Богословский район с Свердловской системой. Эти электросвязи должны быть сооружены до вступления Молотовской гэс в эксплуатацию.

Наряду с этим должны быть срочно усилены и развиты межузловые связи Молотовской системы: Молотов—Закамск, Широковская гэс—Кизел, Кизел—Березники.

В перспективе освоения Камского каскада особое значение приобретает быстрее промышленное освоение передачи электроэнергии постоянным током высокого напряжения.

Западный Урал при рациональном использовании богатых энергетических ресурсов может стать одним из образцовых районов страны по уровню энерговооружения. Эта основная задача подъема производительных сил и всего материально-культурного уровня Западного Урала должна быть решена в первой послевоенной пятилетке.

◇ ◇ ◇

Высоковольтный кабель постоянного тока

Доктор техн. наук, проф. С. М. БРАГИН
 Московский энергетический институт им. Молотова

Электрическая прочность кабельной изоляции при постоянном напряжении примерно в три раза выше, чем при переменном напряжении (частота 50 Hz). Отсутствие ионизации пустот в изолирующем слое кабеля при постоянном напряжении также исключает процессы старения изоляции и связанное с ними постепенное понижение электрической прочности, обычно наблюдающееся в кабеле высокого напряжения переменного тока. Все это дает возможность повысить допустимый градиент напряжения в изолирующем слое кабеля постоянного тока до 20—25 kV/мм, т. е. увеличить его по сравнению с величиной, принятой для кабеля переменного тока, в 3—4 раза. Одновременно будет достигнуто значительное уменьшение расхода материалов на изготовление кабеля и, следовательно, снижение стоимости передачи электрической энергии.

Наряду с благоприятными обстоятельствами имеются и некоторые отрицательные факторы, связанные с передачей постоянным током: 1) сильная зависимость сопротивления изоляции от температуры, ведущая к перераспределению напряжения в изолирующем слое при нагревании кабеля током нагрузки; 2) необходимость применения хорошо очищенного пропитывающего состава во избежание переноса током через изолирующий слой частиц металла токопроводящей жилы (меди), что может повести к пробое кабеля; 3) понижение прочности изолирующего слоя при перенапряжениях (импульсах) до величины, лишь немного превосходящей прочность при переменном напряжении частоты 50 Hz.

Таблица 1

Электрическая прочность кабельной изоляции при различных формах приложенного напряжения (по Кирху)

Форма напряжения	Переменное напряжение при частоте 50 Hz	Импульсы 50 мкс	Пульсирующее напряжение	Постоянное напряжение
Максимальный градиент при пробое (в kV/мм) _{max.}	75	85	100	140

В общей проблеме передачи электроэнергии на дальние расстояния постоянным током важное место занимает вопрос о высоковольтном подземном кабеле постоянного тока. Исследуются распределение напряженности электрического поля по изоляции кабеля и на это поле теплового поля. Дана сравнительная оценка высоковольтных кабельных линий постоянного и переменного токов.

Примерное соотношение электрической прочности кабельной изоляции при различных формах приложенного напряжения (по Кирху) приведено в табл. 1.

Перейдем непосредственно к рассмотрению вопросов, относящихся к напряженности электрического поля в изолирующем слое кабеля и влиянию теплового поля на электрическое в зависимости от характеристик основных материалов изолирующего слоя кабеля.

Электрическое поле кабеля постоянного тока. Распределение потенциала по изолирующему слою кабеля постоянного тока обусловлено величиной потока плотности тока

$$i = \lambda E.$$

При установившихся процессах общее выражение для градиента напряжения в изолирующем слое получается из теоремы Гаусса:

$$\int P(\lambda E) dS = \int \text{div}(\lambda E) dW,$$

в которой в левой части — интеграл от плотности тока распространен по поверхности, а в правой — по объему, ограниченному рассматриваемой поверхностью. Интегрирование этого общего уравнения для плоского сечения одножильного кабеля (рис. 1) дает в левой части ток через рассматриваемую поверхность, а в правой — заряд, сосредоточенный в объеме, ограниченном рассматриваемой поверхностью:

$$2\pi r j = Q$$

или

$$r j = \frac{Q}{2\pi} = r \lambda E. \quad (1)$$

Полагая $\frac{dU}{dr} = E$ и интегрируя в пределах от r_c до r_s , находим после некоторых преобразований, что градиент напряжения

$$E = \frac{U}{r \lambda \int_{r_c}^{r_s} \frac{dr}{\lambda r}}. \quad (2)$$

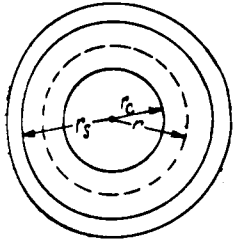


Рис. 1. Плоское сечение кабеля. r_c — радиус медной жилы; r_s — радиус внутренней поверхности свинцовой оболочки.

Верхний предел r_s — радиус внутренней поверхности свинцовой оболочки, нижний r_c — радиус медной жилы (рис. 1).

Если основной параметр λ , характеризующий примененный изолирующий материал, изменяется в зависимости от расстояния до центра кабеля r (рис. 1)

$$\lambda = f(r),$$

то выражение (2) можно написать в таком общем виде:

$$E_r = \frac{U}{r f(r) \int_{r_c}^{r_s} \frac{dr}{r f(r)}} \quad (3)$$

Равномерное повышение температуры по всему объему изолирующего слоя не нарушит, очевидно, первоначального распределения потенциала, так как при этом λ останется постоянным во всех точках диэлектрика.

Неравномерное распределение температуры, вызываемое потоком тепла от жилы к оболочке кабеля, в разной степени изменяет электрические свойства отдельных слоев изоляции в зависимости от их нагрева и тем самым нарушает первоначальное распределение потенциала в кабеле.

При постоянном напряжении зависимость проводимости от температуры обычно задается следующим выражением:

$$\lambda_r = \lambda_{r_s} e^{a\tau} \quad (4)$$

где τ — нагрев слоя изолирующего материала кабеля, находящегося на расстоянии r от центра кабеля, по отношению к свинцовой оболочке; λ_{r_s} — проводимость при температуре свинцовой оболочки; a — температурный коэффициент проводимости изолирующего материала.

В установившемся тепловом режиме

$$\tau = \frac{p_c \sigma_k}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} \quad (5)$$

где p_c — тепловой поток, генерируемый в погонном сантиметре жилы кабеля в ваттах; σ_k — удельное тепловое сопротивление изолирующего слоя в тепловых омах ($t \Omega$).

Обозначив

$$b = \frac{p_c \sigma_k a}{2\pi} \quad (6)$$

получим выражение для проводимости в следующем виде:

$$\lambda_{r_s} = \lambda_{r_s} e^{b \ln \frac{r_s}{r}} = \lambda_{r_s} \left(\frac{r_s}{r} \right)^b \quad (7)$$

Для градиента напряжения из (2) и (7) получаем:

$$E_r = \frac{U b r^{b-1}}{r_s^b - r_c^b} \quad (8)$$

При значении $b=1$

$$E = \frac{U}{r_s - r_c} = E_{cp}.$$

Распределение напряжения в изолирующем слое будет прямолинейным и таким образом наиболее выгодным с точки зрения использования материала изолирующего слоя.

При $b < 1$ поле неравномерно с максимальной напряженностью у поверхности жилы, при $b > 1$ — максимум напряженности поля имеет место у оболочки кабеля.

Картина электрического поля для этих трех случаев представлена графически на рис. 2 для одножильного кабеля сечением 70 mm^2 с наружным диаметром $D=24 \text{ mm}$ ($r_c=4,7$ и $r_s=9,7 \text{ mm}$).

Таким образом в кабеле постоянного тока, изолирующий слой которого характеризуется отрицательным температурным коэффициентом проводимости, при повышении температуры, под влиянием выделяющегося в жиле тепла, напряженность электрического поля у поверхности жилы будет уменьшаться, а у внутренней поверхности свинцовой оболочки увеличиваться.

Вычислим зависимости градиентов у поверхности жилы и на наружном слое изоляции от тока нагрузки кабеля или от температуры жилы. Предположим, что кабель проложен в земле на глубине $0,7 \text{ m}$. Примем удельное тепловое сопротивление кабеля равным $\sigma_k=550 \text{ t}\Omega$, а для земли $\sigma_0=180 \text{ t}\Omega$. Тогда тепловые сопротивления кабеля и земли будут:

$$S_k = \frac{550}{2\pi} \ln \frac{9,7}{4,7} = 64 \text{ t}\Omega$$

и

$$S_0 = \frac{2 \cdot 180}{3 \cdot 2\pi} \ln \frac{4 \cdot 70}{24} = 47 \text{ t}\Omega.$$

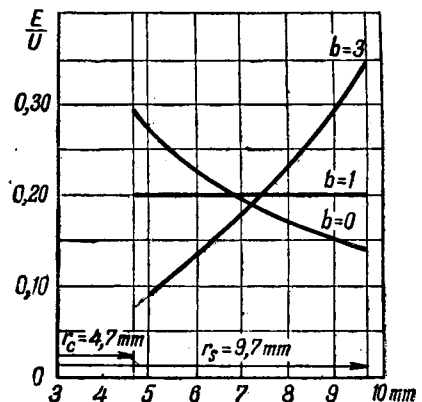


Рис. 2. Распределение напряженности поля в изолирующем слое кабеля постоянного тока.

При температуре окружающей кабель среды $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ зависимость нагрева жилы кабеля τ_c от тока нагрузки I может быть представлена в следующем виде:

$$\tau_c = p_c (S_k + S_0) = I^2 \frac{\rho}{q} [1 + 0,004 \cdot \tau_c] (S_k + S_0).$$

Полагая для медной жилы $\rho = 17,84 \cdot 10^{-5} \Omega\text{см}$ и подставив значения S_k и S_0 , получим:

$$\tau_c = \frac{2,8 \cdot 10^{-4} \cdot I^2}{1 - 1,12 \cdot 10^{-6} \cdot I^2}. \quad (9)$$

Рассеиваемая в жиле мощность, т. е. генерируемый в жиле тепловой поток на 1 см длины кабеля

$$P_c = \frac{I^2 \cdot 2,55 \cdot 10^{-6}}{1 - 1,12 \cdot 10^{-6} \cdot I^2}. \quad (10)$$

При температурном коэффициенте для пропитанной бумаги $a = 0,05$

$$b = \frac{p_c \tau_c a}{2\pi} = \frac{I^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5}}{1 - 1,12 \cdot 10^{-6} \cdot I^2}. \quad (11)$$

Результаты вычислений по формулам (8)–(11) для различной температуры жилы кабеля сведены в табл. 2. Изменение градиента у поверхности жилы в зависимости от нагрузки или температуры жилы приведено также на рис. 3.

Таблица 2

Градиенты на поверхности жилы и на наружной поверхности изоляции в зависимости от нагрузки

$I, \text{ A}$	50	100	150	200	250	300
$\tau_c, \text{ }^\circ\text{C}$	0,7	2,8	6,6	11,7	18,8	28
b	0,028	0,113	0,26	0,47	0,75	1,12
$\frac{E}{U}$ при $r=r_c$	0,29	0,286	0,276	0,246	0,220	0,190
$\frac{E}{U}$ при $r=r_s$	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,21

Допустимая нагрузка кабеля постоянного тока. Рассмотренное выше явление искажения нормального электрического поля в кабеле постоянного тока под влиянием неравномерного нагревания может в некоторых случаях ограничить допустимую нагрузку кабеля. Как было показано выше, при $b = 1$ получаются невыгоднейшие условия использования диэлектрика кабеля, так как в этом случае градиент напряжения один и тот же во всех точках изолирующего слоя и равен среднему градиенту

$$E_{cp} = \frac{U}{r_s - r_c}.$$

Если считать, что неравномерность нагревания изолирующего слоя кабеля должна быть такова, что $b \leq 1$, то условие наилучшей работы кабеля получится из неравенства

$$P_c \geq \frac{2\pi}{\sigma_k a}.$$

Это значит, что допустимые удельные потери тепла в кабеле должны быть не менее того теплового потока, который вызывает выравнивание градиента напряжения в изолирующем слое кабеля, т. е. $\frac{2\pi}{\sigma_k a}$. Отсюда

следует, что изолирующий слой кабеля постоянного тока должен обладать малыми значениями a и σ_k для того, чтобы можно было нагружать жилу кабеля током без опасения ухудшить распределение напряжения в изолирующем слое.

При малом значении температурного коэффициента ($a \leq 0,05$) практически можно не считаться с каким-либо ограничением передающей мощности кабеля постоянного тока по сравнению с высоковольтным кабелем переменного тока.

Сравнение высоковольтных кабельных линий переменного и постоянного токов. Сравнительный расчет произведем для основных показателей, приведенных к одному километру кабельной линии, для передаваемой мощности 100 тыс. kVA при переменном и постоянном токах.

В случае передачи 100 тыс. kVA переменным током частотой 50 Hz при напряжении 110 kV может быть использован только кабель маслонаполненного типа. На одну трехфазную цепь потребуются три одножильных свинцованных кабеля с медной жилой сечением 270 мм² и толщиной изолирующего слоя 12 мм. Для передачи той же мощности постоянным током при напряжении 250 kV может быть также использован обычный кабель с вязкой пропиткой.

Маслонаполненный кабель дороже и требует более сложной арматуры и аппаратуры, но более надежен в эксплуатации, легче переносит резкие включения и выключения нагрузки и, едва ли не самое главное, позволяет легко осуществлять контроль целостности свинцовой оболочки в эксплуатации по наблюдению за утечкой масла в линии. Это дает возможность своевременно выявить и устранить дефекты линии и тем самым предотвратить пробой кабеля.

Надежность кабеля с вязкой пропиткой может быть значительно повышена за счет ряда мероприятий по улучшению технологического процесса и конструкции кабеля. Например, введение газа под давлением позволит осуществить контроль целостности свинцовой оболочки и в кабеле с вязкой пропиткой при одновременном сохранении всех его преимуществ в отношении стоимости и арматуры и без значительного усложнения прокладки кабеля и монтажа муфт.

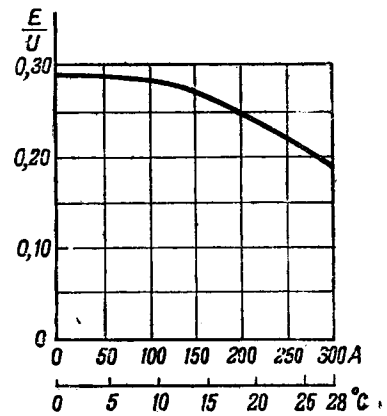


Рис. 3. Градиент на поверхности жилы кабеля постоянного тока в зависимости от температуры (или нагрузки).

Для сравнения с передачей переменным током возьмем также кабель маслонеполненного типа и для передачи постоянным током, оставив на будущее время возможность значительного снижения стоимости линии за счет применения кабеля с вязкой пропиткой.

На одну цепь потребуется два одножильных свинцованных кабеля с медной жилой сечением 150 мм² и толщиной изолирующего слоя 11 мм. Основные размеры обоих типов кабеля приведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные конструктивные размеры одножильного кабеля маслонеполненного типа для линии на передаваемую мощность 100 kVA при переменном и постоянном токах

Основные размеры, мм	110 kV переменный тск 270 мм ²	250 kV постоянный тск 150 мм ²
Диаметр канала в жиле	14,8	9,0
Диаметр медной жилы	26,7	18,1
Диаметр по изоляции	51,2	40,3
Диаметр по свинцовой оболочке	58,0	46,1
Наружный диаметр кабеля	63,2	51,3

Из табл. 4 видно, что кабельная линия постоянного тока требует меди в 3 раза, а свинца в 1,6 раза меньше, чем кабельная линия переменного тока на ту же передаваемую мощность. Максимальная допустимая температура жилы для обеих кабелей принималась равной 70° С. Допустимый ток нагрузки получился равным 600 А для кабеля трехфазной линии и 400 А для линии постоянного тока.

Таблица 4

Сравнительный расход основных материалов на кабельную линию мощностью 110 тыс. kVA при переменном и постоянном токах

Расход материалов, кг/км	Трехфазный тск, напряже- ние 110 kV	Постоянный тск, напряже- ние 250 kV
Меди	8 100	2 700
Бумаги	4 150	2 100
Минерального масла	3 150	1 500
Свинца	21 000	13 000
Всего	36 400	19 300

Первоначальные затраты на сооружение кабельной линии складываются из следующих элементов: стоимость кабеля, арматуры, контрольной аппаратуры, прокладки и монтажа (включая сооружение колодцев и производство земляных работ), а также стоимость компенсационных устройств для длинных кабельных линий переменного тока.

Если принять стоимость сооружения одной трехфазной цепи на единицу длины за 100%, то стоимость сооружения одной цепи передачи по-

стоянным током будет всего около 60%. Принятое при расчете распределение по основным элементам стоимости приведено в табл. 5, в которой даны также и расчетные значения потерь в обоих типах сравниваемых кабельных линий.

Таблица 5

Основные элементы стоимости сооружения и эксплуатации и потери в одном километре маслонеполненных кабельных линий на переменном и постоянном токах высокого напряжения для передаваемой мощности 100 тыс. kVA

	Трехфазный тск, напряже- ние 110 kV	Постоянный тск, напряже- ние 250 kV
Стоимость линии, %:		
кабеля	55	30
арматуры	15	8
прокладки и монтажа	30	22
Всего первоначальных затрат	100%	60%
Потери линии, kW/km:		
в меди	70	38
изоляции	6	0
свинцовых оболочках	24	0
Общие потери, kW/km	100	38

Все приведенные данные — ориентировочные и получены расчетным путем, но все они с полной очевидностью показывают *технические и экономические преимущества передачи постоянным током высокого напряжения по подземным кабельным линиям.*

Необходимо возможно скорее перейти к практическому исследованию эксплуатационных и технических характеристик высоковольтных кабельных линий постоянного тока. Для этой цели надо создать небольшую опытную линию и тщательно исследовать влияние циклов нагрузки и напряжения на ее электрическую прочность и надежность эксплуатации. Эта задача весьма облегчается тем, что испытания не требуют мощной установки постоянного тока высокого напряжения. Можно использовать обычный высоковольтную выпрямительную установку, соединенную с изолированным на полное рабочее напряжение нагрузочным трансформатором переменного тока низкого напряжения. Осуществив такое наложение постоянного тока высокого напряжения на переменный ток низкого напряжения, можно получить дешевую и удобную в эксплуатации испытательную установку, позволяющую провести все испытания циклами нагрузки под высоким напряжением постоянного тока.

Кабельная промышленность в настоящее время располагает всеми возможностями для производства экспериментального кабеля. Необходимо возможно скорее перейти от теоретических расчетов и отвлеченных рассуждений к практическим испытаниям и измерениям.



От лейденской банки до конденсатора будущего

Член-корреспондент Академии наук СССР В. П. ВОЛОГДИН

Двести лет тому назад в Лейдене был изобретен прибор, широко применявшийся при всех опытах с электричеством в ту эпоху, когда источником электрической энергии был сперва электрофор, затем электростатическая машина. Этот прибор по имени города получил название лейденской банки.

В течение полутора веков лейденская банка не имела технического применения, оставаясь лишь принадлежностью физического кабинета.

Вплотную я познакомился с лейденской банкой, будучи студентом и делая опыты с только что открытым А. С. Поповым телеграфом без проводов. Лейденская банка выполняла в передающей радиостанции важную роль, но по своей конструкции и по внешнему виду она все еще осталась почти такой же, как и 100 лет назад. Увеличились лишь размеры и широко использовались для увеличения емкости батареи из ряда лейденских банок.

В искровых генераторах напряжение, до которого заряжались банки, достигало 15 и даже 20 kV. Лейденской банке в целях уменьшения краевого эффекта придали более вытянутую форму — вид цилиндра диаметром около 100—120 мм и высотой, доходящей до 1 500 мм. Для этой же цели стеклянная часть часто покрывалась лаком. В качестве обкладок применялась оловянная фольга. В этот период игнорировались вопросы потерь и размеров приборов, так как радиотелеграф развивался еще в пределах физики; экономика, высокий к. п. д. приборов — проблемы технического характера — еще не привлекали внимания конструкторов.

Если лейденская банка сохранила свою форму при использовании ее для высоких напряжений и на сравнительно небольшие мощности, то параллельно с этим (даже несколько ранее того периода, о котором только что говорилось) были проведены работы по приданию ей другой, технической более целесообразной формы — формы конденсатора, который впоследствии полностью вытеснил лейденскую банку в большинстве случаев ее применения.

Вместо стекла как диэлектрика стали использовать волокнистый, не боящийся ударов и более легко обрабатываемый материал. Первое место среди этих материалов заняла бумага. Делались предложения еще в 1894 г. использовать также и шелк как диэлектрик. Конденсатор частично или полностью пропитывался или заливался нередко парафином, церезином и другими массами. В кон-

денсаторе этого времени преобладала уже плоская форма пластин, создающая компактность.

Такие конденсаторы требовались непрерывно развивавшейся телефонной техникой и только что получившей развитие новой областью — моторостроением. И в последнем успешное решение задачи зажигания газовой смеси индукционной катушкой или магнето обязано конденсатору.

Автомобиль, развитие которого почти совпало во времени с развитием радио, еще более расширил сферу применения конденсатора (слюдяного, бумажного) для целей зажигания.

Можно отметить применение в то же время и бумажных конденсаторов на высокие напряжения при больших мощностях. Так, еще в 1899 г. в Италии, в Комо, делались конденсаторы для напряжения 5 000 V. Конденсаторы устанавливались в сетях промышленных 50-периодных установок. Это были первые попытки повышения коэффициента мощности при помощи конденсаторов. Прimitивная технология того времени и недостаточное знакомство с материалом были причиной значительных потерь в конденсаторе, доходивших до 1%.

Параллельно с применением лейденской банки в ее неизменной цилиндрической форме для целей получения колебаний высокой частоты шла работа по использованию ее при частоте 50 Hz как для повышения $\cos \varphi$, так и для защиты от перенапряжений.

В конструкции банки главное внимание обращалось на краевой эффект ввиду значительных рабочих напряжений, доходящих до 30 kV. Одну из наиболее совершенных конструкций лейденской банки разработал в 1903 г. Мосцицкий для швейцарской фирмы Société générale des condensateurs électrique Freiburg. В этой банке, обычно небольшого диаметра, для уменьшения градиента у верхнего края толщина стекла была значительно увеличена. Как показали исследования, это увеличило стойкость банки, но, однако, почти не уменьшило потери в ней. Этим, вероятно, объясняется то обстоятельство, что конструкция не нашла широкого применения при радиочастотах, где первенствующую роль играют не корона и краевой эффект, а потери.

В конденсаторах Мосцицкого обкладки выполнялись достаточно тщательно. Вместо станиоля,

как в банках для радио, применялось химическое покрытие серебром. Банки снабжались солидными фарфоровыми изоляторами и помещались в защитный металлический кожух с наполнением его для целей охлаждения маслом. Для получения значительных емкостей десятки таких небольших банок собирались в батареи.

Конструкции Мосцицкого имели законченный, более технический вид. Кроме как для защиты от перенапряжений и улучшения $\cos \varphi$ они использовались в Швейцарии на установках азотной промышленности.

Следующим шагом в усовершенствовании лейденской банки в применении ее в технике высоких частот была лейденская банка фирмы Schott Iena, известной своим стеклом. Фирма обратила внимание на то обстоятельство, что в области высоких частот к лейденской банке предъявляются как основное требование малые диэлектрические потери, быстро растущие с повышением частоты. В этой области частот потери в лейденской банке влияют как на работу самого колебательного контура, так и на прочность диэлектрика банки по условиям теплового пробоя.

Надо сказать, что в отличие от контуров низких частот радиотелеграфные контуры всегда имеют низкий $\cos \varphi$, поэтому каждый процент потерь в емкости контура сказывается гораздо более сильно на общем к. п. д. установки.

Учитывая это требование, Шотт разработал для конденсаторов специальное свинцовое стекло с малыми диэлектрическими потерями ($\cos \varphi = 0,1-0,15$), получившее название Minosglas (стекло «минос»). Лейденские банки этой фирмы, появившиеся в конце первой мировой войны, выполнялись в виде сравнительно небольших цилиндрических сосудов с расширениями сверху, покрытых сперва серебром, а затем гальванически медью. Банки были закрыты сверху стеклянным же колпаком. Внутри банки для выравнивания местных повышений температуры наливалось масло. Банки, получившие название Minos-Flaschen, имели технически законченный вид и значительно меньшие потери по сравнению с обычными банками, применявшимися до этого времени в радиотехнике. Банки эти, несмотря на их достоинства, все же довольно быстро сошли со сцены, хотя и дожили до эпохи незатухающих колебаний. У нас в России эти банки были применены в 1922 г. в контурах машинного 50-kW передатчика. После года их эксплуатации, сопровождавшейся постепенным выходом из строя ряда банок, они были заменены слюдяными.

Помимо лейденских банок та же фирма одновременно выпустила из стекла «минос» и плоские конденсаторы весьма тщательного изготовления под названием Wimos-Verbichter.

Тонкие стеклянные пластинки небольшого размера, порядка 120×120 mm, со шлифованными поверхностями были собраны пакетами в деревянных ящиках и залиты парафиновой массой. Эти конденсаторы, несмотря на малые потери в стекле и весьма тщательное изготовление, также не обнаружили стойкости при их массовом применении и быстро вышли из употребления.

Причиной неуспеха здесь, вероятно, были неоднородность стекла в отношении потерь и, кроме того, непрочность стекла как материала, обусловленная местными перегревами.

Однако работа Шотта над описанными банками интересна тем, что это была первая попытка создания материала с низкими диэлектрическими потерями для конденсаторов. Можно думать, что дальнейшее развитие конденсаторной техники пойдет как раз по этому пути, хотя, конечно, не на основе стекла.

Банка «минос» по существу была последней конструкцией стеклянной лейденской банки, применявшейся в технике, уступив место конденсаторам из других материалов и другой конструкции.

Цилиндрическая форма конденсатора после середины 20-х годов сохранилась лишь в двух системах: с одной стороны, в конденсаторах со сжатым воздухом или другим газом и, с другой стороны, при использовании в качестве диэлектрика высокого вакуума. Этому способствовало то обстоятельство, что при увеличении давления газа до 10 ат диэлектрическая прочность его растет приблизительно линейно с давлением, а при вакууме порядка $10^{-6}-10^{-7}$ она достигает весьма большого значения ($1\ 600$ kV/cm). Помимо этого газ под давлением и высокий вакуум как диэлектрики обладают практически отсутствием диэлектрических потерь и отсутствием остаточных зарядов.

Ввиду этого конденсаторы в форме лейденских банок со сжатым газом, обычно азотом, сохранили свое место в измерительной технике, являясь эталоном для мостика Шеринга. Для этой цели строились конденсаторы на напряжения 300 и даже 500 kV.

Малые потери конденсаторов со сжатым газом, над выбором которого велись работы под руководством академика А. Ф. Иоффе в Физико-техническом институте, привлекали к себе и радиотехников.

Начиная с 1930 г., в Центральной радиолоборатории под руководством А. Л. Минц были успешно разработаны конденсаторы со сжатым газом для контуров ламповых генераторов, показавшие целесообразность этой системы, как обладающей малыми потерями. Однако малый диэлектрический коэффициент газа делает воздушные конденсаторы пригодными лишь при сравнительно высоких напряжениях или высоких частотах.

Конденсаторы с высоким вакуумом ввиду их сложности не получили большого распространения. В России первые опыты с ними были произведены в Нижегородской радиолоборатории в 1921 г. М. А. Бонч-Бруевичем.

Вместе с развитием телеграфии без проводов и переходом к ее техническому применению все более и более выдвигалось требование создания компактного и прочного контурного конденсатора, сперва для искровых передатчиков. При этом, пока не поднимался вопрос о потерях, так как мощность передатчиков того времени не превышала 5—10 kW, и в системах помимо контуров было много других источников потерь.

Около 1908 г. фирмой Mejrowski Porz, работавшей в области изолирующих материалов, был скон-

струирован тип высоковольтного конденсатора. В качестве основного материала для диэлектрика была взята плотная бумага Hartpapier типа кабельной, которая покрывалась только что начинавшим входить в употребление бакелитом. Такая бумага получила название пертинакса. Несколько слоев бумаги вместе с оловянной фольгой обкладок наматывались на круглую оправку и затем прессовались, получая форму компактных пластин с закругленными краями размером, чаще всего, около $30 \times 200 \times 1\,000$ мм. После прессовки конденсатор нагревался под прессом для перевода бакелита из стадии А в стадию С.

Такой конденсатор хорошо выдерживал напряжение до 20 кВ в колебательных контурах искрового передатчика, так как заполнение пор бакелитом обусловило значительное уменьшение потерь на корону, особенно на краях.

Этого типа конденсаторы с 1910 по 1917 г. производились также и у нас в России, в Радиодепе Морского ведомства. В дальнейшем бакелит был заменен шеллаком, как более удобным для процесса, хотя и более дорогим материалом. Этими конденсаторами снабжались все радиостанции типа УМО нашего военного флота во все время их существования, т. е. почти до 1924 г. Однако уже в 1918 г. более высокие требования, предъявляемые к к. п. д. передатчиков, желание уменьшить их габариты, особенно для военных радиостанций, заставили искать новых материалов и более совершенных конструкций. На базе изучения процесса работы конденсатора к диэлектрику предъявлены были требования не только высокой прочности на пробой, но также высокой диэлектрической постоянной, а несколько позднее и требование малого угла потерь, не говоря уже о ряде других свойств, в том числе экономического и технологического порядка.

То направление, по которому должны были развиваться поиски, может быть усмотрено из приведенной здесь (хорошо известной) таблицы для электрических постоянных некоторых материалов.

Таблица значений ϵ и δ различных диэлектриков

Диэлектрик	Пробивная напряженность, кВ/мм	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Удельное объемное сопротивление, $\Omega \cdot \text{см}$	Тангенс угла потерь при $6 \cdot 10^8$ Hz, $\text{tg } \delta \cdot 10^4$
Слюда	60	5—8	$2 \cdot 10^{15}$ — $2 \cdot 10^{18}$	1,7
Стекло	12—20	4—16	$5 \cdot 10^{13}$	4—130
Стекло "Минос"	—	8	—	10—16
Бумага (парафинированная)	30	3,5	—	480
Пертинакс	—	4,8	$1 \cdot 10^9$	230—390
Парафин	30	2,2—2,3	$1 \cdot 10^{14}$ — $3 \cdot 10^{15}$	3—9
Воздух	3,2	1	—	0

Для больших радиостанций в 1914—1917 гг. были использованы конденсаторы из плоских стеклянных листов, собранных в пакеты, залитые маслом, как дающие меньшие потери по сравнению с

конденсаторами, изготовленными из пертинакса и бумаги. Так, у нас в России были сооружены в начале войны громадные батареи для мощных радиостанций в Ленинграде, Царском Селе и позднее в Москве, на Ходынке. Однако из-за своей громоздкости и пожарной опасности эти конденсаторы уступили место слюдяным конденсаторам.

Слюдяные конденсаторы начали широко применяться сначала в Западной Европе для малых радиостанций, особенно аэропланых, как наиболее компактные, что обеспечивалось высоким диэлектрическим коэффициентом, большой пробивной напряженностью и, главное, малыми потерями (см. таблицу). Такие конденсаторы выпускала, например, фирма Lorenz еще до войны 1914 г. С началом применения незатухающих колебаний, создававшихся сперва машинным генератором Гольдшмидта (1908 г.), интерес к слюдяным конденсаторам возрос еще более ввиду необходимости применения многих настроенных контуров, которые осуществлялись сотнями небольших слюдяных конденсаторов Лоренца.

К этому же времени относятся также важные предложения в области слюдяных конденсаторов, сделанные Дюбиллье. В течение более чем 30 лет конденсатор, получивший его имя, удержался как основной конденсатор колебательных контуров радиопередатчиков всего мира.

Достаточно взглянуть на таблицу, чтобы увидеть, что если в стеклянных, бумажных и пертинаксовых конденсаторах основные потери, доходившие тогда почти до 1%, падают на потери в самом диэлектрике, то при слюде потери разного рода меняются своими ролями, и все внимание должно быть обращено на потери короны.

Предложения Дюбиллье имели своей целью уменьшение короны путем разбивки всего конденсатора на ряд параллельно-последовательных групп и целесообразное размещение выводов, что значительно уменьшало градиенты, а значит, и потери от короны.

Если для слюдяных конденсаторов, работающих при напряжении одного знака, допускался напряжение до 3 000 В, то при радиочастотах и контурных конденсаторах при той же толщине слюды в 0,05—0,08 мм в целях уменьшения потерь Дюбиллье допустил лишь 300 В на каждый пакет.

Любопытно, что Дюбиллье делал предложение Радиодепе Морского ведомства использовать его изобретение еще около 1913 г., но оно не было принято. В результате этого в России было поставлено производство конденсаторов типа Дюбиллье лишь в 1924 г., тогда как во всех странах мира за 8 лет до того широко изготовлялись конденсаторы этой системы. Особенное значение конденсаторы Дюбиллье приобрели с переходом радиотехники на ламповые генераторы как контурные конденсаторы с малыми потерями, часто не превышающими 0,05%.

В связи с теми же ламповыми генераторами, помимо контурных конденсаторов, возникла потребность в фильтровых конденсаторах. Здесь с успехом сохранили свое положение пертинаксовые или бакелитовые конденсаторы, как уступившие свое место в контурах высокой частоты лишь из-за вы-

соких диэлектрических потерь бакелита, однако хорошо решавшие задачу краевых потерь.

Конденсаторы этого рода изготовлялись в виде единиц большой емкости в баках из железа, залитых маслом, находя применение и в других областях, например, в ударных генераторах, так как они могут с успехом строиться для напряжений до 120 кВ и выше.

В продолжение более 45 лет лейденская банка и выросший из нее конденсатор находили главное, наиболее важное применение (если не считать малых конденсаторов) в высокочастотных контурах радиостанций, однако в это же время мало-помалу развивалось использование конденсаторов в сетях промышленной частоты 50—60 Hz для улучшения $\cos \varphi$.

Ход развития этого применения все время замедлялся высокой стоимостью конденсаторов, но уже в 1932 г. общее число конденсаторов, работавших в силовых электроустановках, составляло¹ в Европе 300 000 кВА, в США 1 млн. кВА.

В это время открывается новая область применения конденсаторов — высокочастотная промышленная электротехника, охватывающая частоты от 500 и до более чем 10^6 Hz, где конденсаторы требовались для улучшения $\cos \varphi$. Все установки этого рода — резонансного типа, поэтому конденсатор с развитием применений высоких частот в промышленности приобрел новое значение.

Чтобы составить себе представление о масштабах этой новой техники как потребителя конденсаторов, достаточно сказать, что одна лишь американская фирма Ajax установила к настоящему времени не менее 3 млн. кВА конденсаторов на выпущенных ею установках.

Эта техника охватывает индукционные печи, высокочастотную закалку, пайку, нагрев под ковку, и созданные за последнее время в нашей стране лабораторией ЛЭТИ методы осадки и упрочнения деталей.

В связи с потребностями в улучшении $\cos \varphi$ и описанными новыми применениями около 1926 г. в США был создан конденсатор, в котором как диэлектрик использована тонкая тряпичная, типа папиросной, бумага, пропитанная маслом. Целесообразная конструкция, выбор материалов, а главное технология с применением вакуума дали возможность снизить в этом сравнительно дешевом и компактном конденсаторе потери до менее чем 0,3%.

У нас в России в изготовлении этих конденсаторов, сыгравших значительную роль, особенно в области индукционных печей и закалки и работавших при частотах 500—2 000 Hz, большая заслуга принадлежит кандидату технических наук М. М. Мрозову, поставившему около 1932 г. по совету автора их производство в Киевском индустриальном институте под маркой КИИ; позднее эти конденсаторы стали изготовляться и другими организациями, однако в настоящее время эта система должна считаться отжившей.

Американцы уже более 7 лет, сохранив много в конструкции этих конденсаторов, перешли к на-

полнению конденсаторов вместо масла пиранолом, снабдив их водяным охлаждением. При этом была принята более рациональная конструкция пакета в виде короткого рулона, что улучшило теплоотдачу и позволило сделать громадный скачок в смысле уменьшения размеров: мощность конденсаторов на 2 000—3 000 Hz в том же баке увеличилась почти в 15 раз.

В области конденсаторостроения электропромышленность СССР пока значительно отстает от передовой техники. Между тем пираноловые конденсаторы применяются в диапазоне частот 50—10 000 Hz, хотя, вероятно, это не предел.

Увеличение масштабов потребления конденсаторов радиотехникой и вновь возникшее промышленное использование высоких частот делают все менее и менее пригодным решение вопроса конденсатора, найденное в свое время Дюбилле, ввиду дороговизны, а главное, дефицитности той чистой слюды-мусковита, которая здесь необходима. Последнее обстоятельство еще в конце 20-х годов толкнуло электротехников на путь, который в свое время пыталась использовать фирма Шотт, т. е. на создание искусственного, более совершенного диэлектрика. Правда, к нему предъявили уже несколько другие требования, а именно: высокий диэлектрический коэффициент, высокую диэлектрическую прочность, малые потери при средних и, особенно, высоких частотах, кроме того, большую механическую прочность и температуростойкость, а главное, доступную технологию при дешевом и недефицитном сырье. Было предъявлено также требование применения этого материала при сравнительно низких частотах, например, акустических, и при небольших напряжениях порядка сотен вольт, что заставляло обратить особое внимание на величину диэлектрического коэффициента ϵ .

В 1928 г. автор, давно уже заинтересованный сперва сегнетовой солью, а затем минералом рутилом, как веществами с исключительно высокими значениями диэлектрического коэффициента, сделал попытку создать новый искусственный материал, обладающий высоким значением ϵ , так как применение имеющихся в природе материалов, например, рутила, исключалось из-за их дефицитности.

Однако тот же рутил натолкнул на мысль использовать² для этой цели TiO_2 как основную составную часть рутила, прессуя и обжигая его сперва с силикатами, а затем (по предложению Куманина) с соединениями молибдена. При этом удалось после выдержки в течение 6 h при температуре 1 200° С получить первый в мировой практике конденсатор с диэлектрическим коэффициентом его материала, равным 100.

Позднее диэлектрики на основе TiO_2 получили развитие в ряде предложений в СССР и особенно за границей, но приоритет в этом вопросе все же остается за нашей страной.

Знакомясь с большим интересом со статьей члена-корреспондента Академии наук СССР Б. М.

¹ Pugno Vanom, Elettrotechnica, № 22, 1932.

² Заявочное свидетельство автора, Исакова и Куманина № 80103/III, 20 декабря 1930; авторское свидетельство № 154568, 17 января 1935.

Вула (Вестник Академии наук, № 4, 1945) и американскими данными, где для соединений TiO_2 с барьером дано значение диэлектрического коэффициента $\epsilon = 3200$, я еще раз убедился, что будущее конденсаторов лежит в создании искусственных диэлектриков на основе TiO_2 и что недалек тот день, когда этого рода конденсаторы прочно и широко войдут в практику, внося целый переворот в электротехнику, так как позволят применять резонансные цепи там, где это было недостижимо.

Параллельно с предложениями использовать TiO_2 , за границей, отчасти и в СССР, шли работы по использованию других соединений, хотя и не обладающих высоким диэлектрическим коэффициентом, но примечательных по своим малым потерям. Такое решение достаточно для коротковолновых конденсаторов, в которых малые потери решают вопрос полностью, так как с повышением частоты размеры конденсатора при той же его мощности уменьшаются. В результате за последние годы прочное место заняли коротковолновые конденсаторы на основе Al_2O_3 .

К конденсаторам, применяемым в радиотехнике, относятся и конденсаторы, разработанные в последние годы и носящие название «фарадон».

До сих пор шла речь главным образом о конденсаторах либо высокого напряжения, либо большой мощности, однако имеется целая область малых конденсаторов, играющих, однако, большую роль в технике. Если не повторять сказанного о конденсаторах магнето, телефонии и т. п., то необходимо все же сказать, что радиоприем немалым без малых конденсаторов как постоянной, так и переменной емкости.

Среди постоянных конденсаторов долгое время основными были слюдяные и бумажные. Нельзя не упомянуть и о конденсаторах переменной емкости, как необходимой принадлежности радиоприемника. Эти конденсаторы имеют самые разнообразные конструкции.

Особо здесь надо отметить сыгравший в период 1910—1920 гг. некоторую роль конденсатор системы Зейбта, изготовлявшийся до революции Радиодепо Морского ведомства.

В заключение будет уместно сделать попытку наметить, каким путем пойдет дальнейшее разви-

тие конденсатора и каким он будет впоследствии.

Уместно также сказать несколько слов о том, какое влияние на технику может оказать создание дешевого, главное, компактного конденсатора — конденсатора будущего. То, что мы имеем в настоящем, дает большую уверенность в успехе, поэтому о будущем конденсаторе можно говорить, не гадая.

Прежде всего это будет конденсатор с искусственным диэлектриком, с громадным диэлектрическим коэффициентом порядка десятков тысяч. Такой конденсатор будет построен в ближайшее время на основе соединений двуокиси титана TiO_2 с окислами металлов. Здесь надо лишь остановиться на соединениях, дающих наибольшие значения ϵ , и разрешить вопросы малых диэлектрических потерь и, главное, дешевой технологии. С других точек зрения эти материалы идеальны, обладая прочностью как диэлектрической, так и механической, и большой температуростойкостью и теплопроводностью, необходимой для создания напряженного по использованию материала конденсатора.

Конденсатор с органическим диэлектриком, с большим диэлектрическим коэффициентом, конечно, не исключен. Известна, например, сегнетовая соль, но здесь пока нет конкретных путей для создания нового материала. Затем органические материалы обладают рядом недостатков, в том числе малой теплопроводностью и температуростойкостью.

Задаваясь вопросом, что даст новый конденсатор технике, прежде всего можно ответить, что в тех областях, где конденсатор уже применяется, например, в области радио, он облегчит конструкции, повысит к. п. д. и значительно удешевит стоимость. Еще большее значение он будет иметь в высокочастотной промышленной электротехнике, где помимо вопросов экономики он позволит решать новые задачи.

Однако, подлинно революционизирующее значение новый конденсатор будет иметь в тех областях электротехники, в которых до сих пор не могли применяться резонансные схемы из-за громоздкости, стоимости и несовершенства существующих конденсаторов, а именно в области электромашиностроения, преобразования электропривода и отчасти передачи электроэнергии.



Коммутационные перенапряжения при отключении линий, работающих в режиме холостого хода

Кандидат техн. наук Р. М. КАНТОР

Всесоюзный электротехнический институт

Проблема коммутационных перенапряжений в высоковольтных электрических сетях приобрела за последние годы весьма актуальное значение. В 1940—1941 гг. лабораторией перенапряжений ВЭИ было начато в сетях 220 кВ и 110 кВ Мосэнерго и сети 154 кВ Днепроэнерго экспериментальное исследование¹ коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении холостых линий. В названных сетях было проведено в общей сложности до 50 опытов, и получено свыше 100 катодных осциллограмм напряжения как на отключаемой холостой линии, так и на шинах подстанций, от которых производилось отключение. Несмотря на различие в параметрах и схемах коммутации сетей результаты опытов показали, что во всех исследованных случаях процессом генерации и формой коммутационных перенапряжений управляет единый механизм. Важно отметить, что ни на одной из многочисленных осциллограмм не отразилось каких-либо отклонений от этого механизма.

В настоящей статье рассматривается вопрос о механизме и форме коммутационных перенапряжений при отключении холостых линий электропередачи, и излагаются методы расчета. Вопрос о величине этих перенапряжений в реальных сетях может быть решен лишь систематическими исследованиями в течение ряда лет при помощи различного рода измерительной аппаратуры.

Интересующий нас вопрос рассмотрен на примере результатов, полученных в сети 220 кВ¹, расчетная схема которой показана на рис. 1². В этом случае холостая линия электропередачи длиной 240 км отключалась от шин подстанции, к которым был присоединен трехобмоточный трансформатор 180 МВА и вторая линия такой же длины, нагруженная на другом конце трансформатором той же мощности.

Схема подстанции сети 154 кВ, где производились аналогичные исследования, отличалась от схе-

Представлены результаты экспериментального исследования механизма генерации коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении холостых высоковольтных линий электропередачи. В приложении приведен теоретический расчет формы исследованных перенапряжений, результаты которого полностью совпадают с экспериментальными данными.

мы рис. 1 тем, что длина холостой линии была 65 км и к шинам было присоединено 5 линий электропередачи разной длины, а также другой величины индуктивности эквивалентного трансформатора

на подстанции. В третьем случае, в сети 110 кВ длина отключаемой холостой линии была около 100 км; было две работающих линии той же длины. Как мы увидим в дальнейшем, состав узловой точки (подстанции), от которой производится отключение холостой линии и ее длина, определяет форму коммутационных перенапряжений.

Механизм коммутационных перенапряжений. Начнем рассмотрение с вопроса о механизме коммутационных перенапряжений. Как известно, возбуждение перенапряжений приписывается кумулятивному действию многократного повторного зажигания дуги в выключателе на остаточный заряд отключаемой линии. При повторном зажигании дуги между контактами выключателя сети возникает переходный режим, в течение которого по холостой линии распространяется электромагнитная волна определенной формы, изменяющая при своем движении потенциал линии. Распространение основной электромагнитной волны продолжается до момента последующего гашения дуги. В этом процессе оставался невыясненным до последних лет вопрос о частоте, управляющей моментом гашения и зажигания дуги в выключателе. Были выдвинуты три различных гипотезы, которые можно схематически представить в виде следующей таблицы [Л. 2].

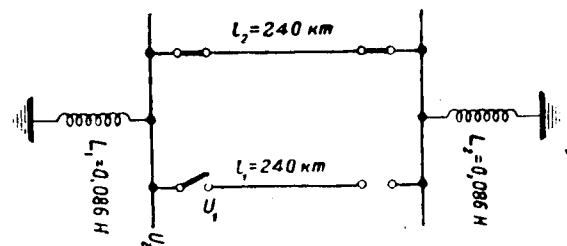


Рис. 1. Расчетная схема.

¹ Эти измерения производились инж. Н. С. Громовым при помощи многолучевого катодного осциллографа с горячим катодом и механической разверткой.

² Результаты экспериментов изложены подробно в отчетах ВЭИ [Л. 1].

⁴ Электричество, № 2.

Таблица 1

Схема генерации коммутационных перенапряжений

Нач.льное состояние — выключатель замкнут

Гипотеза	Первое гашение дуги	Первое повторное зажигание дуги	Второе гашение дуги	Второе повторное зажигание дуги	Третье гашение дуги	и т. д.
1	оч	сч	сч	сч	сч	
2	оч	оч	оч	оч	оч	
3	оч	оч	сч	оч	сч	

оч — основная, 50-периодная частота; сч — частота собственных колебаний.

Первое гашение дуги по всем трем гипотезам происходит, когда емкостный ток основной частоты отключаемой холостой линии проходит через нуль. По первой гипотезе как повторные зажигания, так и последующие гашения дуги между контактами выключателя управляются частотой собственных колебаний в данной сети. Согласно второй гипотезе повторное зажигание дуги произойдет, когда нормальное 50-периодное напряжение сети на контакте со стороны шин переходит через максимум соответствующего знака, а последующее гашение этой дуги произойдет также при прохождении тока дуги основной частоты через нуль. Таким образом по этой гипотезе процесс генерации перенапряжений управляется исключительно основной частотой системы. По третьей же гипотезе повторное зажигание дуги управляется основной частотой, а гашение дуги — частотой собственных колебаний, представляющих собой, поскольку имеем дело с движением электромагнитных волн по линии, — волновой процесс.

Посмотрим, теперь, какая из этих трех гипотез оказывается наиболее близкой к действительности. На рис. 2а представлена типичная катодная осциллограмма, снятая на холостой линии на стороне линейного электрода выключателя. На рис. 3 дан в увеличенном виде конец этой осциллограммы. Моменты повторного зажигания обозначены номерами 12, 19, 24, 27. Сравнивая интервалы времени между двумя последовательными повторными зажиганиями, т. е. 12—16, 16—19, 19—24, 24—27 с кривой нормальной частоты между точками 0 и 1 мы видим, что величина этих интервалов во всех случаях приблизительно равна полупериоду нормальной частоты. Продолжительность горения дуги характеризуется участками осциллограммы между точкой пробоя дугового промежутка и началом восстановления напряжения, т. е. на рис. 3 участками кривой между 19' и 20, 24' и 25, 27' и 28. Длина этих участков, т. е. примерная продолжительность горения дуги при данном повторном зажигании, на всех без исключения осциллограммах для рассматриваемой линии длиной 240 км

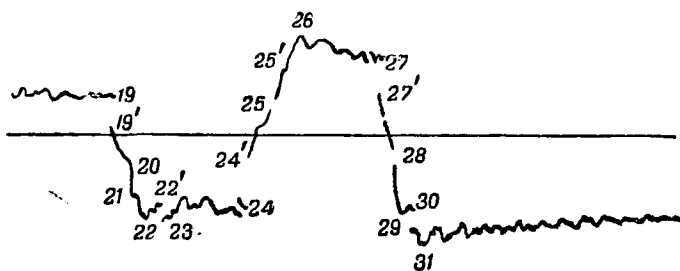


Рис. 3. Конец процесса по рис. 2 в увеличенном виде.

получается около 1600 мсес. С другой стороны, время двукратного пробега электромагнитной волны по линии длиной в 240 км, т. е. от подстанции до открытого конца и обратно $\tau = 2t_0 = \frac{2l}{c} = 1600 \mu\text{sec}$, считая, что $c = 300\,000 \text{ km/sec}$. Это совпадение не случайное. Период уравнивающих колебаний совпадает также со временем двойного пробега, т. е. равен 1600 мсес.

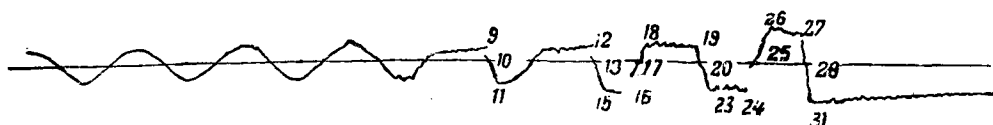
Совершенно аналогичными получились результаты осциллографических измерений в сети 154 kV. Здесь также интервалы времени между двумя последовательными зажиганиями получаются порядка полупериода основной частоты, а продолжительность горения дуги — около 400 мсес. Длина отключаемой холостой линии равна 64 км, следовательно, время двойного пробега $\tau = \frac{128}{300\,000} \text{ sec} =$

$= 430 \mu\text{sec}$. В сети 110 kV, где длина отключаемой холостой линии была около 100 км, а поэтому $\tau = 670 \mu\text{sec}$, интервалы времени между последовательными повторными зажиганиями получились порядка полупериода нормальной частоты, а продолжительность горения дуги в этом случае была около 650 мсес.

Итак, анализом катодных осциллограмм, полученных в различных по напряжению и конфигурации сетях установлено, что в процессе отключения холостой линии момент повторного зажигания управляется частотой нормальной частоты напряжения, а момент погасания вновь зажегшейся дуги — в основном процессами, имеющими место в переходном режиме под действием данного повторного зажигания. Следовательно, процесс генерации коммутационных перенапряжений на холостых линиях передачи лучше всего отражает третья гипотеза.

Теоретически по третьей гипотезе представляют себе процесс так, что повторное зажигание происходит, когда напряжение на контакте выключателя со стороны шин проходит через максимум, ибо в этот момент имеется максимальное напряжение на выключателе. Однако на осциллограммах, снятых на шинах, напряжение в момент пробоя отнюдь не совпадает с максимумом напряжения. Это объясняется тем, что пробой дугового промежутка в ма-

Рис. 2. Катодная осциллограмма напряжения в начале холостой линии передачи 220 kV.



сляют выключателе есть явление статистическое. В силу этих причин закон кумулятивного нарастания напряжения на линии также испытывает статистические колебания и сильно отличается от рассматриваемого ниже теоретического закона кумулятивного нарастания. Эти колебания зависят от потерь в системе и от реальной характеристики восстановления диэлектрической прочности в дуговом промежутке выключателя.

Форма коммутационных перенапряжений. Форма коммутационных перенапряжений зависит от параметров электрической сети, т. е. от длины отключаемой холостой и работающих линий, а также от состава узловых точек сети (т. е. числа линий, индуктивностей и емкостей, сосредоточенных в узловых точках), где происходят отражение и преломление движущихся электромагнитных волн.

Сопоставляя полную картину процесса генерации коммутационных перенапряжений, так как она получается теоретически из расчета на рис. 4а (см. приложение), с действительным процессом на рис. 3, мы видим, что удалось получить качественное совпадение теории с опытом. Поскольку потери в сети обычно влияют на периоды собственных колебаний меньше, чем на их амплитуду, неудивительно, что в наших опытах получается весьма точное совпадение теоретических значений для периодов собственных колебаний со значениями, измеряемыми по полученным осциллограммам.

Уровень коммутационных напряжений. Из рассмотренного выше механизма возбуждения коммутационных перенапряжений следует, что даже при наиболее благоприятных условиях, при полном отсутствии потерь в системе пробой дугового промежутка происходит при возможно наивысшей разности потенциалов на контактах выключателя,— все же с каждым последующим повторным зажиганием кумулятивный рост постепенно замедляется.

Согласно приведенным в приложении расчетным формулам после *n*-го повторного зажигания вдоль холостой линии в рассмотренной выше 220-kV сети устанавливается следующий средний остаточный потенциал U_{1n} (отнесенный к нормальному напряжению $U_{\phi \text{ макс}}$)

$$U_{1n} = 1,78 - 0,78 U_{1(n-1)}$$

Принимая условно знак напряжения на холостой линии после первого погасания дуги за положительный, приходим к следующей закономерности кумулятивного возрастания перенапряжений, представленной в табл. 2.

Таблица 2

Среднее значение остаточного потенциала U_1 после данного повторного зажигания

№ повторного зажигания	0	1	2	3	4	5	6	7	<i>n</i>	<i>n</i> +1
	1	-2,56	3,78	-4,73	5,47	-6,05	6,49	-6,83	-8	8

Итак, даже чисто теоретически предельное повышение напряжения рассмотренной нами сети 220 kV достигает лишь 8-кратного значения от нор-

мального максимального напряжения. Активные потери и в особенности потери на корону, испытываемые движущейся электромагнитной волной, должны резко снизить как темп нарастания, так и величину предельного напряжения.

В табл. 3 представлена часть (наиболее типичных) опытных данных, этого остаточного напряжения, из которых видно, что в наших измерениях не было зарегистрировано особо значительных перенапряжений. Из этого отнюдь не следует, что они невозможны в данной сети. Необходимо лишь отметить, что характер данных табл. 3 следует объяснить потерями при движении волн по линиям и замедлением кумулятивного роста напряжений наряду с другими факторами (реальной характеристикой дугового промежутка, влиянием железа трансформаторов и т. д.), значение которых в настоящее время трудно оценить.

Таблица

Относительное значение остаточного потенциала на линии после данного повторного зажигания

Осциллограмма	1-го	2-го	3-го	4-го	5-го	Примечание
К-3	1,6	1,75	1,83	1,9	1,5	Максимальное значение остаточного потенциала на осциллограмме К-7 (см. рис. 3, точки 31, 26).
К-4	1,27	1,9	2,15	—	—	
К-5	1,15	1,05	1,78	1,6	—	
К-6	1,27	0,9	2,54	—	—	
Ж-6	1,45	2,0	1,45	1,9	2,1	
К-7	1,67	2,1	1,1	1,72	1,84	

В проведенных для упомянутой выше 154-kV сети расчетах также было получено полное качественное совпадение с зарегистрированной формой волны. В этом случае теоретический анализ приводит к еще меньшему значению для предельного остаточного напряжения. В зависимости от скорости деионизации дугового промежутка это предельное значение равняется 3- или 6-кратному перенапряжению.

Заключение. 1. Экспериментальное исследование коммутационных перенапряжений при отключении холостой линии электропередачи, проведенное в различных сетях, позволило установить с достаточной определенностью механизм, управляющий генерацией подобных перенапряжений, а именно: момент повторного зажигания управляется нормальной частотой, а момент погасания вновь зажегшейся дуги в выключателе управляется волновыми процессами, возникающими в системе при данном повторном зажигании.

2. Путем теоретического анализа удалось установить форму коммутационных перенапряжений. Между расчетными и экспериментальными результатами получается полное качественное, а если не учитывать потерь, и количественное совпадение.

3. Показано, что кумулятивное возрастание напряжения на холостой линии постепенно замедляется по мере увеличения числа повторных зажиганий, стремясь при этом к определенному предельному значению.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Расчет коммутационных перенапряжений. Естественно, что теоретический анализ базируется на целом ряде допущений, которые, однако, не должны исказить принципиальную картину процесса. Поскольку исследуемые системы работают с глухозаземленными нейтралью, каждая фаза рассматривается независимо от другой. Анализ проведен без учета активных потерь в системе, потерь на корону, насыщения трансформаторов и т. д. Выключатель имеет идеальную характеристику восстановления сопротивления дугового промежутка, т. е. это сопротивление мгновенно меняется скачком от нуля до бесконечности при прохождении тока через нуль и изменении его знака. Расчетная схема любого трансформатора (двух или трех обмоточного) принята в виде индуктивности рассеяния без учета каких-либо емкостей. Учет емкостей трансформатора не имеет существенного значения при наличии одной или нескольких линий, присоединенных параллельно с трансформатором к общим шинам. Таким образом для интересующих нас процессов получается расчетная схема, показанная на рис. 1.

Повторное зажигание дуги в выключателе в процессе отключения линии происходит под действием некоторой разности потенциалов $U_1 - U_2 = E$ на контактах выключателя, которую будем считать постоянной в течение возникающего при этом переходного процесса. Согласно принципу суперпозиции этот переходный режим соответствует внезапному включению напряжения $-E = U_2 - U_1$ между операторными величинами сопротивлений $Z_1(p)$ и $Z_2(p)$.

При этом по цепи (и через дугу, сопротивление которой считаем равным нулю) потечет ток

$$i = - \frac{E}{Z_1(p) + Z_2(p)}. \quad (1)$$

Изучаемый нами переходный режим есть процесс движения определенных электромагнитных волн по линиям, входящим в состав $Z_1(p)$ и $Z_2(p)$.

Как известно из операторного исчисления, уравнение движущейся в прямом направлении волны для напряжения

$$u(p, x) = u(p) e^{-\frac{x}{c} p}, \quad (2)$$

для тока

$$i = \frac{u(p, x)}{Z} = \frac{u(p)}{Z} e^{-\frac{x}{c} p}$$

где $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ — волновое сопротивление линии,

$c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ — скорость движения волны, равная скорости света.

$$e^{-\frac{x}{c} p} = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \frac{x}{c} \\ 1 & \text{при } t > \frac{x}{c} \end{cases} \quad (3)$$

представляет собой функцию запаздывания, а $u(p)$ есть переходное напряжение в точке $x=0$; в нашем случае — это напряжение на контактах выключателя. Следовательно, по линии слева от выключателя (по холостой линии) будет распространяться электромагнитная волна

$$\left. \begin{aligned} u_1(p, x) &= u_1(p) e^{-\frac{x}{c} p}, \\ i_1(p, x) &= \frac{u_1(p)}{Z} e^{-\frac{x}{c} p} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где

$$u_1(p) = Z_1(p) i = -E \frac{Z_1(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)}, \quad (5)$$

а по линии справа от выключателя (по нагруженной линии)

$$u_2(p, x) = u_2(p) e^{-\frac{x}{c} p},$$

$$i_2(p, x) = - \frac{u_2(p)}{Z} e^{-\frac{x}{c} p}, \quad (6)$$

где

$$u_2(p) = -E \frac{Z_2(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)}. \quad (7)$$

После отражения волны $u_1(p, x)$ и $i_1(p, x)$ от конца линии с коэффициентом отражения μ_1' напряжение и ток в любой точке $x > 0$ определяется как сумма прямой и отраженной волн

$$\left. \begin{aligned} u_1'(p, x) &= u_1(p) \left[e^{-\frac{x}{c} p} + \mu_1' e^{-\frac{2l_1 - x}{c} p} \right] \\ i_1'(p, x) &= \frac{u_1(p)}{Z} \left[e^{-\frac{x}{c} p} - \mu_1' e^{-\frac{2l_1 - x}{c} p} \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где l — длина линии, а функция запаздывания

$$e^{-\frac{2l_1 - x}{c} p} = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \frac{2l_1 - x}{c} \\ 1 & \text{при } t > \frac{2l_1 - x}{c} \end{cases}. \quad (9)$$

Аналогично для волны, движущейся по второй линии

$$\left. \begin{aligned} u_2'(p, x) &= u_2(p) \left[e^{-\frac{x}{c} p} + \mu_2' e^{-\frac{2l_2 - x}{c} p} \right], \\ i_2'(p, x) &= - \frac{u_2(p)}{Z} \left[e^{-\frac{x}{c} p} - \mu_2' e^{-\frac{2l_2 - x}{c} p} \right] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Так как общие шины представляют собой сложную узловую точку, то по приходе отраженных волн к началу линии произойдет второе отражение с коэффициентом отражения μ_1'' (и соответственно μ_2''), и поэтому теперь

$$\left. \begin{aligned} u_1''(p, x) &= u_1(p) \left[e^{-\frac{x}{c} p} + \mu_1' e^{-\frac{2l_1 - x}{c} p} + \right. \\ &\quad \left. + \mu_1 \mu_2 e^{-\frac{2l_1 + x}{c} p} \right], \\ i_1''(p, x) &= \frac{u_1(p)}{Z} \left[e^{-\frac{x}{c} p} - \mu_1' e^{-\frac{2l_1 - x}{c} p} + \right. \\ &\quad \left. + \mu_1' \mu_1'' e^{-\frac{2l_1 + x}{c} p} \right], \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где функция запаздывания

$$e^{-\frac{2l_1 + x}{c} p} = \begin{cases} 0 & \text{при } t < \frac{2l_1 + x}{c} \\ 1 & \text{при } t > \frac{2l_1 + x}{c} \end{cases} \quad (12)$$

(для краткости мы опускаем соответствующие выражения для $u_2''(p)$ и $i_2''(p)$).

В схеме на рис. 1 вследствие равенства $l_1 = l_2$ одновременно с отражением от шин на $u_1''(p, x)$ и $i_1''(p, x)$ накладывается преломленная волна, переходящая со второй линии на первую, равная

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1'' &= u_2(p) \mu_2' (1 + \mu_2'') e^{-\frac{2l_2 + x}{c} p}, \\ \Delta i_1'' &= - \frac{\Delta u_1''}{Z} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

на $u''_2(p, x)$ и $i''_2(p, x)$ накладывается преломленная волна, переходящая с первой линии на вторую:

$$\Delta u''_2 = u_1(p) \mu'_1 (1 + \mu''_1) e^{-\frac{2l_1 + x}{e} p}, \quad (14)$$

$$\Delta i''_2 = \frac{\Delta u''_2}{Z}.$$

Картину измерения коммутационных перенапряжений в начале холостой линии передачи мы получаем при подстановке $x=0$ в выражения для $u''_1(p, x)$ и $i''_1(p, x)$, а на шинах подстанции — при $x=0$ в выражениях для $u''_1(p, x)$ и $i''_2(p, x)$.

В общем случае, когда число параллельных линий (не считая отключаемой холостой линии передачи) равно n , а трансформаторы и генераторы, присоединенные к шинам, замещены общей индуктивностью L_1 , то

$$Z_1(p) = Z = \sqrt{\frac{L}{c}}, \quad (15)$$

$$Z_2(p) = \frac{\frac{Z}{n} L_1 p}{\frac{Z}{n} + L_1 p}$$

$$u_1(p) = \frac{Z}{Z + \frac{Z L_1(p)}{Z + n L_1 p}} = \frac{\alpha}{p + \alpha} + \frac{n}{n + 1} \frac{p}{p + \alpha},$$

$$u_2(p) = -\frac{1}{n + 1} \frac{p}{p + \alpha}; \quad \alpha = \frac{Z}{(n + 1) L_1}.$$

Для сети 220 кВ, где $n + 1 = 2$; $L_1 = L_2 = 0,036$ Н, $Z = 400 \Omega$, $l_1 = l_2 = 240$ км, $\tau = 2l/c = 1600 \mu\text{sec}$, $\mu = (430 \mu\text{sec})^{-1}$,

$$u_1(p) = \frac{\alpha}{p + \alpha} + \frac{1}{2} \frac{p}{p + \alpha}, \quad (16)$$

$$u_2(p) = -\frac{1}{2} \frac{p}{p + \alpha},$$

$$\mu'_1 = 1; \quad \mu'_2 = \frac{p - 2\alpha}{p + 2\alpha}; \quad \mu''_1 = \mu''_2 = -\frac{\alpha}{p + \alpha}.$$

Подставляя эти данные в вышеприведенные формулы и находя соответствующие начальные функции для получаемых операторных выражений по известным правилам операторного

исчисления, мы получаем для изменения напряжения в начале холостой линии от момента повторного зажигания до момента гашения дуги и восстановления напряжения следующее выражение:

$$u_1 = E \left(1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{t}{430}} \right) + E \left\{ 4 e^{-\frac{t}{430}} - 4 e^{-\frac{2t}{430}} - \frac{t}{430} e^{-\frac{t}{430}} \right\} t - 1600, \quad (17)$$

где время t дано в микросекундах, а символ $\{ \dots \} t - 1600$ означает, что до момента $t = 1600 \mu\text{sec}$ заключенная в скоб-

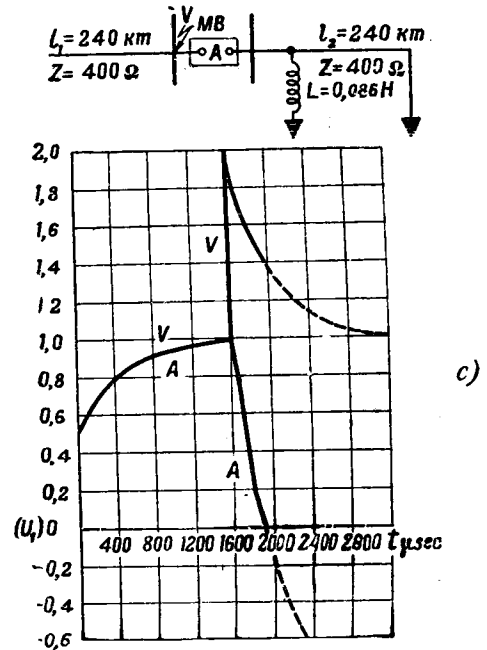
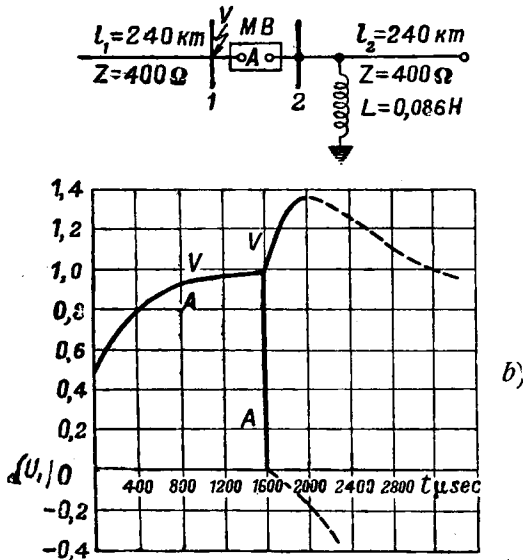
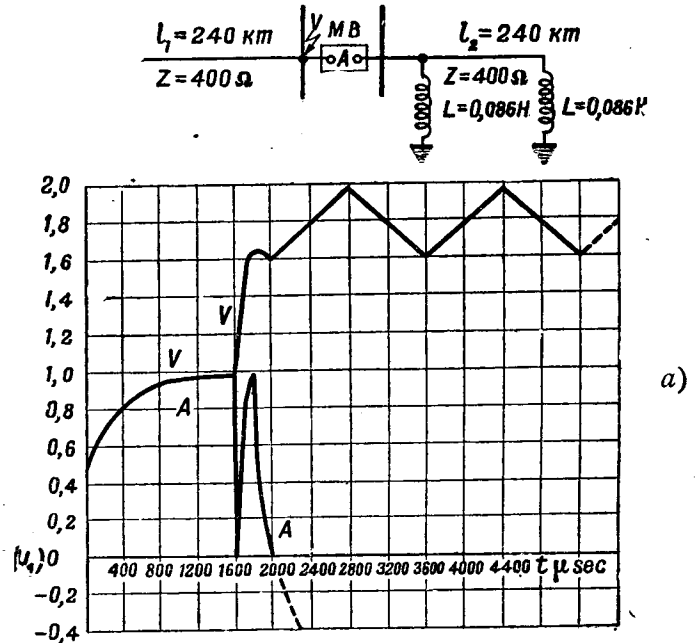


Рис. 4. Импульсы напряжения и тока в начале холостой линии передачи при повторном зажигании дуги MB; масштаб напряжения: $u = V(U_2 - U_1)$, масштаб тока: $i = A \frac{U_2 - U_1}{Z}$, U_1 — напряжение на контакте MB со стороны линии в момент повторного зажигания; U_2 — то же со стороны шин; а — вторая линия замкнута на индуктивность; б — вторая линия разомкнута; в — вторая линия заземлена.

как функция отсутствовала и вступила в действие лишь с момента $t = 1600$ мсек, т. е. этот символ представляет собой

оригинал для операторной функции запаздывания $e^{-\frac{2l+x}{c}p}$ в точке $x=0$.

Переходное напряжение на шинах подстанции соответственно будет:

$$u_2 = -\frac{1}{2} E e^{-\frac{t}{430}} + E \left\{ 4 e^{-\frac{t}{430}} - 4 e^{-\frac{2t}{430}} - \frac{t}{430} e^{-\frac{t}{430}} \right\}_{t-1600}, \quad (18)$$

а ток через дугу в выключателе

$$i = \frac{E}{400} \left(1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{t}{430}} \right) + \frac{E}{400} \left\{ 5 e^{-\frac{t}{430}} - 2 - 4 e^{-\frac{2t}{430}} - \frac{t}{430} e^{-\frac{t}{430}} \right\}_{t-1600}. \quad (19)$$

Так как u_1 , u_2 представляют собой изменение напряжения относительно начального значения в момент повторного зажигания, то его фактическое значение в начале холостой линии будет $u_1 + U_1$, а на шинах — $u_2 + U_2$.

На рис. 4а дано графическое изображение напряжения u_1 (кривая V от начала до точки O') и тока i_1 (кривая A до точки O'') в относительных единицах. Форма кривой u_1 , а также своеобразная форма кривой тока через выключатель а именно мгновенное падение тока до нуля в момент $t = 1600$ мсек, а затем повторный подъем и последующее плавное снижение до нуля в момент $t = 2000$ мсек объясняется условиями отражения и преломления движущихся электромагнитных волн в узловых точках сети (на концах и в начале обеих линий). Если и вторая линия передачи была бы разомкнута на своем конце, то для процесса в начале отключаемой холостой линии получилась бы картина, показанная на рис. 4б. Если, наоборот, вторая линия была бы наглухо заземлена на конце, то получилась бы картина, показанная на рис. 4с. При заземлении второй линии через индуктивность действительный процесс, получаемый в начале отключаемой холостой линии, естественно представляет собой переход от первой картины ко второй, что и имеет место на кривых рис. 4а.

В момент перемены знака тока (точка O'') происходит окончательное гашение дуги и полное восстановление диэлектрической прочности в выключателе (здесь уместно обратить внимание на то обстоятельство, что, как это видно из соответствующей формулы, сила тока в электромагнитной волне и, следовательно, сила тока через дугу достигает значительных величин, ничего общего не имеющих со значением нормального зарядного тока холостой линии). Продол-

жительность горения дуги при данном повторном зажигании несколько затягивается по сравнению со временем двойного пробега.

Электрический заряд, остающийся на холостой линии при гашении дуги в выключателе имеет в начале линии значение, соответствующее напряжению u_1 , равному $1,59 E$, а в конце линии — напряжению, определяемому формулой

$$u'_1 = \left\{ 2 - e^{-\alpha t} \right\}_{t-t_1} - \left\{ 1 - e^{-\alpha t} - \frac{1}{2} \alpha t e^{-\alpha t} \right\}_{t-3t_1}; \quad (20)$$

t_1 — момент гашения дуги, т. е. $u'_1 = 1,98 E$. Под влиянием этого неравномерного распределения остаточного потенциала вдоль линии возникает уравнивающий волновой процесс. Для расчета уравнивательных колебаний мы должны решить телеграфные уравнения

$$\left. \begin{aligned} -\frac{du}{dx} &= L p i, \\ -\frac{di}{dx} &= C p [u - u_0(x)]. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

При пограничных условиях

$$\left. \begin{aligned} u(0_1) &= 0, \\ i(p, l) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где $U_0(x)$ — начальное распределение разности потенциалов между началом и концом.

Принимая это распределение линейным

$$u_0(x) = U_0 \frac{x}{l}, \quad (23)$$

получаем для уравнивательных колебаний напряжений в начале холостой линии следующее операторное выражение

$$\left. \begin{aligned} u_0(p, 0) &= U_0 \frac{1}{T p} \tanh \frac{T p}{2}, \\ T &= \sqrt{LC}. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Операторная функция $\varphi(p) = \frac{1}{T p} \tanh \frac{T p}{2}$ имеет своим

оригиналом периодическую зубчатую функцию с периодом $2T$ и амплитудой, равной единице при среднем значении, равном 0,5, как это показано в курсах операционного исчисления [Л. 3].

Литература

1. Р. М. Кантор. Исследование коммутационных перенапряжений в сетях 220 кВ и 154 кВ. Отчет ВЭИ, 1940. Исследование коммутационных перенапряжений в сети 110 кВ. Отчет ВЭИ, 1941.
2. Monteith, Evans, Wetke, Коммутационные перенапряжения. El. Eng., VIII, v. 58, № 8, p. 386, 1939.
3. А. Лурье. Операционное исчисление, М.—Л., 1938.



Обобщенные условия соразмерности трансформаторов и электрических машин

Доктор техн. наук, проф. В. А. ТРАПЕЗНИКОВ

Условия соразмерности или, как их иногда называют, „законы соразмерности“ трансформаторов и электрических машин были сформулированы М. Видмаром в 1918 г.

Условия Видмара выведены для „идеальных рядов“, у которых все модели геометрически подобны и имеют одинаковые нагрузки активных материалов (индукция B и плотность тока Δ). Эти ряды подчиняются следующим зависимостям: вес модели $G \equiv P^{3/4}$ и ее потери, выраженные в процентах, $p \equiv P^{-1/4}$, где P — мощность модели.

Изучая идеальные ряды, Видмар пришел к следующим соразмерностям наиболее экономичного трансформатора или машины: 1) стоимость меди равна стоимости стали; 2) стоимость и потери распределяются поровну между: а) ярами, б) сердечником или зубцами машины, в) лобовыми частями обмоток, г) частями обмоток трансформатора или машины, „утопленными“ в стали (активными частями обмоток).

Эти законы наложили известный отпечаток на практику проектирования трансформаторов. Однако они справедливы лишь в частном случае, когда стоимость обмотки равна стоимости стали, взятой в том же объеме, и кроме того при равенстве индукции в яре и в стержне или в зубцах. Конструктивные требования к тому же часто заставляют столь сильно нарушать сформулированные Видмаром условия соразмерности, что они в значительной мере теряют смысл при реальных расчетах.

Попытаемся найти более общие условия соразмерности трансформаторов и электрических машин.

В основу решения вопросов соразмерности положим понятие „приведенной стоимости“, характеризующей совершенство конструкции и материалов [Л. 3]. Приведенная стоимость

$$C' = Cp^{xy}n, \quad (1)$$

В работе показано, что условия соразмерности Видмара справедливы лишь в частном случае. Даны общие условия соразмерности, обеспечивающие наиболее экономичную конструкцию. Печатается в порядке обсуждения.

где C — действительная стоимость машины или трансформатора; p — потери в процентах; n — скорость вращения (об/мин);

x и y — показатели степени „реальных“ рядов, подчиняющихся соотношениям: $G \equiv P^x$ и $p \equiv P^{-y}$

для „идеальных“ рядов $x = 3/4$; $y = 1/4$; $\frac{x}{y} = 3$).

Как оказывается, приведенная стоимость определяется лишь геометрической формой и не зависит от электромагнитных нагрузок материала B и Δ .

Для получения наиболее рациональной конструкции необходимо всемерно уменьшать величину C' , так как действительная стоимость модели, выполненной с заданным к. п. д., пропорциональна приведенной стоимости.

Найдем обобщенное условие соразмерности лобовых частей обмоток. С этой целью изменим длину пакета стали L (рис. 1), сохраняя остальные размеры неизменными. Одновременно будем выбирать индукцию B таким образом, чтобы сохранить неизменным отношение потерь в меди P_m к потерям в стали P_c , характеризующее эксплуатационные свойства трансформатора,

$$\xi = \frac{P_m}{P_c}. \quad (2)$$

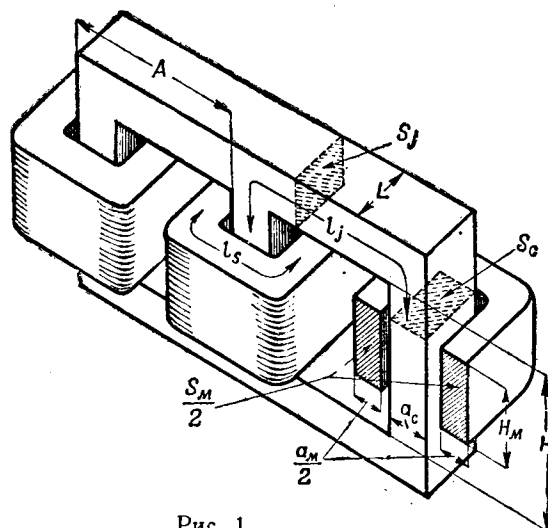


Рис. 1.

При этом будет изменяться как стоимость трансформатора C , так и его потери p , а следовательно, и приведенная стоимость C' , определяемая из (1). Найдя длину пакета, соответствующую минимуму приведенной стоимости C' ($\frac{dC'}{dL} = 0$), получим условие соразмерности лобовых частей¹:

$$\frac{C_0}{C} + \frac{x}{2y} \cdot \frac{P_0}{P_m} = 1. \quad (3)$$

Здесь C_0 — стоимость лобовых частей обмотки и P_0 — потери в лобовых частях обмотки.

Потери в меди $P_m = \frac{\xi}{1+\xi} \cdot P_n$, поэтому выражение (3) можно написать и в следующем виде:

$$\frac{C_0}{C} + \frac{x}{2y} \cdot \frac{1+\xi}{\xi} \cdot \frac{P_0}{P_n} = 1. \quad (4)$$

Здесь P_n — полные потери трансформатора или машины.

Выражения (3) и (4) в равной мере справедливы для трансформаторов и вращающихся машин, однако в стоимость лобовых частей машин должна быть включена стоимость щитов и других неактивных частей, не зависящих от длины пакета L .

Для трансформаторов, где соразмерности активной части могут рассматриваться независимо от неактивной части (бака), выражению (3) можно придать иной вид. Сечение меди одинаково во всех частях, поэтому

$$\frac{P_0}{P_m} = \frac{C_0}{C_m},$$

где C_m — стоимость всей обмотки.

Это позволяет написать условие соразмерности лобовых частей трансформатора в следующем виде:

$$\frac{C_0}{C} + \frac{x}{2y} \cdot \frac{C_0}{C_m} = 1. \quad (5)$$

Уравнение (5) показывает, что оптимальная соразмерность лобовых частей не зависит от распределения потерь между медью и сталью ξ .

Теперь найдем условие соразмерности ярма. Для этого будем изменять высоту стержней H и высоту обмотки, сохраняя все остальные размеры.

Выберем плотность тока в обмотке так, чтобы сохранить значение ξ . Найдем стоимость C , потери p и приведенную стоимость C' . Определив высоту стержней H , соответствующую минимуму C' , получим² условие соразмерности ярма:

$$\frac{C_j}{C} + \frac{x}{2y} \cdot \frac{P_j}{P_c} = 1. \quad (6)$$

Здесь C_j — стоимость ярма и P_j — потери в яре.

Выражение (6) можно написать в ином виде:

$$\frac{C_j}{C} + \frac{x}{2y} (1+\xi) \frac{P_j}{P_n} = 1. \quad (7)$$

Если сечение магнитопровода везде одинаково, то

$$\frac{P_j}{P_c} = \frac{C_j}{C_c},$$

и условие соразмерности ярма приобретает следующий вид:

$$\frac{C_j}{C} + \frac{x}{2y} \cdot \frac{C_j}{C_c} = 1. \quad (8)$$

Если сечения ярма и стержня различны, то выражение (8) усложняется:

$$\frac{\alpha}{\frac{C}{C_j} + (\alpha-1)} + \frac{x}{2y} \cdot \frac{1}{\alpha \cdot \frac{C_c}{C_j} - (\alpha-1)} = 1, \quad (9)$$

где

$$\alpha = \frac{B}{B_j} = \frac{S_j}{S_c}.$$

Уравнение (9) показывает, что оптимальная соразмерность ярма не зависит от ξ , т. е. от распределения потерь между медью и сталью.

Условие соразмерности ярма, справедливое для трансформаторов, к вращающимся машинам может быть отнесено лишь с большим приближением. С одной стороны, оно не может быть соблюдено вследствие наличия рассеяния, с другой, изменение высоты зубцов (эквивалентной высоте стержня H трансформатора) приводит к одновременному изменению веса станины и стоимости ярма и, следовательно, нарушает (2') [см. приложение II]. Выражения (3) и (6) представляют собой два основных условия соразмерности ярма и лобовых частей обмотки, заменяющие условия соразмерности Видмара о распределении потерь и стоимости.

Условия Видмара легко можно получить как частный случай. Например, приняв $\frac{x}{y} = 3$, $\xi = 1$ и $\frac{P_0}{P_n} = 1/4$, из (4) найдем $\frac{C_0}{C} = 1/4$; или, если согласно Видмару принять, что стоимость меди равна стоимости стали, т. е. $C_m = 0,5 \cdot C$, то из (5) найдем

$$\frac{C_0}{C} = 1/4.$$

Точно так же, полагая сечение магнитопровода одинаковым во всех частях магнитной цепи ($\alpha = 1$), из (6), (7) или (8) найдем как частный случай условия Видмара:

$$\frac{C_j}{C} = 1/4 \text{ и } \frac{P_j}{P} = 1/4.$$

Обратимся теперь к соразмерностям „ядра“, т. е. активной части трансформатора. Согласно Видмару эти соразмерности вытекают из основного условия, что стоимость стали C_c должна быть равна стоимости меди C_m .

Видмар приходит к этому условию следующим путем:

¹ Вывод дан в приложении I.

² Вывод дан в приложении II.

Потери в меди $P_m = m_m \Delta^2 C_m$, потери в стали $P_c = m_c B^2 C_c$, где m_m и m_c — постоянные, откуда

$$\frac{B^2}{\Delta^2} = \frac{m_m C_m}{\xi m_c C_c} \quad (10)$$

Это равенство Видмар разлагает на два с помощью коэффициента M .

$$B^2 = \frac{M m_m C_m}{\xi} \quad (11)$$

$$\Delta^2 = M \cdot m_c C_c \quad (12)$$

Так как полные потери

$$P_n = P_m + P_c = m_m \Delta^2 C_m + m_c B^2 C_c,$$

$$C_m \cdot C_c = \frac{P_n}{\left(1 + \frac{1}{\xi}\right) M \cdot m_m m_c} \quad (13)$$

В предположении $M = \text{const}$ при заданных потерях P_n из (13) получается $C_m C_c = \text{const}$.

Таким образом Видмар приходит к необходимости считаться лишь с конструкциями, подчиняющимися закону $C_m \cdot C_c = \text{const}$, а затем, добавляя выражение $C = C_m + C_c$, приходит к условию минимальной стоимости: $C_m = C_c$.

Однако, при всем остроумии этот вывод приводит к ошибочным результатам, вытекающим из предположения, что $M = \text{const}$. В самом деле, уравнения (11) и (12), полученные из (10), удовлетворяются при любом значении M , будет ли оно при изменении стоимостей C_m и C_c постоянным или переменным. Если же $M \neq \text{const}$, то условие $C_m \cdot C_c = \text{const}$, найденное из (13), может быть справедливым лишь в частных случаях. Поэтому к распределению активных материалов следует подойти иным путем.

Отбрасывая ярмо и лобовые части обмотки, рассмотрим ядро трансформатора, т. е. магнитопровод на протяжении H и обмотку на протяжении L (рис. 1), и постараемся установить наилучшее распределение материала внутри ядра.

Будем изменять размеры ядра в различных направлениях, сохраняя нагрузки B и Δ постоянными. При увеличении высоты стержня H мощность трансформатора

$$P \equiv S_c S_m \equiv S_c H \equiv H.$$

При этом стоимость ядра $C_y \equiv H$, т. е.,

$$\frac{C_y}{P} = \text{const}.$$

При увеличении длины пакета L

$$P \equiv S_c \cdot S_m \equiv L \cdot S_m \equiv L.$$

Для стоимости ядра будем опять иметь отношение

$$\frac{C_y}{P} = \text{const}.$$

При пропорциональном изменении размеров в направлении A (рис. 1) и сохранении H и L , получим:

$$P \equiv S_c S_m \equiv A \cdot A \equiv A^2,$$

$$\frac{C_y}{P} \equiv \frac{1}{A}.$$

Изменение ядра в различных направлениях приводит к различным результатам. Поэтому для получения сопоставимых данных необходимо изменять $A \equiv H \equiv L$, иначе говоря, сохранять общую геометрию ядра.

Если положить $L = \text{const}$ и $H = \text{const}$, то и $A = \text{const}$, следовательно, оптимальные соразмерности ядра следует искать при неизменном габаритном размере A .

Ошибка Видмара при исследовании оптимального распределения стоимости между медью и сталью заключалась в том, что оптимум определялся в условиях изменения размера A , что, как мы видели, недопустимо. Лишь в частном случае, когда стоимости обмотки и стали, взятых в одинаковых объемах, совпадают, перераспределение объемов, занимаемых обмоткой и сталью, не изменяет размера A . Именно в этом частном случае условие оптимума $C_m = C_c$ и оказывается справедливым.

Итак, перейдем к определению соразмерностей ядра в условиях постоянства размеров H , L и A .

При выводе будем пренебрегать влиянием рассеяния и намагничивающего тока, что возможно при анализе трансформатора, но недопустимо при анализе вращающейся машины. Поэтому в применении к вращающимся машинам выводы носят приближенный характер.

Габаритный размер A складывается из ширины обмотки a_m , ширины пакета a_c и изоляционных промежутков $a_{из}$ (рис. 1):

$$A = a_m + a_c + a_{из}.$$

При изменении сечения меди и стали изоляционные промежутки сохраняются неизменными и при $A = \text{const}$ можно написать:

$$a_m + a_c = \text{const}.$$

Варьируя размеры a_m и a_c , будем изменять стоимость ядра C_y , определяемую ценами меди и стали. Одновременно с изменением a_m и a_c выбираем нагрузки B и Δ так, чтобы потери в меди и в стали ядра сохранились неизменными; однако мощность при этом окажется переменной, а следовательно, переменными будут как потери p , так и приведенная стоимость ядра $C'_y = C_y \cdot p^{xy}$.

Определив минимум $C'_я$, найдем⁴ условие соразмерности ядра трансформатора:

$$\nu^3 - \left(1 - \frac{2\nu}{x}\right) \left(\frac{k_m}{k_c} - 1\right) \nu - \frac{k_m}{k_c} = 0, \quad (14)$$

где $\nu = \frac{C_{м.я}}{C_{с.я}} = \frac{\text{стоимость меди ядра}}{\text{стоимость стали ядра}}$.

Для трансформатора

$$\frac{k_m}{k_c} = \frac{m_{из} f_m \gamma_m \psi_m}{f_c \gamma_c \psi_c} = \frac{\text{стоимость единицы объема обмотки}}{\text{стоимость единицы объема стержня}}. \quad (15)$$

Здесь: $f_m = \frac{S_m}{a_m H}$ — коэффициент заполнения обмотки „по оси“;

$f_c = \frac{S_c}{a_c L}$ — коэффициент заполнения стержня с учетом охлаждающих каналов;

$m_{из}$ — отношению веса изолированной меди к весу голы меди;

γ_m и γ_c — удельные веса меди и стали;

ψ_m и ψ_c — стоимости одного килограмма изолированной меди и стали.

Мы видим, что и условие соразмерности ядра не содержит ξ . Следовательно, все три условия соразмерности определяются лишь соотношением цен на материалы.

Уравнение (14), выражающее условие соразмерности ядра, представлено кривой 1 рис. 2. Как видим, $\nu=1$ (условие Видмара) справедливо лишь при $\frac{k_m}{k_c}=1$.

При весьма высокой цене на медь, например, при $\frac{k_m}{k_c}=10$, в оптимальном трансформаторе стоимость меди ядра достигла бы пятикратного значения стоимости стали ядра ($\nu=5$), тогда как по Видмару стоимости меди и стали всегда одинаковы ($\nu=1$) независимо от соотношения их цен.

Если выполнить трансформатор по Видмару, т. е. $\nu=1$ при $\frac{k_m}{k_c}=10$, то его ядро оказалось бы дороже оптимального на 90% (рис. 3), а полная стоимость трансформатора была бы выше оптимальной в 2÷3 раза.

Кривые приведенной стоимости ядра $C'_я$ (рис. 3), построенные согласно (2''') [см. приложение III], иллюстрируют эффект отклонения от условия (14). При построении кривых цена меди была принята неизменной, а цена стали уменьшалась.

На рис. 4 показано изменение приведенной стоимости ядра при отклонении от оптимального значения ($\nu_{опт}$)

Кривая 2 рис. 2 дает условие, при котором отступление от (14) увеличивает приведенную стоимость ядра на 5%.

Условие соразмерности ядра (14), найденное для трансформаторов, с некоторым приближением может быть отнесено к вращающимся машинам с явно выраженными полюсами. Для зубчатых якорей условие соразмерности имеет другой вид.

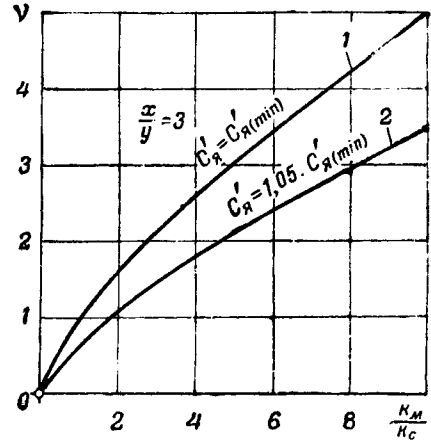


Рис. 2. Зависимость ν ($\nu = \frac{\text{стоимость меди ядра}}{\text{стоимость стали ядра}}$) от соотношения стоимостей меди и стали, взятых в одинаковых объемах.

1 — при соблюдении условия соразмерности ядра; 2 — при отклонении от него.

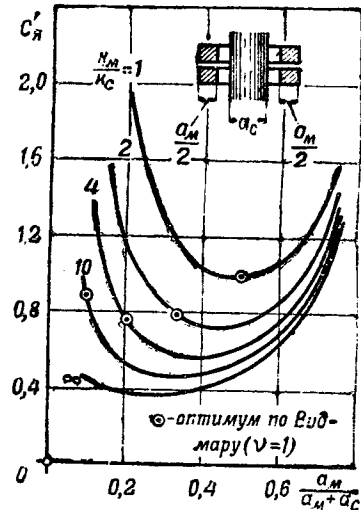


Рис. 3. Приведенная стоимость ядра трансформатора в зависимости от ширины обмотки a_m и ширины стали a_c .

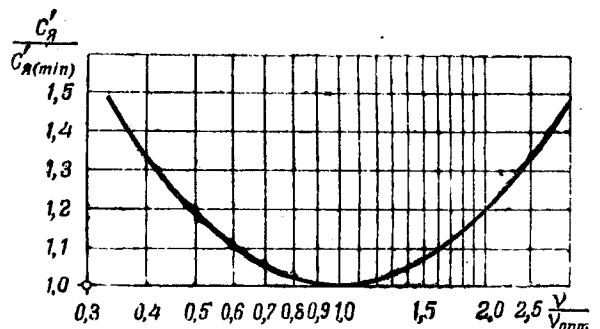


Рис. 4. Влияние отклонения от условия соразмерности ядра на его приведенную стоимость.

⁴ Вывод дан в приложении III.

В этом случае ширина паза не отражается на стоимости зубцов, определяемой стоимостью стали зубцового слоя, включая площадь пазов. Условие соразмерности зубцового слоя вращающихся машин получает следующий вид⁵:

$$\left(\frac{x}{y} - 1\right)y^3 + \left[\frac{x}{y} - \left(\frac{x}{2y} - 1\right)\frac{k_m}{k_c}\right]y - \frac{x}{2y} \cdot \frac{k_m}{k_c} = 0. \quad (16)$$

Здесь: $y = \frac{C_{м.я}}{C_{с.я}} = \frac{\text{стоимость меди зубцового слоя}}{\text{стоимость стали зубцового слоя}}$,

$$\frac{k_m}{k_c} = \frac{m_{из} \cdot f_m \cdot \gamma_m \cdot \mu_m (t_{1/3} - a_{из})}{f_c \cdot \gamma_c \cdot \mu_c \cdot t_{1/3}}, \quad (17)$$

где f_m — коэффициент заполнения паза без учета изоляции паза; $t_{1/3}$ — шаг паза на $1/3$ высоты зубца; $a_{из}$ — общая толщина изоляции паза по ширине.

Следует сделать оговорку. Выражение (16) не учитывает влияние рассеяния, приводящее к необходимости расширения паза. Поэтому условие соразмерности зубцового слоя (16) носит приближенный характер.

Выводы. Исследование показало, что условия соразмерности Видмара справедливы лишь в частных случаях, поэтому они могут быть названы „частными условиями соразмерности“.

Построение трансформатора на основе этих условий во многих случаях, например, при высокой цене меди, приводит к значительному его удорожанию.

Найденные „общие условия соразмерности“ ярма, лобовых частей и ядра, относительно которых условия соразмерности Видмара являются частным случаем, позволяют спроектировать оптимальный трансформатор с учетом реальных факторов⁶.

Общие условия соразмерности в виде (5), (9) и (14) позволяют сделать следующий весьма существенный вывод: оптимальная геометрия не зависит от распределения потерь между медью и сталью и определяется лишь соотношением цен на материалы⁷.

Этот вывод не мог быть сделан из условий соразмерности Видмара, рассматривающего вопросы стоимости и потерь раздельно.

Для электрических машин найденные условия соразмерности являются лишь первым приближением, они должны быть скорректированы в связи с явлением рассеяния и другими факторами, осложняющими анализ геометрии вращающихся машин.

⁵ См. приложение III.

⁶ Использование общих условий соразмерности для проектирования новых и для анализа выполненных конструкций рассмотрено автором самостоятельно.

⁷ Если нелинейность характеристик стали или условия охлаждения не заставляют отступить от оптимальной геометрии.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Пусть стоимость лобовых частей обмотки трансформатора (рис. 1) составляет C_0 , потери в лобовых частях P_0 . Изменяем длину пакета L , сохраняя остальные размеры. Общая стоимость трансформатора

$$C = \alpha_c L + C_0. \quad (1')$$

При неизменной плотности тока Δ потери в меди

$$P_m = \alpha_m L + P_0. \quad (2')$$

Чтобы сохранить эксплуатационные свойства трансформатора, следует сохранить также отношение ξ , а для этого необходимо изменить индукцию B в магнитопроводе. Потери в стали

$$P_c = \alpha_{ж} L \cdot B^2. \quad (3')$$

Поэтому индукция

$$B = \left(\frac{\alpha_m L + P_0}{\xi \alpha_{ж} L} \right)^{1/2}. \quad (4')$$

Мощность трансформатора

$$P = \alpha_p L \cdot B. \quad (5')$$

Здесь α_c , α_m , $\alpha_{ж}$ и α_p — коэффициенты пропорциональности.

Полные потери трансформатора

$$P_n = P_m + P_c = P_m \left(1 + \frac{1}{\xi} \right). \quad (6')$$

Потери трансформатора, выраженные в процентах,

$$p = 100 \cdot \frac{P_n}{P}. \quad (7')$$

Подставляя полученные соотношения в выражение приведенной стоимости $C' = Cp^{1/y}$, дифференцируя и приравнявая нулю $\left(\frac{dC'}{dL} = 0\right)$, найдем условие минимума приведенной стоимости, которое и дает основной закон соразмерности лобовых частей

$$\frac{C_0}{C} + \frac{x}{2y} \cdot \frac{P_0}{P_m} = 1.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Будем изменять высоту стержней H , сохраняя все остальные размеры. Пусть стоимость ярма составляет C_j , потери в нем P_j .

При строгом выводе ядро следует взять на протяжении l_j (рис. 1), т. е. отнести к ядру и части стержней на высоте $|H - H_m|$, определяемой конструктивными соображениями и требованиями изоляционной прочности и не зависящей от высоты обмотки H_m .

Независимость размера $(H - H_m)$ от высоты H_m приводит к отклонению реального ряда трансформаторов от законов идеального ряда. Однако для упрощения дальнейших выводов, избегая излишней скрупулезности расчетов,

полагаем $\frac{H}{H_m}$ неизменным в пределах рассматриваемого отрезка ряда и будем оперировать с полной высотой стержня H .

Изменим высоту стержня H , поддерживая индукцию $B = \text{const}$, тогда потери в стали:

$$P_c = \alpha_{ж} H + P_j. \quad (1'')$$

Общая стоимость трансформатора

$$C = \alpha_c H + C_j. \quad (2'')$$

Изменяем плотность тока Δ так, чтобы сохранить ξ неизменным, тогда потери в меди:

$$P_m = \alpha_m H \Delta^2 \quad (3'')$$

и плотность тока

$$\Delta = \left[\frac{(\alpha_{ж} H + P_j) \xi}{\alpha_m H} \right]^{1/2}. \quad (4'')$$

Мощность трансформатора
его потери

$$P = \alpha_p H \Delta, \quad (5'')$$

и в процентах

$$P_n = P_c + P_m = P_c (1 + \xi) \quad (6'')$$

$$p = 100 \cdot \frac{P_n}{P}. \quad (7'')$$

Подставляя 1''—7'' в выражение приведенной стоимости $C' = C p^{x/y}$, дифференцируя и приравнявая нулю $\left(\frac{dC'}{dH} = 0\right)$, найдем условие минимума приведенной стоимости, которое и дает основной закон соразмерности ядра:

$$\frac{C_j}{C} + \frac{x}{2y} \cdot \frac{P_j}{P_c} = 1.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Будем изменять соотношение между шириной обмотки a_m и шириной пакета a_c (рис. 1) при условии

$$a_m + a_c = \text{const.}$$

Примем для упрощения $L = H = 1$ и $a_m + a_c = 1$. Тогда вес меди ядра (на одном стержне)

$$G_{м.я} = S_{мL} \cdot \gamma_m = S_m \gamma_m;$$

вес стали ядра (одного стержня)

$$G_{с.я} = S_c H \gamma_c = S_c \gamma_c,$$

γ_m и γ_c — удельные веса меди и стали.

Сечение меди на стержне

$$S_m = f_m, \quad a_m H = f_m a_m.$$

Сечение стали (стержня)

$$S_c = f_c a_c L = f_c a_c,$$

f_m и f_c — соответствующие коэффициенты заполнения.

Потери в меди ядра

$$P_{м.я} = p_m f_m \gamma_m a_m \Delta^2.$$

Потери в стали ядра

$$P_{с.я} = p_c f_c \gamma_c a_c B^2.$$

Отсюда

$$\Delta = \left(\frac{P_{м.я}}{p_m f_m \gamma_m a_m} \right)^{1/2} \quad \text{и} \quad B = \left(\frac{P_{с.я}}{p_c f_c \gamma_c a_c} \right)^{1/2}.$$

Мощность трансформатора

$$P = Af S_m S_c \Delta B = Af f_m f_c a_m (1 - a_m) \Delta B =$$

$$= Af f_m f_c a_m (1 - a_m) \left[\frac{P_{м.я} P_{с.я}}{p_m p_c f_m f_c \gamma_m \gamma_c a_m (1 - a_m)} \right]^{1/2},$$

A — постоянная; f — частота сети.

При изменении сечения меди и стали варьируем B и Δ так, чтобы потери $P_{м.я}$ и $P_{с.я}$ сохранялись неизменными.

Тогда потери ядра, выраженные в процентах, будут:

$$p = \frac{100 (P_{м.я} + P_{с.я})}{P} = \frac{100 (P_{м.я} + P_{с.я})}{Af} \left[\frac{P_{м.я} P_{с.я} f_m \gamma_c}{P_{м.я} P_{с.я} f_c \gamma_m} \right]^{1/2} \frac{1}{[a_m (1 - a_m)]^{1/2}} = \frac{N}{(a_m - a_m^2)^{1/2}}, \quad (1''')$$

где N — постоянная.

Стоимость ядра

$$C_{я} = C_{м.я} + C_{с.я},$$

где $C_{м.я}$, $C_{с.я}$ — стоимости меди и стали ядра.

Так как $H = L = 1$, то стоимость меди ядра.

$$C_{м.я} = k_m a_m H L = k_m a_m,$$

k_m — стоимость единицы объема обмотки.

Стоимость стали ядра

$$C_{с.я} = k_c a_c L H = k_c a_c,$$

k_c — стоимость единицы объема стержня с учетом охлаждающихся каналов между пакетами.

Стоимость всего ядра

$$C_{я} = k_m a_m + k_c a_c = k_m a_m + k_c (1 - a_m).$$

Отсюда найдем приведенную стоимость ядра:

$$C'_{я} = C_{я} p^{x/y} = [k_m a_m + k_c (1 - a_m)] \left[\frac{N}{(a_m - a_m^2)^{1/2}} \right]^{x/y}. \quad (2''')$$

Дифференцируя и приравнявая нулю $\left(\frac{dC'}{da_m} = 0\right)$, найдем условие минимума приведенной стоимости, которое и дает условие соразмерности ядра трансформатора:

$$y^2 - \left(1 - \frac{2y}{x}\right) \left(\frac{k_m}{k_c} - 1\right) y - \frac{k_m}{k_c} = 0.$$

Для зубчатых якорей, у которых изменение ширины паза не отражается на стоимости зубцов, определяемых стоимостью стали зубцового слоя, включая площадь пазов, уравнение (2''') приобретает такой вид;

$$C'_{я} = (k_m a_m + k_c) \left[\frac{N}{(a_m - a_m^2)^{1/2}} \right]^{x/y}. \quad (3''')$$

Дифференцируя и приравнявая нулю $\left(\frac{dC'_{я}}{da_m} = 0\right)$, найдем условие соразмерности зубцового слоя вращающихся машин*:

$$\left(\frac{x}{y} - 1\right) y^2 + \left[\frac{x}{y} - \left(\frac{x}{2y} - 1\right) \frac{k_m}{k_c}\right] y - \frac{x}{2y} \frac{k_m}{k_c} = 0.$$

Литература

1. Dr. M. Widmar. Der wirtschaftliche Aufbau der elektrischen Maschine, 1918. На русском языке: Д-р М. Видмар. Экономические законы проектирования электрических машин, Гостехиздат, 1924.

2. Проф. Г. Н. Петров. Распределение потерь и стоимости в активном материале трансформаторов ВЭТЭ, № 11, 1928.

3. В. А. Трапезников. О приведенном весе и стоимости в электромашиностроении. Электричество, № 14, 1935.

4. В. А. Трапезников. Основы проектирования серий асинхронных машин, ОНТИ, 1937.

* Анализ показывает, что для реальных рядов трансформаторов $\frac{x}{y} = 2,75 + 2,85$. Для них с достаточным приближением можно положить

$\frac{x}{y} = 3$. Для вращающихся машин x/y может изменяться в широким пределах и его значение должно быть найдено на основе изучения реальных рядов.



К расчету амплидинного генератора

Кандидат техн. наук Ф. А. ГОРЯИНОВ и инж. Г. К. САЛГУС

Московский энергетический институт им. М. Г. Волкова

Схемы электрического привода с амплидинными генераторами в настоящее время нашли всеобщее признание. В иностранной советской литературе достаточно подробно освещены как опыт работы установок с амплидинным управлением, так и вопросы общей теории самих амплидинов, в которой особенно тщательно разбирался принцип их действия. К сожалению, каких-либо указаний по расчету самой машины в этой литературе не приведено. В советской технической печати этот вопрос почти не освещался, хотя ряд организаций весьма серьезно занимается расчетом и конструкцией этой новой у нас машины. Статья доц. М. И. Романова [Л. 1] явилась первой работой, посвященной анализу явлений в амплидине, в которой автор приводит ряд общих положений о преимуществах применения амплидинов в известных схемах.

О расчете амплидина. С точки зрения электрического расчета амплидина можно представить себе в виде двух «элементарных» машин постоянного тока: 1) машины с независимым возбуждением, у которой роль обмотки возбуждения играет обмотка управления амплидина, и 2) машины, у которой обмотка якоря выполняет функции как возбuditеля (поперечная ось), так и генерирующей обмотки (продольная ось). Продольные щетки этой «элементарной» машины являются силовыми щетками амплидина.

Расчет следует вести, начиная со второй элементарной машины, исходя из заданных параметров амплидина: напряжения, мощности, скорости вращения и т. д. Магнитная цепь рассчитывается по величине главного рабочего потока, требуемого для получения необходимого напряжения на силовых щетках. С целью устранения влияния насыщения на работу амплидина магнитную систему делают ненасыщенной, допуская индукцию в воздушном зазоре в пределах 3 500—4 500 Gs.

Как известно, конструктивно амплидины выполняются или с явнополюсной магнитной системой или с равномерным зазором. Форма выполнения магнитной системы заметно влияет на параметры амплидина (усиление, постоянная времени), в случае необходимости иметь большой коэффициент усиления и малую постоянную времени следует остановиться на системе с равномерным зазором, хотя

В статье, посвященной некоторым вопросам расчета амплидина, уделено особое внимание специфическим параметрам амплидинного генератора: постоянной времени и коэффициенту усиления, для которых даны расчетные формулы и их анализ. Рассмотрено влияние компенсации поля рабочего тока на основные характеристики амплидина.

такая система представляет ряд трудностей при изготовлении (компаундные штампы статорного железа, усложнение обмоточных работ на статоре). Если особое быстроедействие не требуется,

может быть выбрана явнополюсная система как наиболее простая и по конструкции и в изготовлении.

Электрические нагрузки при явнополюсном варианте могут быть выбраны обычными для машин постоянного тока тех же мощностей; при системе с равномерным зазором их надо несколько уменьшить, так как лобовые соединения статорных обмоток получаются очень развитыми и затрудняют вентилирование. Выбор ненасыщенной магнитной системы увеличивает габариты и вес генератора, поэтому последний стремятся проектировать по возможности быстроходным. Скорость вращения авиационных амплидинов доходит до 8 300 об/мин.

Так как амплидин является машиной компенсированной, то воздушный зазор следует брать минимальным (исходя из механических соображений). Размер воздушного зазора сильно влияет на величину постоянной времени и коэффициента усиления амплидина, поэтому в ходе расчета для получения нужных параметров воздушный зазор претерпевает некоторые изменения, оставаясь тем не менее очень небольшим.

Так как якорь амплидина является и возбuditелем, и источником отдаваемой энергии, то по его обмотке текут одновременно два тока. Тепловые потери в меди якоря могут быть подсчитаны по формуле

$$P_{Cu} = (I_3^2 + I_2^2) R_x = I_3^2 R_x + I_2^2 R_x,$$

где R_x — омическое сопротивление обмотки якоря; I_3 — ток силовой цепи амплидина; I_2 — ток цепи возбуждения амплидина.

Таким образом тепловые потери в якоре являются суммой потерь на возбуждение и потерь от тока нагрузки амплидина. Эти суммарные потери пропорциональны квадрату эквивалентного тока $I_{экв} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2}$, который может быть принят за расчетный ток якоря также и при тепловом расчете амплидина.

Характеристики амплитуды при установившемся режиме. Характеристики амплитуды, выраженные аналитически, позволяют очень наглядно решать целый ряд вопросов расчета и настройки амплитуды.

В качестве исходных выражений могут быть взяты уравнения э. д. с. и напряжений для трех имеющихся в амплитуде электрических цепей (рис. 1):

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1 R_1, \\ E_2 &= I_2 R_2, \\ E_3 &= I_3 R_x + U_3, \end{aligned}$$

где R_2 — сопротивление цепи поперечной оси, включая сопротивление щеточных контактов и сопротивление обмотки дополнительных полюсов этой оси; R_x — сопротивление цепи продольной оси (силовой), включая сопротивление щеточных контактов, сопротивление обмоток дополнительных полюсов этой оси и компенсационной; R_1 — сопротивление обмотки управления амплитуды. Вывод аналитических выражений характеристик можно найти у Graybeal'a [Л. 4], который получил их в следующем виде:

а) характеристики холостого хода:

$$\begin{aligned} I_3 &= B \omega I_1, \\ U_3 &= BC \omega^2 I_1; \end{aligned}$$

б) характеристики короткого замыкания:

$$\begin{aligned} I_3 &= \frac{BR_x \omega}{AC \omega^2 + R_x} I_1, \\ I_3 &= \frac{BC \omega}{AC \omega^2 + R_x} I_1; \end{aligned}$$

в) нагрузочные характеристики:

$$\begin{aligned} U_3 &= -(AC \omega^2 + R_x) I_3 + BC \omega^2 I_1, \\ I_2 &= -A \omega I_3 + B \omega I_1. \end{aligned}$$

В этих уравнениях

$$A = \frac{L_A - M_{AK}}{R_2}; \quad B = \frac{M_{A1}}{R_2}; \quad C = L_A - M_{AD},$$

где ω — окружная скорость в радианах; L_A — коэффициент самоиндукции якоря; M_{AK} — коэффициент

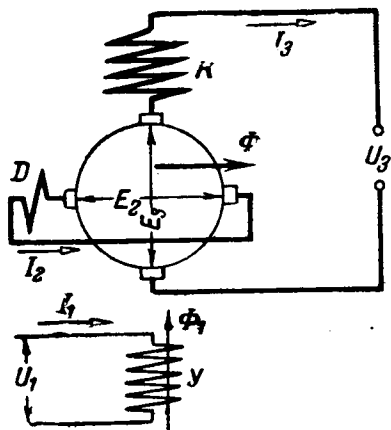


Рис. 1.

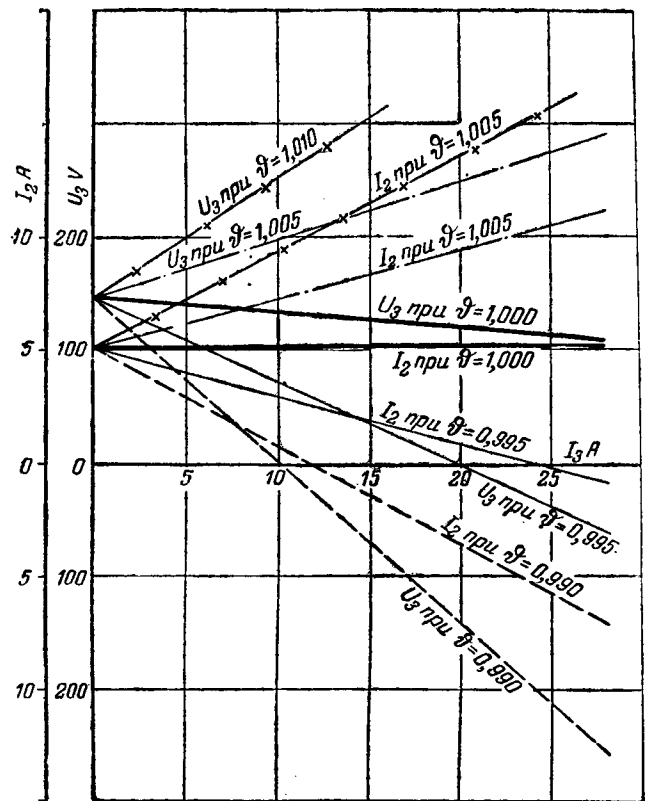


Рис. 2. Нагрузочные характеристики амплитуды АГ-3 при различной компенсации $n = 3000$ об/мин; $I_1 = 0,088$ А.

взаимоиндукции между якорем и компенсационной обмоткой K ; M_{A1} — коэффициент взаимоиндукции между якорем и обмоткой управления Y ; M_{AD} — коэффициент взаимоиндукции между якорем и обмоткой дополнительных полюсов D .

Амплитудные генераторы весьма чувствительны к настройке компенсации поля рабочего тока. Влияние компенсации на характеристики видно из уравнения

$$A = \frac{L_A - M_{AK}}{R_2},$$

в котором разность $(L_A - M_{AK})$ определяет неукомпенсированные поля рабочего тока. Преобразовав последнее уравнение, получим:

$$A = \frac{L_A - M_{AK}}{R_2} = \frac{1 - \frac{M_{AK}}{L_A}}{R_2} L_A = \frac{1 - \vartheta}{R_2} L_A,$$

где $\vartheta = \frac{M_{AK}}{L_A}$ — коэффициент компенсации.

На рис. 2 изображены нагрузочные характеристики амплитуды, из которых видно *сильное влияние коэффициента компенсации даже при незначительном его отклонении от единицы.*

Постоянная времени. Во многих схемах с амплитудным управлением скорость реагирования амплитуды на подаваемые сигналы является весьма существенным фактором. В силу своей электро-

магнитной схемы и конструкции современные амплидины могут иметь постоянную времени, равную 0,05 сек, что во много раз меньше, чем в обычных машинах постоянного тока.

Рассмотрим некоторые соотношения, из которых выявим факторы, влияющие на величину постоянной времени. Для распределенной по пазам обмотки амплидина значение постоянной времени может быть представлено в следующем виде:

$$T = \frac{L}{R} = \frac{W_{эф}^2 \lambda_{\delta} q}{\rho W l_w} = \frac{K_w^2 W \lambda_{\delta} q}{\rho l_w}$$

Здесь $W_{эф} = K_w W$ и K_w — обмоточный коэффициент, учитывающий различное сцепление витков обмотки с потоком; W — число витков обмотки; λ_{δ} — магнитная проводимость воздушного зазора; ρ — удельное сопротивление меди (при медной обмотке); l_w — средняя длина витка; q — поперечное сечение проводника.

Умножив и разделив значение T на γl_w , где γ — удельный вес меди, получим:

$$T = \frac{K_w^2}{\rho \gamma} \left(\frac{G}{l_w} \right) \left(\frac{\lambda_{\delta}}{l_w} \right),$$

где G — вес меди обмотки.

Отношение $\frac{G}{l_w}$ и $\frac{\lambda_{\delta}}{l_w}$ можно условно назвать относительным весом и относительной магнитной проводимостью. Обозначая их соответственно через g и λ , получим следующее выражение для T :

$$T = \frac{K_w^2}{\rho \gamma} g \lambda.$$

Следовательно, постоянная времени обмотки прямо пропорциональна: квадрату обмоточного коэффициента, относительной магнитной проводимости и относительному весу меди. В сосредоточенной обмотке коэффициент K_w равен единице.

Сопоставление быстродействия амплидина и схемы Леонарда говорит в пользу амплидина. Как в амплидине, так и в схеме Леонарда быстродействие процессов определяется постоянными времени двух цепей — ступеней усиления мощности.

Первая ступень амплидина содержит обмотку управления (цепь якоря по короткозамкнутым щеткам).

При наличии относительно мощной и мало использованной для целей возбуждения якорной обмотки поток управления требуется очень небольшой. Это определяет собой ничтожно малые размеры обмотки управления, а следовательно, очень небольшое значение относительного веса g обмотки управления. В результате этого постоянная времени первой ступени амплидина невелика.

В первой ступени схемы Леонарда имеется возбуждатель, являющийся обычной машиной постоянного тока с нормальными относительно своей системы возбуждения размерами якоря и с обычным использованием его. Поэтому обмотка возбуждения возбуждателя мощнее обмотки управления амплидина. Соответственно постоянная времени первой

ступени в схеме Леонарда больше, чем в амплидине.

Вторая ступень амплидина содержит обмотку возбуждения, совмещенную с якорной обмоткой, генерирующей выходную мощность. Перенесение обмотки возбуждения со статора на якорь и распределение ее по пазам сильно снижают как обмоточный коэффициент (примерно в $\sqrt{3}$ раз), так и относительный вес обмотки по сравнению со сосредоточенной и расположенной на полюсах статора обмоткой возбуждения генератора Леонарда. Следовательно, и во второй ступени каскада постоянной времени амплидина меньше, чем в схеме Леонарда. Поэтому результирующая постоянная времени амплидина меньше постоянной времени схемы Леонарда.

Наличие в амплидине двух контуров позволяет внести в расчет постоянные времени этих контуров: T_1 и T_2 . Общая постоянная времени амплидина (при холостом ходе) является сложной функцией этих составляющих, как это видно из уравнения для мгновенных значений тока возбуждения (поперечная ось):

$$i_2 = \frac{U_1 k}{R_1 R_2} \left[1 - \frac{e^{-\frac{t}{T_1}}}{1 - \frac{T_2}{T_1}} - \frac{e^{-\frac{t}{T_2}}}{1 - \frac{T_1}{T_2}} \right].$$

Это выражение является решением системы двух уравнений переходных процессов в амплидине при холостом ходе:

$$U_1 = i_1 (R_1 + pL_1),$$

$$ki_1 = i_2 (R_2 + pL_2),$$

так как его в этом режиме можно представить с точки зрения электрического процесса в виде двух контуров с параметрами $L_1 R_1$ и $L_2 R_2$ (рис. 3).

При работе амплидина на нагрузку кроме двух контуров добавляется третий: силовая цепь амплидина, характеризуемая вместе с нагрузкой параметрами L_3, R_3 . Поэтому постоянная времени амплидина под нагрузкой будет определяться уже тремя постоянными времени T_1, T_2 и T_3 , из которых последняя в сильной степени зависит от характера нагрузки генератора. При проектировании важно знать ту постоянную, которая является критерием качества данного амплидина безотносительно к

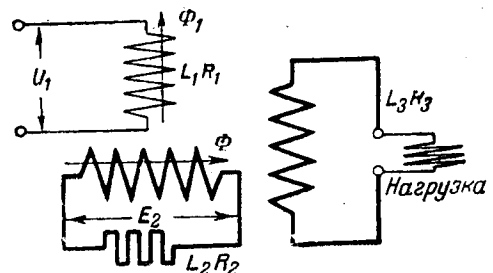


Рис. 3.

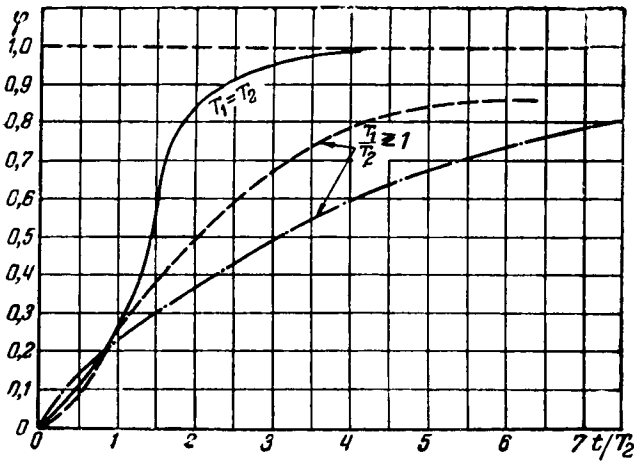


Рис. 4.

схеме. Такой величиной является постоянная времени на холостом ходу (т. е. скорость нарастания величины э. д. с. на клеммах генератора). Так как в нее в качестве составляющих входят две постоянные T_1 и T_2 , то интересно знать то оптимальное отношение их, при котором общая постоянная T будет минимальна.

На рис. 4 построена зависимость части выражения для i_2 , стоящей в скобках, от отношения $\frac{t}{T_2}$:

$$\varphi = 1 - \frac{e^{-\frac{t}{T_1}}}{1 - \frac{T_2}{T_1}} - \frac{e^{-\frac{t}{T_2}}}{1 - \frac{T_1}{T_2}}.$$

При различных соотношениях T_1 и T_2 видно, что оптимальным соотношением будет $T_1 = T_2$. Это может быть доказано также и аналитически.

Величина воздушного зазора δ в амплидине берется минимальной и определяется в основном производственными соображениями. Представляет интерес выяснить, как влияет величина δ на основные показатели амплидина: коэффициент усиления и постоянные времени T_1 и T_2 .

Примем постоянство электромагнитных нагрузок амплидина; пусть линейная нагрузка $AS = \text{const}$, магнитная индукция в воздушном зазоре $B_\delta = \text{const}$, плотность тока обмоток $j = \text{const}$. При заданной мощности амплидина

$$P_3 = U_3 I_3 = \text{const}$$

и скорости вращения $n = \text{const}$ число проводников якоря N_a , сечение проводника q_a и рабочий поток Φ остаются неизменными. Намагничивающий ток I_2 , пропорциональный произведению $B_\delta \delta$, равен

$$I_2 = C \delta.$$

Но так как $I_2 = \frac{E_2}{R_2}$, где $R_2 = \text{const}$, то поток управления Φ_1 , определяющий величину э. д. с. E_2 , будет $\Phi \equiv \delta$. В результате этого получаем, что намагни-

чивающая сила обмотки управления пропорциональна

$$AW_1 \equiv \Phi_1 \delta \equiv \delta^2.$$

Как известно, при постоянной плотности тока мощность, потребляемая обмоткой управления P_1 , пропорциональна AW_1 , откуда $P_1 \equiv \delta^2$. Следовательно, коэффициент усиления

$$K_{yc} = \frac{P_3}{P_1} \equiv \frac{1}{\delta^2}$$

уменьшается квадратично с ростом δ .

Так же нетрудно доказать, что постоянная времени контура управления $T_1 = \frac{L_1}{R_1} \equiv \delta$. Действительно, согласно предыдущим выводам

$$T_1 = \frac{K^2_w G_1 \Lambda_{\delta 1}}{R_1^2 w}.$$

Так как вес обмотки $G_1 \equiv P_1 \equiv \delta^2$, а магнитная проводимость потока управления $\Lambda_{\delta 1} \equiv \frac{1}{\delta}$, то после подстановки получаем $T_1 \equiv \delta$. Аналогично имеем для постоянной времени контура поперечного тока:

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} \equiv \frac{N_a^2 \Lambda_{\delta 2}}{R_2} \equiv \frac{1}{\delta}.$$

Так как $N_a = \text{const}$, $R_2 = \text{const}$ и $\Lambda_{\delta 2} \equiv \frac{1}{\delta}$. Нетрудно заметить, что произведение постоянных времени не зависит от значения δ : $T_1 T_2 = \text{const}$.

Коэффициент усиления. Коэффициентом усиления (по мощности) в амплидинном генераторе называется отношение электрической мощности на выходе к электрической мощности управления амплидина:

$$K_{yc} = \frac{I_3 U_3}{I_1 U_1},$$

где I_3 и U_3 — ток и напряжение силовой цепи; I_1 и U_1 — ток и напряжение управления. Этот коэффициент можно разбить на произведение двух коэффициентов усиления для каждой ступени:

$$K_{yc} = \left(\frac{I_3 U_3}{I_2 U_2} \right) \cdot \left(\frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \right) = K'_{yc} \cdot K''_{yc},$$

где I_2 и U_2 — напряжение и ток поперечной оси якоря. При этом общий коэффициент усиления распределяется по ступеням каскада неравномерно: K'_{yc} много больше K''_{yc} (например, для амплидина с $K_{yc} = 8600$, $K'_{yc} = 200$, $K''_{yc} = 43$). Такое неравномерное распределение объясняется ничтожно малыми размерами обмотки управления — возбуждения первой ступени при относительно больших размерах ее якоря.

Большой интерес представляет зависимость коэффициента усиления от тока нагрузки ампли-

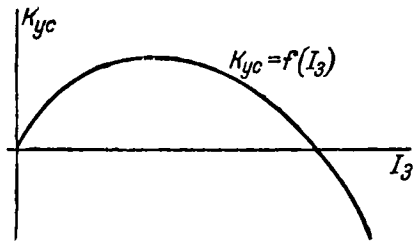


Рис. 5.

дина. Выражение нагрузочной характеристики можно записать в виде

$$U_3 = -MI_3 + NI_1,$$

где $M = AC\omega^2 + R_x$ и $N = BC\omega^2$. Тогда коэффициент усиления после подстановки примет вид

$$K_{yc} = \frac{U_3 I_3}{U_1 I_1} = \frac{-MI_3^2 + NI_3 I_1}{I_1^2 R_1} = -\frac{M}{R_1} \left(\frac{I_3}{I_1} \right)^2 + \frac{N}{R_1} \left(\frac{I_3}{I_1} \right).$$

Зависимость K_{yc} от I_3 приведена на рис. 5 ($I_1 = \text{const}$). Нетрудно доказать, что K_{yc} достигает максимума, равного

$$K_{yc \max} = \frac{N^2}{4MR_1}.$$

При коротком замыкании и холостом ходе $K_{yc} = 0$. Мощность амплидина при $K_{yc \max}$ имеет величину:

$$P_3 = \frac{N^3 I_1^3}{4M}.$$

Отметим, что перекомпенсация амплидина ведет к увеличению K_{yc} . Это видно, если ввести в значение K_{yc} коэффициент компенсации ϑ ,

$$K_{yc} = \left[\frac{(\vartheta - 1)L_A C \omega^2}{R_1 R_2} - \frac{R_x}{R_1} \right] \left(\frac{I_3}{I_1} \right)^2 + \frac{N}{R_1} \left(\frac{I_3}{I_1} \right).$$

Поэтому амплидин обычно работает с перекомпенсацией, которая, однако, несколько искажает характеристики из-за обратной связи и делает амплидин чувствительным к коротким замыканиям.

При расчете амплидина необходимо наиболее рационально выбирать соотношение K_{yc} и T , исходя из требований схемы, в которой амплидин будет работать. В большинстве схем постоянная времени амплидина не играет существенной роли, так как постоянные времени остальных звеньев схемы бывают значительно больше и поэтому они в конечном итоге определяют постоянную времени схемы в целом. В таких случаях основным параметром амплидина является коэффициент усиления, который может быть повышен за счет постоянной времени (без ущерба для надежности схемы). В схемах с малой постоянной времени приходится иметь пониженный коэффициент усиления. Такая ярко выраженная органическая связь параметров амплидина с рабочей схемой является его характерной чертой, что сильно роднит амплидин с аппаратом и реле.

Литература

1. М. И. Романов. Теория работы амплидина и области его применения. Электричество, № 11—12, 1944.
2. Alexanderson, Edwards, Brown. The Amplidyne Generator. A Dynamo-electric Amplifier for Power Control. GER, № 3, 1940.
3. Butler. Amplidyne Generatorsystem of Power Control, El. Times; v. 98, № 2543, 2544, 1940.
4. Graybeal. Steady State Theory of the Amplidyne Generator. El. Eng., № 10, 1942.



Геометрическое место токов асинхронной машины с переменным насыщением стали

Проф. Л. М. ПИОТРОВСКИЙ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Насыщение стали асинхронной машины, и прежде всего ее зубцов, определяется: а) основным потоком машины, зависящим от напряжения на зажимах ее первичной стороны U_1 , и б) потоками рассеяния, создаваемыми токами I_1 и I_2 , которые протекают по обмоткам статора и ротора машины. Таким образом индуктивное сопротивление машины $x_k = x_1 + x'_2 = f(U_1 \text{ и } I_2)$.

Если считать, что $U_1 = \text{const}$, то при увеличении токов I_1 и I_2 основной поток уменьшается по мере уменьшения э. д. с. E_1 , а потоки рассеяния увеличиваются. В машинах с фазным ротором с открытыми или полузакрытыми-полуоткрытыми пазами статора и ротора и ограниченными пределами изменения токов I_1 и I_2 влияние насыщения мало заметно, в соответствии с чем можно считать, что $x_k = \text{const}$. В машинах же с полузакрытыми пазами статора и закрытыми пазами ротора с изменением токов в широком диапазоне (например, в короткозамкнутых двигателях при прямом включении на сеть) сопротивление x_k может заметно изменяться. Геометрическое место токов такой машины отстает от круговой диаграммы и приобретает специальный вид в зависимости от характера изменения x_k .

В задачу статьи входит выяснить геометрическое место токов асинхронной машины с закрытыми пазами ротора без вытеснения тока.

Опыт показывает, что насыщение стали зависит главным образом от потоков рассеяния и лишь в относительно слабой степени определяется основным потоком. Поэтому с увеличением токов I_1 и I_2 сопротивление x_k уменьшается по мере уменьшения проводимости на путях потоков рассеяния. В одной из статей¹ нами было показано, что кривые $x_k = f(I_k)$, полученные из опыта короткого замыкания, имеют характер гиперболы вида $x_k = a + \frac{b}{I_k}$ в пределах изменения тока короткого замыкания I_k от $I_k = 0,5 I_{ном}$ до $I_k = I_{кн}$

Исследуется геометрическое место токов асинхронных машин с закрытыми пазами ротора, в которых индуктивное сопротивление короткого замыкания изменяется по закону, близкому к закону гиперболы. Геометрическое место токов рассматриваемых асинхронных машин, как доказывается в статье, представляет собой внутреннюю петлю улитки Паскаля, что является существенно новым в теории круговых диаграмм асинхронных машин.

при номинальном напряжении на зажимах машины. Дополнительные испытания во всех без исключения случаях подтвердили справедливость таких предположений и позволили

считать их типичным для указанной выше категории машин. В связи с этим имеется возможность дать способ построения геометрического места токов асинхронной машины, имеющей такого рода параметр. В упомянутой выше статье автора такой способ был предложен только для асинхронной машины, работающей в режиме двигателя, но он оказался недостаточным для работы машины в генераторном и тормозном режимах. Ниже дается обобщенный способ построения геометрического места токов асинхронной машины с гиперболической зависимостью $x_k = f(I_k)$.

При анализе будем исходить из схемы замещения с вынесенным на внешние зажимы намагничивающим контуром и обычным образом скорректированными параметрами (рис. 1). Согласно нашему основному положению, индуктивное сопротивление рабочего контура $x_k' = x'_1 + x''_2$ может быть выражено в виде суммы постоянной составляющей x_c и переменной составляющей $x_v = \frac{U_v}{I''_2}$, где U_v — постоянная, имеющая размерность напряжения. Таким образом, написать

$$x''_k = x_c + x_v = x_c + \frac{U_v}{I''_2} \quad (1)$$

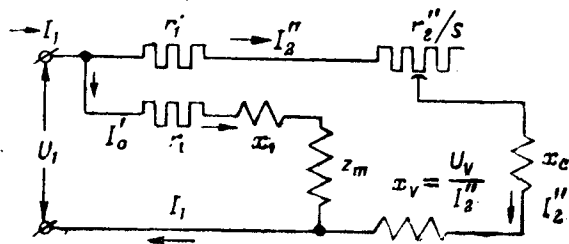


Рис. 1. Схема замещения асинхронной машины с переменным насыщением статора.

¹ Л. М. Пиотровский. Электричество, № 14, 1937.

Тогда уравнение э. д. с. рабочего контура можно

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}''_2 \left(r_1 + \frac{r''_2}{s} \right) + j \dot{I}''_2 \left(x_c + \frac{U_v}{I''_2} \right) = \\ &= \dot{I}''_2 \left(r_1 + \frac{r''_2}{s} \right) + j \dot{I}''_2 x_c + j \dot{U}_v. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь напряжение U_v представляет собой уже не скаляр, а вектор, имеющий постоянную величину и направление вектора тока I''_2 .

Решая уравнение (2) относительно тока I''_2 , получаем

$$\frac{\dot{U}_1}{\left(r_1 + \frac{r''_2}{s} \right) + j x_c} = \dot{I}''_2 + j \frac{\dot{U}_v}{\left(r_1 + \frac{r''_2}{s} \right) + j x_c} \quad (3)$$

или

$$\dot{I}_{2c} = \dot{I}''_2 + j \dot{I}_2, \quad (3a)$$

где

$$\dot{I}_{2c} = \frac{\dot{U}_1}{\left(r_1 + \frac{r''_2}{s} \right) + j x_c} \quad \text{и} \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_v}{\left(r_1 + \frac{r''_2}{s} \right) + j x_c}.$$

Ток I_{2c} имел бы место, если индуктивное сопротивление машины ограничивалось бы только его постоянной составляющей x_c . Его геометрическое место представляет собой круг, диаметр которого $D_c = HT = \frac{U_1}{x_c}$ и при скорректированных параметрах машины повернут относительно прямой, проведенной из конца вектора тока холостого хода $I_0 = OH$ перпендикулярно вектору напряжения U_1 на угол $\alpha \approx \arctg \frac{2I_0 r_1}{U_1}$ по направлению вращения векторов (рис. 2). Этот круг мы будем называть основным кругом диаграммы.

В правой части равенства мы имеем сумму двух токов I''_2 и I_{2v} . Геометрическое место тока I''_2 следует найти; геометрическое же место тока I_{2v} представляет собой круг с диаметром $D_v = FG = \frac{U_v}{x_c}$, показанный на рис. 2 пунктирной линией. Этот круг условимся называть добавочным кругом диаграммы. Так как напряжение U_v совпадает по направлению с током I''_2 , то диаметр D_v в отличие от диаметра D_c изменяет свое положение по диаграмме соответственно вектору тока I''_2 , отставая от него всегда на 90° . Следовательно, ток $+jI_{2v}$ изображается вектором, равным по величине диаметру D_v и совпадающим по направлению с вектором тока I''_2 . На рис. 2 ток $I''_2 = HA$, а вектор тока $jI_{2v} = AB$ составляет его продолжение; тогда $I_{2c} = HB = HA + AB$ или, что одно и то же, $I''_2 = I_{2c} - I_{2v} = HB - BA$.

Так как геометрическое место токов I_{2c} , т. е. точек B , есть круг, а ток $I_{2v} = D_v = \text{const}$, то геометрическое место точек A и, следовательно, тока I''_2 представляет собой внутреннюю петлю улитки Паскаля (рис. 3).

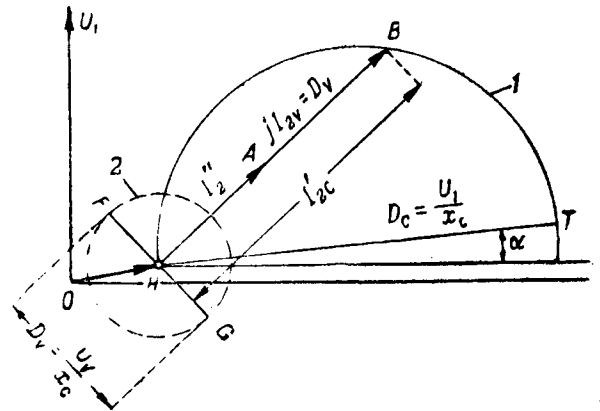


Рис. 2. Диаграмма токов. 1 — основной круг; 2 — добавочный круг.

Из сказанного следует, что для построения искомого геометрического места токов необходимо: а) снять опытным путем или рассчитать кривую $x_k = f(I_k)$; б) перестроить эту кривую в кривую $x''_k = f(I''_2)$, пользуясь данными холостого хода и короткого замыкания; в) получить уравнение кривой $x''_k = f(I''_2)$ в виде $x''_k = x_c + \frac{U_v}{I''_2}$; г) построить основной круг по диаметру $D_c = \frac{U_1}{x_c}$ и углу α ; д) определить диаметр добавочного круга $D_v = \frac{U_v}{x_c}$; е) провести ряд векторов тока I_{2c} (HB_1, HB_2, \dots и т. д.) и уменьшить каждый из них на величину диаметра D_v ; ж) построить улитку Паскаля по точкам A_1, A_2, A_3 .

Для экспериментального подтверждения сделанного вывода были исследованы: 1) короткозамкнутый двигатель завода „Ревтруд“ типа ТАГ 21-4 мощностью в 1 kW (220/380 V, 3,85/2,22 A), 1500 об/мин и 2) короткозамкну-

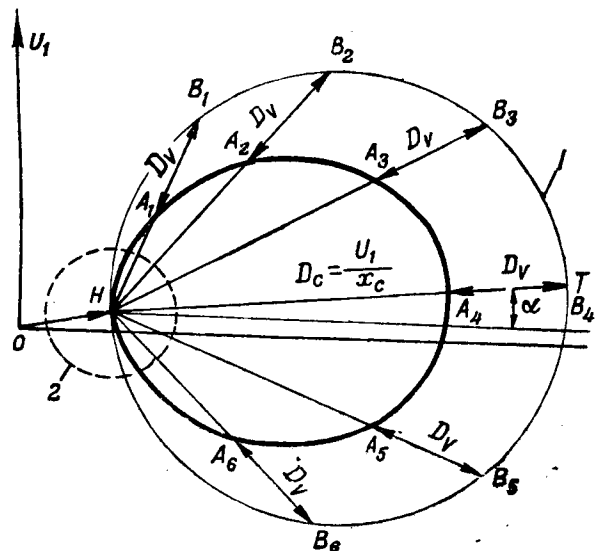


Рис. 3. Геометрическое место токов асинхронной машины с переменными параметрами.

1 — основной круг; 2 — добавочный круг с диаметром $D_v = \frac{U_v}{x_c}$.

Таблица 1

Данные х. х. и к. з. и параметры к. з.

	U_1 , V	I , A	P_0 , W	I_k , A	P_k , W	$\cos \gamma_k$	r_{10} , Ω	$\text{tg } \alpha$	I''_2 , A	P''_2 , W	z''_k	r''_k	x''_k
ТАГ 21-4	60	0,250	28	2,7	210	0,432	—	—	2,45	180	24,50	10,00	22,4
	100	0,440	40	5,5	960	0,581	—	0,0370	5,15	885	19,40	11,10	15,9
	140	0,635	52	8,4	2 140	0,606	—	—	7,85	2 000	17,85	10,80	14,2
	180	0,855	68	11,2	3 950	0,651	4,25	—	10,55	3 730	17,05	11,15	12,9
	220	1,120	95	14,1	6 100	0,655	—	0,0432	13,20	5 750	16,70	11,00	12,5
И-2-20/6	28,8	0,45	9,5	2,08	70,5	0,392	3,02	0,094	1,65	54	17,50	6,62	16,20
	40,4	0,60	13,6	3,38	195,0	0,477	3,02	0,090	2,85	155	14,15	6,35	12,60
	57,7	0,90	20,8	5,36	540,0	0,581	3,02	0,094	4,55	440	12,70	7,08	10,55
	86,6	1,35	42,0	8,90	1 485,0	0,641	3,60	0,112	7,85	1 265	11,00	6,86	8,60
	127,0	2,40	107,0	13,93	3 600,0	0,675	3,86	0,146	12,20	3 000	10,35	6,66	7,91

тый двигатель завода „Электросила“ типа И-2—20/6 мощностью в 0,8 kW (127/220 V, 6,4/3,7A) 1 000 об/мин².

При исследовании снимались:

а) Характеристики холостого хода (х.х.);
 б) характеристики короткого замыкания (к.з.);
 в) рабочие характеристики машин в двигательном и генераторном режимах; г) измерялись постоянным током сопротивления обмоток статоров r_{10} . Все испытания первой машины были произведены при соединении обмоток статора треугольником, второй — при соединении их звездой. Полученные из опытов х.х. и к.з. значения фазных напряжений U_1 фазных токов I_0 и I_k и мощностей P_0 и P_k обеих машин приводятся в табл. 1. По этим данным на рис. 4 построены векторы фазных токов I_0 и I_k и определены фазный ток I''_2 и мощность P''_2 рабочего контура по схеме на рис. 1. Так как линия центра диаграммы на рис. 4 повернута на угол $\alpha = \text{arctg} \frac{2I_0 r_1}{U_1}$, то

$$P'' = 3 U_1 I''_2 \cos(\varphi_2 + \alpha) = 3 U_1 K L. \quad (4)$$

Тогда

$$Z''_k = \frac{U_1}{I''_2}; \quad r''_k = \frac{P''_k}{3I''_2^2} \quad \text{и} \quad x''_k = \sqrt{Z''_k^2 - r''_k^2}.$$

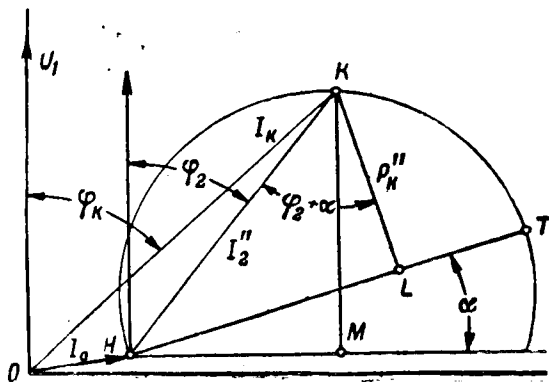


Рис. 4. Определение тока I''_2 и мощности P''_k .

Вычисленные по этим формулам значения r''_k и x''_k построены на рис. 5 в зависимости от тока I''_2 . Легко показать, что кривые $x''_k = f(I''_2)$ практически представляют собой гиперболы, каждая из которых может быть выражена одним уравнением в пределах всей кривой. Однако обработка экспериментальных данных показала, что при этом сходимость результатов, полученных из опыта и путем построения согласно предлагаемому способу, различна в зависимости от насыщения стали машины основным потоком. При пониженных значениях U_1 , когда насыщение стали основным потоком еще не сказывается, она вполне достаточна, но чем больше U_1 , тем она становится меньше. При этом значения токов, получаемых из опыта, меньше получаемых путем построения, т. е. все происходит так, как если бы насыщение стали основным потоком приводило к увеличению сопротивления x''_k . На самом же деле, как известно, с увеличением насыщения стали ее проводимость и соответственно зависящие от последней индуктивные сопротивления уменьша-

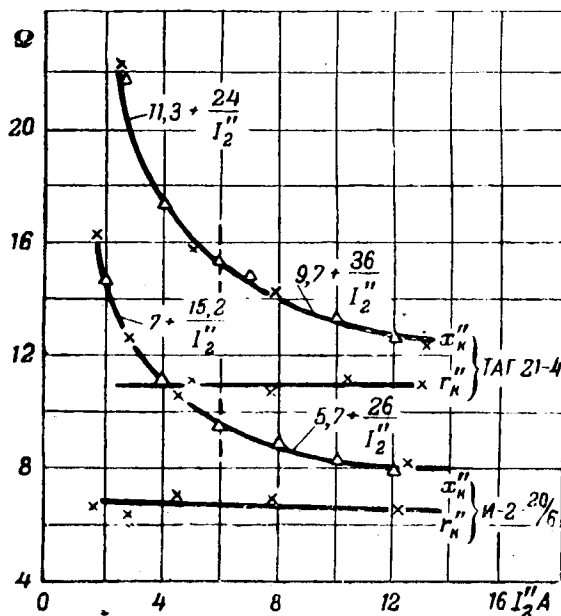


Рис. 5. Кривые $r''_k = f(I''_2)$ и $x''_k = f(I''_2)$ по данным опытов к. з. двигателей ТАГ 21—4 и И-2-20/6.
 × × × — данные опыта; Δ Δ Δ — данные расчета.

² Исследования производились в электромашинной лаборатории ЛПИ инж. К. К. Спивачевским.

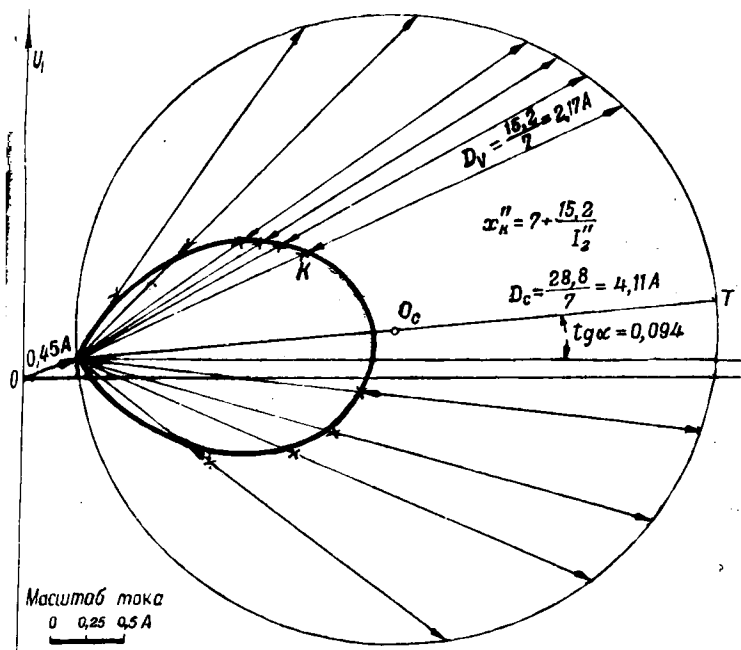


Рис. 6. Геометрическое место токов (улитка Паскаля) двигателя И-2 — 20/6 при $U_1 = 28,8$ V.

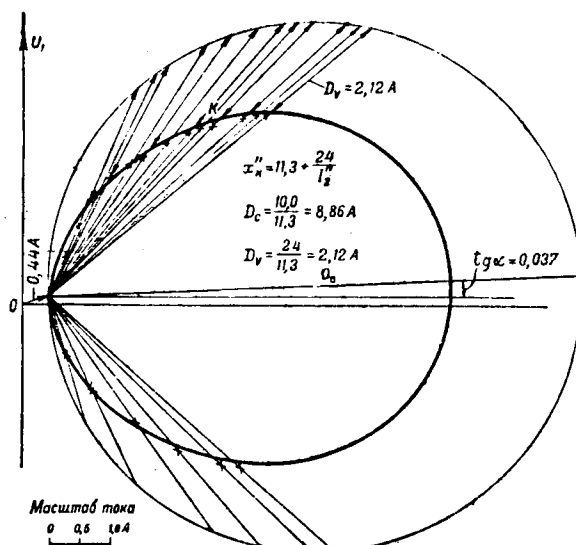


Рис. 7. Геометрическое место токов (улитка Паскаля) двигателя ТАГ 21 — 4 при $U_1 = 100$ V.

ются. Однако следует иметь в виду, что при увеличении напряжения U_1 и, следовательно, основного потока кривая распределения магнитной индукции в зазоре упрощается, соответственно чему увеличивается влияние возникающих при этом внешних гармонических поля, эквивалентных по своему действию некоторому добавочному индуктивному сопротивлению. Это и приводит к указанному выше увеличению сопротивления $x''_к$, тем более заметному, чем выше U_1 .

Чтобы уточнить построение геометрического места токов, целесообразно разделить каждую из кривых $x''_к = f(I''_2)$ (на рис. 5) на две приблизительно равные части, соответствующих „ненасыщенному“ и „насыщенному“ состояниям стали при относительно малых значениях тока I''_2 ($I_1 \leq 1,5 I_{ном}$) и больших значений его ($I_1 > 1,5 I_{ном}$). Таким образом для двигателя ТАГ 21-4 были получены уравнения:

$$x''_к = 11,3 + \frac{24}{I''_2} \text{ для } I''_2 = 2,5 \div 6 \text{ A}$$

и

$$x''_к = 9,7 + \frac{36}{I''_2} \text{ для } I''_2 = 6 \div 13, 2 \text{ A.}$$

Соответственно для двигателя И-2 — 20/6

$$x''_к = 7 + \frac{15,2}{I''_2} \text{ для } I''_2 = 1,65 \div 6 \text{ A}$$

и

$$x''_к = 5,7 + \frac{26}{I''_2} \text{ для } I''_2 = 6 \div 12,2 \text{ A.}$$

Так как двигатель И-2-20/6 оказался более насыщенным, чем двигатель ТАГ 21-4, то его характеристики были сняты при четырех различных напряжениях — 127 V, 86,6 V, 57,7 V

и 28,8 V; рабочие же характеристики двигателя ТАГ 21 — 4 были сняты при напряжениях — 220 V и 100 V. Построение улитки Паскаля для напряжения двигателя И-2-20/6 — $U_1 = 28,8$ V и напряжения двигателя ТАГ — 21-4 — $U_1 = 100$ V приводится на рис. 6 и 7. Из построений следует, что: а) во всех случаях геометрические места токов машин, исследованных в режимах работы двигателем, генератором и частично тормозом, представляют собой правильные улитки Паскаля и б) совпадение улиток Паскаля, полученных из опытов (соответствующие точки на всех рисунках отмечены крестами) и путем построения по способу, изложенному в настоящей статье, является почти полным. На рисунках показаны уравнения для $x''_к$, по которым производилось построение, диаметр основного круга $D_c = \frac{U_1}{x_c}$

и диаметр добавочного круга $D_v = \frac{U_v}{x_c}$. При построении улитки Паскаля для двигателя И-2-20/6 при $U_1 = 28,8$ V: $x''_к = 7 + \frac{15,2}{I''_2}$, $D_c = \frac{U_1}{x_c} = \frac{28,8}{7} = 4,11$ A и $D_v = \frac{U_v}{x_c} = \frac{15,2}{7} = 2,17$ A.

Существенное влияние на результаты построения оказывает правильное проведение линии центров, т. е. правильное определение величины $\text{tg } \alpha = \frac{2I''_1}{U_1}$. Так, например, на рис. 6 угол α несколько велик; уменьшив его, мы получили бы лучшее совпадение экспериментальной и построенной улиток Паскаля как в двигательном, так и в генераторном режимах.



О коммутации тяговых двигателей при неустановившихся режимах

Кандидат техн. наук А. Б. ИОФФЕ

Московский энергетический институт им. Молотова

Для тяговых двигателей вопрос о коммутации при всякого рода неустановившихся режимах, вызванных электромагнитными и механическими причинами, имеет весьма существенное значение.

При работе на линии двигатель, как правило, подвержен толчкам напряжения всякого рода (отскакивание и последующее касание провода токоприемником, толчки напряжения в сети и т. п.). Всякий такой толчок напряжения вызывает толчок тока в двигателе, подобно тому как это показано на рис. 1. Метод подсчета кривых тока и потока при таком процессе изложен в нашей статье [Л. 1]. Поток добавочного полюса меняется, как это мы увидим ниже, приблизительно подобно главному потоку Φ , вследствие чего при таком режиме всегда будет иметь место недокомпенсация реактивной э. д. с., коммутирующей э. д. с., как это указано на рис. 1. Эта недокомпенсация вызовет, очевидно, искрение под щеткой или даже вспышку, которая при известных условиях может перейти в круговой огонь. Количественный подсчет недокомпенсации реактивной э. д. с. может быть выполнен следующим образом.

Поскольку вычислено протекание кривой $I=f(t)$, то тем самым определяется для каждого момента времени реактивная э. д. с.

$$e_r \equiv I, \quad (1)$$

число оборотов n во время переходного процесса

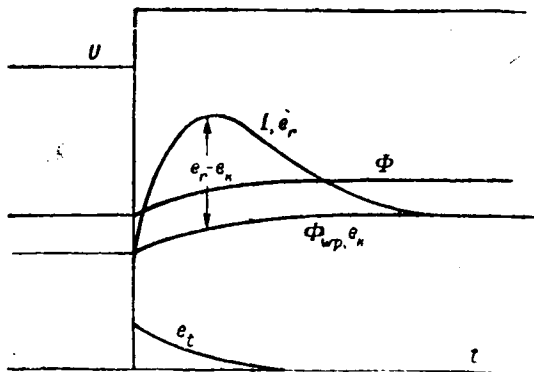


Рис. 1. Кривые тока и потока при толчке напряжения.

Рассматриваются вопросы коммутации машин постоянного тока при переходных режимах; дается метод вычисления некомпенсированной э. д. с. и приводится анализ некоторых способов улучшения коммутации при этих режимах.

может быть принято постоянным.

Изменение потока добавочного полюса вычисляется согласно метода, излага-

емому ниже, и таким образом определяется величина коммутирующей э. д. с.

$$e_k \equiv \Phi \cdot n. \quad (2)$$

Кроме того следует учесть появление в к. з. секции трансформаторной э. д. с. от главного потока:

$$e_t = \frac{d\Phi}{dt} W \cdot 10^{-8}, \quad (3)$$

где W — число витков в секции. Эта э. д. с. при двигательном режиме и нарастании потока направлена совместно с коммутирующей э. д. с., но относительно невелика и быстро падает по величине. При генераторном режиме и нарастании потока она находится в фазе с реактивной э. д. с.

Результирующая э. д. с. в секции:

$$\Delta e_r = e_r + e_k + e_t. \quad (4)$$

Для того чтобы оценить степень реакции данного двигателя к толчкам напряжения, производится опыт ударного включения, причем определяется так называемое «напряжение перекрытия». Способ расчета этого «напряжения» перекрытия дан в статье автора [Л. 2].

Изменение потока добавочного полюса при неустановившемся режиме. Прежде всего обратимся к величине токов Фуко в магнитопроводе потока Φ_{wp} при его изменении. Применим для магнитной цепи добавочного полюса тот же метод, который был изложен в упомянутой статье [Л. 1] применительно к цепи главных полюсов. Для цепи добавочных полюсов формула токов Фуко примет вид:

$$i_{\Phi} = -\Phi_{wp} \frac{d\Phi_{wp}}{dt} \psi \sum \frac{l}{p^3} \cdot 10^{-8}, \quad (5)$$

где коэффициент

$$\psi = \frac{\sigma^2 \omega p}{\rho B_s}. \quad (6)$$

Напомним, что величина B_s есть индукция во внешних частях магнитопровода при изменении потока, а ρ — удельное сопротивление материала магнитопровода. Так как под Φ_{wp} мы разумеем полезный по-

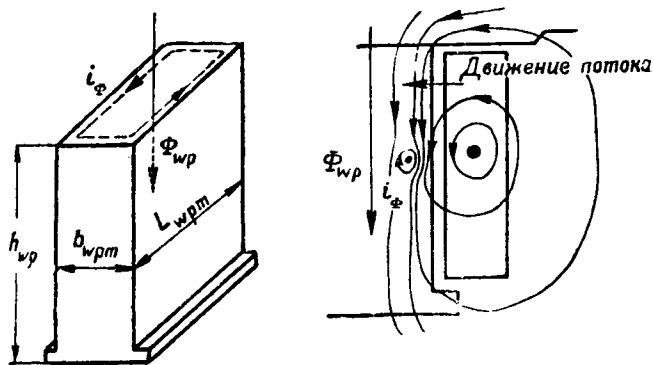


Рис. 2. Токи Фуко в добавочном полюсе.

ток добавочного полюса, значительно отличающийся от полного потока в сердечнике и остова, в формулу для ψ введен коэффициент рассеяния σ_{wp} . Выражение для ψ необходимо несколько преобразовать для того, чтобы вывести из него коэффициент рассеяния, который имеет для сердечника полюса и остова в данном случае столь различную величину, что этой разницей уже нельзя пренебрегать. Таким образом перепишем (5) в виде:

$$i_{\phi} = -\Phi_{wp} \frac{d\Phi_{wp}}{dt} \varphi \sum \frac{l}{\rho^2} \sigma_{wp}^2 \cdot 10^{-8} \quad (7)$$

где $\varphi = \frac{1}{\rho B_s} \quad (8)$

Указанный коэффициент рассеяния может быть определен формулой:

$$\sigma_{wp} = 1 + \frac{AW_{wp}}{k_1 B_{wp}} \cdot \frac{h}{s \cdot b_{wp}} \quad (9)$$

где AW_{wp} — ампервитки добавочного полюса; B_{wp} — индукция в зазоре под полюсом; k_1 — коэффициент Картера; b_{wp} — ширина наконечника полюса в см; s — зазор между наконечниками главных и добавочных полюсов в см; h — расчетная высота (для добавочного полюса она принимается равной $0,5 h_{wp}$, для остова — h_{wp} , где h_{wp} — высота добавочного полюса в см).

Сумма $\sum \frac{l}{\rho^2} \sigma_{wp}^2$ определяется как:

$$\sum \frac{l}{\rho^2} \sigma_{wp}^2 = k' \frac{\sigma_{wpm}^2 h_{wp}}{(2b_{wpm} + 2L_{wpm})^2} + \frac{\sigma_{wpj}^2 l_j}{[L_a + 0,5\tau + 4h_j]^2} \quad (10)$$

Здесь σ_{wpm} — коэффициент рассеяния для полюса; σ_{wpj} — коэффициент рассеяния для остова; b_{wpm} , L_{wpm} — см. рис. 2 (размеры в см); L_a — длина железа якоря в см; τ — полюсное деление в см; h_j — толщина остова в см; l_j — длина пути потока по остову (на один полюс) в см; k' — коэффициент расчленения (для сплошного сердечника $k'=1$, для шихтованного $k'=0,2$).

Теперь перейдем к нахождению зависимости $\Phi_{wp} = f(t)$ при неустановившемся режиме. Для выяснения этого поступим следующим образом: полезный поток добавочного полюса Φ_{wp} может быть выражен

в любой момент времени неустановившегося режима так:

$$\Phi_{wp} = 0,4\pi \frac{AW_{wp} - AW_{\mu} - AW_{p,y} + AW_{\phi}}{R_m} \quad (11)$$

где AW_{wp} — число ампервитков катушки добавочного полюса; AW_{μ} — расход ампервитков на железо; $AW_{p,y}$ — число ампервитков реакции якоря; R_m — магнитное сопротивление:

$$R_m = \frac{\delta}{L_a \cdot b_{wp}} + \frac{\delta_j}{L_{wpm} \cdot b_{wpm}} \sigma_{wpj} \quad (12)$$

Здесь δ — зазор под полюсом в см; δ_j — второй зазор у остова в см.

Число витков тока Фуко i_{ϕ} равно, очевидно, единице и потому численно $AW_{\phi} = i_{\phi}$.

Преобразуя (11), найдем:

$$\Phi_{wp} = 0,4\pi \frac{AW_{wp} - AW_{\mu} - AW_{p,y}}{R_m} + 0,4\pi \frac{i_{\phi}}{R_m}$$

или

$$\Phi_{wp} = \Phi_{y,m} + 0,4\pi \frac{i_{\phi}}{R_m} \quad (13)$$

где $\Phi_{y,m}$ — установившееся значение потока, соответствующее текущему значению AW_{wp} . Обозначим:

$$\beta = \varphi \cdot \sum \frac{l}{\rho^2} \sigma_{wp}^2 \cdot 10^{-8} \quad (14)$$

тогда:

$$i_{\phi} = -\beta \Phi_{wp} \frac{d\Phi_{wp}}{dt} \quad (15)$$

Подставим это значение в (13)

$$\Phi_{wp} = \Phi_{y,cm} - 0,4\pi\beta \Phi_{wp} \cdot \frac{d\Phi_{wp}}{R_m dt}$$

Интегрируя, найдем:

$$t = 0,4\pi \frac{\beta}{R_m} \left(\Phi_{y,cm} \ln \frac{\Phi_{y,cm}}{\Phi_{y,cm} - \Phi_{wp}} - \Phi_{wp} \right) \quad (16)$$

Значения $\Phi_{y,cm}$ для каждого момента времени находятся по кривой намагничивания добавочного полюса, поскольку предполагается, что кривая изменения тока двигателя известна.

Поскольку кривая $\Phi_{wp} = f(t)$ может быть с большей или меньшей степенью точности вычислена, не представляет труда найти остаточную реактивную э. д. с. в к. з. секции при неустановившемся режиме и оценить тем самым коммутацию двигателя при этом.

Анализ методов, применяемых для улучшения коммутации при неустановившемся режиме. Как известно, в современных тяговых двигателях весьма часто применяется второй зазор в цепи добавочных полюсов, исполняемый в виде немагнитной прокладки между остовом и добавочным полюсом. Такой же метод улучшения ударной коммутации широко применяется вообще в машинах постоянного тока, работающих с прерывистой нагрузкой.

Здесь мы попытаемся дать количественный математический анализ эффекта второго зазора, базируясь на методе, разобранном нами выше.

Наличие второго зазора сказывается в увеличении величины R_m [см. формулу (16)], т. е. в умень-

шении t для данного значения Φ_{wp} . Следовательно, кривая $\Phi_{wp}=f(t)$ пойдет выше, величина недокомпенсации Δe_r будет меньше и интенсивность вспышки под щеткой также уменьшится.

Для количественного обследования эффекта второго зазора ниже проделан подсчет кривой потока Φ_{wp} для двигателя 170 kW, 750 V при восстановлении напряжения (опыт ударного включения).

Для этого двигателя в случае одного зазора имеем:

$$\sum \frac{l}{p^2} \sigma_{wp}^2 = 1 \frac{2,45^2 \cdot 9,5}{(2,3 + 2,33)^2} + \frac{3,9^2 \cdot 28,5}{[4(33 + 0,5 \cdot 34) + 4 \cdot 4]^2} = 0,0110 + 0,0093 = 0,0203. \quad (17)$$

Магнитное сопротивление для двигателя без второго зазора:

$$R_m = \frac{0,5}{33 \cdot 4,1} = 0,0037. \quad (18)$$

Подсчитанная кривая $\Phi_{wp}=f(t)$ нанесена на рис. 3. Этот же двигатель был выполнен со вторым зазором $\delta_j=2$ мм. В этом случае:

$$R_m = \frac{0,5}{33 \cdot 4,1} + \frac{0,2}{33 \cdot 3} \cdot 3,9 = 0,0037 + 0,0079 = 0,0116, \quad (19)$$

т. е. эффективный зазор возрос более чем в три раза. На рис. 3 нанесена также полученная в данном случае кривая. Из этого рисунка ясно видно влияние второго зазора на уменьшение величины $e_r - e_k$, т. е. на увеличение напряжения перекрытия. Действительно, если двигатель с одним зазором имел это напряжение 750 V, то в случае второго зазора 2 мм оно поднялось до 825 V. На рис. 3 построена также кривая $\Phi_{wp}=f(t)$ для случая второго зазора $\delta_j=6$ мм, еще более улучшающая положение.

Подсчитаем теперь значения остаточной э. д. с. Δe_r . Для этого на рис. 3 построена кривая изменения главного потока $\Phi=f(t)$ и по ней подсчитана величина трансформаторной э. д. с. e_t . Масштабы на рис. 3 подобраны так, что кривая $I=f(t)$ и $e_r=f(t)$ совпадают; также совпадают и кривые $\Phi_{wp}=f(t)$ и $e_k=f(t)$. В таблице подсчитана величина Δe_r при пике тока, т. е. для времени 0,02 сек., так как в этот момент она достигает максимума.

Зазор		R_m зазора	$\sum R_m$	$\frac{\sum R_m}{R_m \text{ зазора } \delta}$	e_r , V	e_k , V	e_t , V	Δe_r , V
δ_1 , мм	δ_2 , мм							
5	—	0,0037	0,0037	1,0	3,9	0,8	0,7	2,4
5	2	0,0037	0,0116	3,1	3,9	1,2	0,7	2,0
5	6	0,0037	0,0275	7,5	3,9	1,7	0,7	1,5

Таким образом становится ясно, как количественно увеличение зазора в цепи добавочных полюсов улучшает условия нестационарной коммутации.

Перейдем к вопросу об эффекте расслоения железа добавочных полюсов. Влияние шихтовки добавочных полюсов сказывается в увеличении сопротивления токама Фуко в сердечнике полюса. Разумеется, наиболее целесообразно шихтовать полюс в направлении оси. В этом случае, как показали наши опыты, сопротивление вдоль полюса значительно возрастает. Величина этого возрастания, однако, весьма не постоянна, поскольку она зависит от силы спрессовки полюса, состояния коррозии отдельных листов и т. д. В некоторых

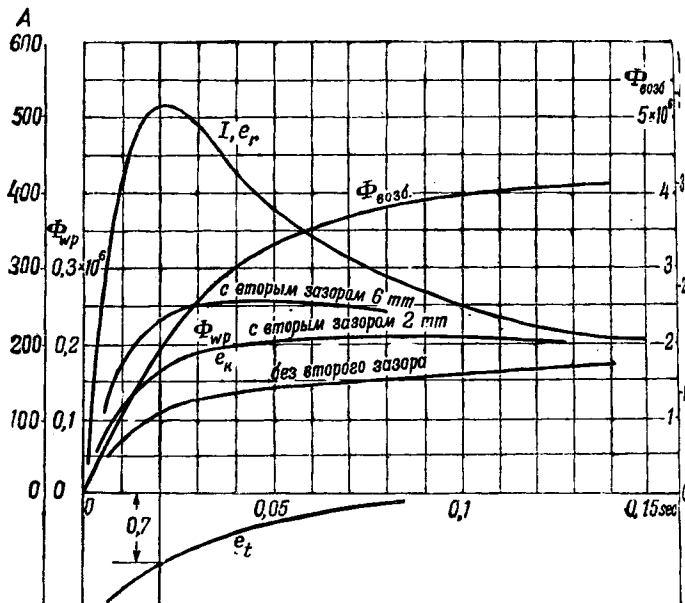


Рис. 3. Ударное включение двигателя (170 kW; 750 V; $U=630$ V; $I_{yсм}=200$ A; $n=1160$ об/мин; $\Phi_{возд. \text{ усн}}=4,2 \cdot 10^6$).

случаях сопротивление возросло в 10 раз (против сплошного полюса). В качестве некоторой средней цифры можно принять увеличение сопротивления в пять раз против сплошного сердечника, т. е. значение $k'=0,2$, указанное выше в формуле (10).

Чтобы оценить эффект шихтовки, обратимся к примеру, разобранным выше. В формуле для $\sum \frac{l}{p^2} \sigma_{wp}^2$ первый член обратится в 0,0022 и вся сумма будет: $\sum \frac{l}{p^2} \sigma_{wp}^2 = 0,0115. \quad (20)$

Нетрудно убедиться, что эффект от шихтовки будет значительно меньше, чем от второго зазора. Действительно, если член перед скобкой в формуле (16) в случае одного зазора равен 1,03, при втором зазоре 2 мм — 0,33, то в данном случае он будет 0,59. Таким образом хотя улучшение ударной коммутации и будет иметь место, но в значительно меньшей степени, чем при введении относительно небольшого второго зазора.

Произведенный опыт ударного включения этого двигателя с шихтованными полюсами дал цифру напряжения перекрытия 765 V (против 750 V у нормального двигателя), т. е. улучшение всего на 2%. Следовательно, особой целесообразности применять шихтованные добавочные полюса в четырехполюсных тяговых двигателях со сравнительно длинным путем по остову нет (шихтовать же остов весьма затруднительно). Для машин же многополюсных шихтованные добавочные полюса весьма целесообразны ввиду небольшого значения l_j .

Литература

1. А. Б. Иоффе. О неустановившихся режимах тяговых электродвигателей. Вестник электропромышленности, № 9, 1943.
2. А. Б. Иоффе. Расчет устойчивости тяговых двигателей к нестационарным режимам. Электричество, № 9, 1939.
3. О. Н. Шапиро. К расчету переходных процессов в машинах постоянного тока. Вестник электропромышленности, № 10, 1944.



Новая изоляция электрических машин

Доктор техн. наук, проф. К. А. АНДРИАНОВ, инж. Э. И. ПОЮРОВСКАЯ,
инж. С. В. ШИШКИН

Всесоюзный электротехнический институт

Для изоляции обмотки электрической машины от корпуса в качестве пазовой изоляции, как известно, обычно применяются два слоя прессшпана и между ними слой

лакоткани или лакошелка. При такой конструкции изоляции паза основным электроизоляционным материалом является лакоткань или лакошелк. Лист прессшпана, прилегающий к железу якоря, служит главным образом для механической защиты изоляции от проколов и повреждений, могущих произойти из-за наличия заусенцев и неровностей в пазу якоря или статора. Лист прессшпана, прилегающий к обмотке, имеет основное назначение облегчить укладку обмотки в паз. Такая изоляция паза исключительно из целлюлозных материалов отличается большой гигроскопичностью даже после пропитки асфальто-масляными изоляционными лаками.

Для повышения влагостойкости электрических машин в ряде случаев применяется многократная пропитка изоляционными лаками или компаундирование. Кроме того в машинах влагостойкого исполнения лакоткань и лакошелк заменяются гибким миканитом.

Целлюлозные волокнистые материалы, входящие в состав пазовой изоляции и изоляции обмотки, имеют макроскопические каналы между волокнами и субмикроскопические поры между мицеллами. Для предотвращения всасывания материала за счет сил капиллярности через микроскопические каналы, производится пропитка электроизоляционными пропиточными лаками. Входящие в состав лаков пленкообразующие материалы заполняют макроскопические капилляры, однако субмикроскопические межмицеллярные поры они заполнить не могут благодаря большой величине и сложности молекул пленкообразующих материалов. Кроме того в процессе сушки лаковых пленок, при испарении растворителей в пленке образуются поры, через которые могут проникать пары воды. Многократная пропитка, в результате которой получается несколько слоев лаковой пленки, приводит к перекрытию пор и к значительному замедлению процесса влагопоглощения изоляцией машины, хотя и не делает эту изоляцию вполне герметичной.

Рассматривается вопрос о получении высоковолагодостойкой изоляции электрических машин путем применения пленочных материалов на основе эфиров целлюлозы. После обзора состояния вопроса излагаются результаты работ по получению ацетобутирата целлюлозных пленок, испытанию их образцов и пленочной пазовой изоляции статоров сельсинов.

Еще более, чем многократная пропитка повышает влагостойкость электрических машин компаундирование. Компаунды, представляющие обычно сплав битума с маслом,

не содержат летучих растворителей и дают монопольное покрытие, в котором, однако, все же имеются микropopы. Таким образом как многократная пропитка, так и компаундировка не устраняют полностью гигроскопичности изоляции. Поэтому для изоляции электрических машин, в особенности машин, работающих в условиях повышенной влажности, крайне желательно применение материалов, обладающих минимальной гигроскопичностью.

Применяемый для пазовой изоляции гибкий миканит обладает высокой влагостойкостью, благодаря тому, что пары воды перпендикулярно чешуйкам слюды проникать не могут, и поэтому путь этих паров сильно удлиняется. Более широкому применению гибкого миканита для пазовой изоляции кроме дефицитности слюды мешает еще то обстоятельство, что гибкий миканит выпускается обычно толщиной не менее 0,3 мм. Эта толщина в полтора раза превышает толщину лакоткани и в три и более раза толщину лакошелка.

Большой интерес представляет применение для пазовой изоляции электрических машин влагостойкого исполнения различных пленочных материалов на основе синтетических химических продуктов и в частности на основе эфиров целлюлозы.

За границей пленочные материалы из эфиров целлюлозы нашли промышленное применение. Например, английская фирма Метро-Виккерс уже в 1930 г. пыталась применять для целей электроизоляции ацетилцеллюлозную пленку (Л. 1). Пленки из триацетата целлюлозы широко применяются в Германии, а из ацетобутирата целлюлозы в США.

Ацетилцеллюлозная пленка, получаемая из вторичных ацетатов, отличается меньшей влагостойкостью по сравнению с пленкой из первичных ацетатов (триацетатной). Основными препятствиями для широкого применения триацетата целлюлозы всегда являлись низкая стабиль-

ность первичных ацетатов и крайняя ограниченность ассортимента растворителей для них. За последние годы проблема повышения стабильности первичных ацетатов успешно разрешена, что же касается растворителей, то их ассортимент сейчас расширен в результате появления на заграничном рынке растворителей класса нитропарафинов.

Другим способом повышения влагостойкости и эластичности пленок является частичная замена в ацетилирующей смеси уксусного ангидрида масляным ангидридом или масляной кислотой. Получаемый таким способом ацетобутират целлюлозы растворяется в тех же самых растворителях, что и ацетилцеллюлоза, но отличается от последней лучшей влагостойкостью и атмосферостойкостью и большей эластичностью. Свойства ацетобутирата могут варьироваться в довольно широких пределах в зависимости от соотношения между уксусной и масляной кислотой в реакционной смеси при получении эфира целлюлозы. Кроме того резкого повышения эластичности пленочных материалов можно достигнуть за счет применения различных пластификаторов.

Ниже приводятся некоторые физико-механические и электрические свойства пленочного материала на основе ацетобутирата, выпускаемого фирмой Eastman Kodak Company под маркой Kodapak II [Л. 2].

Удельный вес	1,20
Прочность на разрыв ленты шириной 15 мм и толщиной 0,04 мм	3,0—3,5 кг
Удлинение	не менее 40%

Влагопоглощаемость за сутки, отн. влажность в %	Привес в %
22	0,40
40	0,55
60	0,90
80	1,4
95	1,7

Электрическая прочность, при температуре	kV/mm
—46°	169
—18°	157
—21°	138
100°	118
132°	83

После суточного пребывания в воде электрическая прочность 130 kV/mm.

Кроме повышенной водостойкости и более высоких электроизолирующих свойств пленочные материалы на основе синтетических химических продуктов имеют то преимущество, что они могут быть получены любой желаемой толщины, не только в несколько раз тоньше лакоткани, но и тоньше самых тонких сортов лакошелка. Пленочные материалы к тому же обладают очень большой однородностью как по толщине, так и по электрическим и механическим свойствам. Следует также учесть, что для производства лакошелка необходима ткань из весьма дефицитного натурального шелка, причем ткань должна удовлетворять весьма жестким специальным требованиям (обладать минимальной толщиной, не иметь узлов, просветов и т. д.).

Для пластификации эфиров целлюлозы с целью сообщения им необходимой эластичности обычно применяются высококипящие труднолетучие жидкости (или низкокипящие твердые вещества), такие как триацетин, диэтил- и дибутилфталаты, трифенил и трикрезилфосфаты и многие другие. Все эти пластификаторы имеют тот недостаток, что изготовленные с их применением эфироцеллюлозные пластики не отличаются достаточной стабильностью своих свойств. С течением времени, в особенности под действием повышенной температуры и влажности, пластификаторы постепенно улетучиваются, выщелачиваются парами воды и растворителей и т. д., вследствие чего пластики и пленочные материалы из эфиров целлюлозы приобретают хрупкость.

Учитывая важность применения пленочных материалов для изоляции электрических машин, в одном из научно-исследовательских институтов НКЭП авторы провели работу по созданию пленочной изоляции на основе эфиров целлюлозы. В этой работе пришлось отказаться от применения обычных пластификаторов. Для сообщения эластичности ацетобутирату целлюлозы, выбранному в качестве основного пленкообразующего материала, применялось высокомолекулярное соединение, так называемый полимер Б, который получается на основе производных метакриловой кислоты. Этот полимер отличается высокой пластичностью и гибкостью и совершенно нелетуч, так что пластифицированный им эфир целлюлозы не теряет своей эластичности в процессе длительного хранения.

Применявшийся ацетобутират целлюлозы (геркоза) имеет удельный вес 1,28, температуру плавления в капилляре 228° С, относительную вязкость по Оствальду 0,2% растворов в ацетоне при 20°—1,2, кислотное число 1,8 mg KOH, содержание связанных кислот (в пересчете на уксусную) 57,0%.

Полимер Б — гибкая, пластичная, бесцветная непрозрачная смола, которая начинает размягчаться и липнуть при температуре 90—100°.

Ацетобутират целлюлозы хорошо растворим в ацетоне, в смеси ацетона со спиртом, а также с этил-бутил- и амил-ацетатами. Полимер Б растворяется в ацетоне, амилацетате, бензоле, бензине, изоамиловом спирте. Общим растворителем для ацетобутирата целлюлозы и полимера Б являются ацетон и смесь его с ацетатами.

Для получения лаков применялась смесь растворителей из 70% ацетона и 30% амилацетата. Из ацетобутирата и полимера Б готовились по отдельности лаки одинаковой концентрации и затем эти лаки смешивались между собой в различных соотношениях. Из полученных композиционных лаков готовились пленки, которые сравнивались между собой по внешнему виду, степени однородности, по эластичности. Лучшая пленка получалась из композиций, содержавших 85% ацетобутирата целлюлозы и 15% полимера Б.

По этой рецептуре готовились пленки в количествах, необходимых для физико-механических и электрических испытаний. Ответственные

количества ацетобутирата и полимера заливались на холоду растворителем, и смесь оставлялась на ночь для полного растворения и совмещения компонентов, после чего лак фильтровался. Лак готовился концентрацией 7%, вязкость раствора по воронке НИЛКа (диаметр отверстия 7 мм) при 20° составляла 36 sec.

Пленки готовились путем окунания в лак медных пластин размером 150 на 180 мм. После извлечения из ванны пленка сушилась на воздухе в течение 1 h, затем медная пластина с пленкой переворачивалась на 180° и снова погружалась в лак. Количество покрытий зависит от заданной толщины. При концентрации 7% и при трехкратном покрытии получают пленки толщиной 0,06 мм с отклонениями $\pm 0,005$ мм; при четырехкратном покрытии толщина достигает 0,09 мм с теми же отклонениями. После последнего покрытия пленки оставлялись для подсушивания на ночь. Высохшие пленки легко снимались с подложки.

Изготовленные пленки подвергались механическим испытаниям: определялись разрывная прочность и удлинение на разрывной машине Шоппера и число двойных перегибов на эластометре Шоппера. Пленки испытывались в исходном состоянии, после термической обработки (прогрев в течение 4, 12, 20 и 24 h при температурах 105 и 150°) и после действия влаги (24, 48 и 72 h). Параллельно с пленками в тех же условиях производились испытания лакошелка той же толщины, что и испытываемая пленка.

Изменение прочности на разрыв пленки и лакошелка в зависимости от времени и температуры прогрева характеризуются кривыми, приведенными на рис. 1. Изменения удлинения в тех же условиях представлены на рис. 2. Влияние действия воды на механическую прочность и удлинение пленки и лакошелка иллюстрируется рис. 3.

Из рис. 1 видно, что разрывное усилие для пленки и лакошелка в исходном состоянии почти одинаково. Но пленка в процессе термической обработки повышает свою механическую прочность, тогда как прочность лакошелка снижается. Особенно резко это снижение наблюдается в процессе прогрева при температуре 150° С.

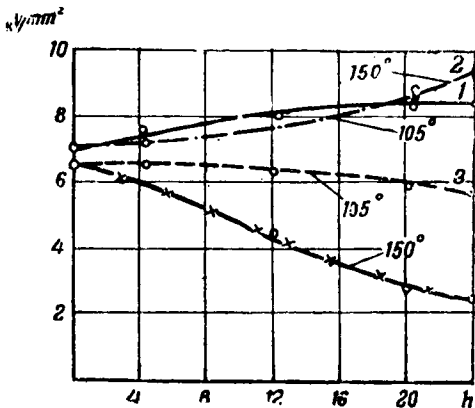


Рис. 1. Прочность пленки (1, 2) и лакошелка (3, 4) на разрыв в зависимости от времени прогрева и температуры.

Удлинение (рис. 2) лакошелка в исходном состоянии выше, чем пленки, однако в процессе прогрева оно у лакошелка снижается более резко. Относительно действия воды на разрывное усилие и удлинение (рис. 3) пленки и лакошелка следует отметить, что пребывание в воде резко влияет на эти характеристики не оказывает.

Результаты испытаний пленки и лакошелка на число двойных перегибов на эластометре Шоппера (нагрузка 500 g, угол перегиба 90°) после термической обработки характеризуется рис. 4.

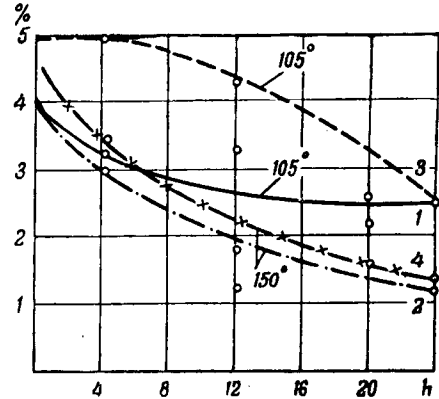


Рис. 2. Удлинение пленки (1, 2) и лакошелка (3, 4) в зависимости от времени прогрева и температуры.

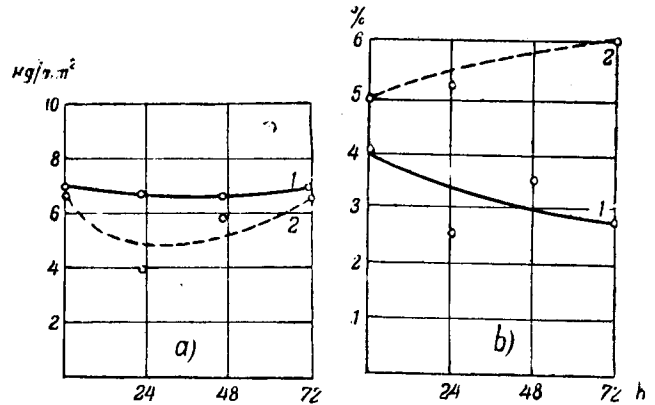


Рис. 3. Прочность на разрыв (а) и удлинение (б) пленки 1 и лакошелка 2 в зависимости от времени пребывания в воде.

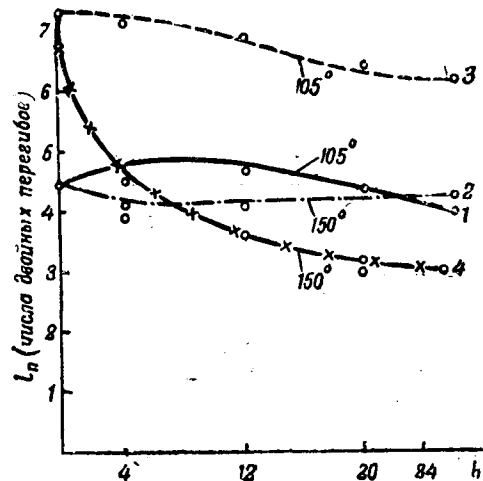


Рис. 4. Эластичность пленки (1, 2) и лакошелка (3, 4) в зависимости от времени прогрева и температуры.

Из приведенных кривых видно, что по числу двойных перегибов пленка, как и следовало ожидать, значительно уступает лакошелку. Однако проведенная термообработка очень мало снижает эластичность пленки, тогда как эластичность лакошелка в тех же условиях резко падает. Например, лакошелк, прогретый при 150°C 4 h, снижает число двойных перегибов в 28 раз, а прогретый при той же температуре 24 h в 73 раза.

Определение теплостойкости пленки и лакошелка по растрескиванию при изгибании вокруг стержня диаметром 3 мм показало, что при температуре 150°C теплостойкость пленки составила 110 h, а лакошелка — 55 h. Сравнительная водостойкость пленки и лакошелка определялась по изменению веса пленки после действия воды. После суточного пребывания в воде пленка потеряла в своем весе 1,6%, лакошелк в тех же условиях дал привес 4,8%. Далее были проведены испытания электроизолирующих свойств пленки параллельно с испытаниями лакошелка той же толщины.

У испытываемых материалов определялись электрическая прочность в исходном состоянии, после действия влаги, после прогрева, а также на складке и при температуре 90°C . Удельное объемное сопротивление определялось в исходном состоянии после действия влаги и при температуре 90°C . Результаты электрических испытаний сведены в табл. 1 и представлены на рис. 5.

Как видно из таблицы, удельное объемное сопротивление пленки в доставленном состоянии на один порядок ниже, чем лакошелка. Однако после суточного пребывания в воде лакошелк понизил свое сопротивление, у пленки сопротивление не изменилось. Средняя пробивная напряженность пленки в исходном состоянии более чем в полтора раза превышает пробивную напряженность лакошелка. Под действием воды и паров воды электрическая прочность пленки падает очень медленно, тогда как у лакошелка она уже после суточного пребывания в воде резко снижается.

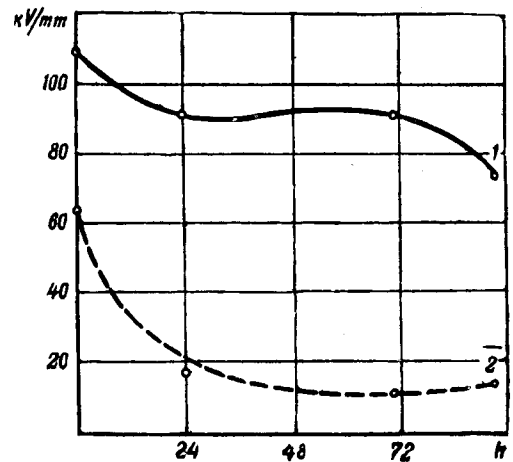


Рис. 5. Средняя пробивная напряженность пленки 1 и лакошелка 2 в зависимости от времени пребывания в воде.

После перегиба и прокатки грузом весом 2 кг пленка теряет свыше 35% своей электрической прочности и дает показатели, близкие к показателям лакошелка. После прогрева пленки в течение 18 h и последующего перегиба электрическая прочность пленки на перегибе далее не уменьшается, электрическая прочность лакошелка после прогрева в тех же условиях падает более, чем вдвое. При температуре 90° пленка показала электрическую прочность, в три раза более высокую по сравнению с лакошелком.

Исследовалось также влияние на электрическую прочность пленок и лакошелка лаков, растворителей и различных других химических реагентов. Материалы выдерживались в этих средах в течение суток и затем определялась пробивная напряженность. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что испытывавшиеся реагенты снижают электрическую прочность пленки в очень небольшой степени. Внешний вид пленок совершенно не изменялся. Только после действия лака № 447 пленка приобрела слегка зеленоватый оттенок.

Электрические свойства пленки и лакошелка

Таблица 1

	Условия испытаний	Пленка		Лакошелк	
		электрическая характеристика	толщина образцов, мм	электрическая характеристика	толщина образцов, мм
Удельное объемное сопротивление, $\Omega \cdot \text{см}$	В доставленном состоянии	$3,2 \cdot 10^{12}$	0,060	$1,3 \cdot 10^{13}$	0,065
	После пребывания в воде 24 h	$9,8 \cdot 10^{12}$	0,060	$6,5 \cdot 10^{13}$	0,060
	При температуре 90°C	$3,2 \cdot 10^{11}$	0,060	—	—
Средняя пробивная напряженность электрического поля, кВ	В доставленном состоянии	108,7	0,060	63,3	0,065
	После пребывания в воде 24 h	92,0	0,060	15,7	0,060
	После пребывания в воде 72 h	91,5	0,060	13,2	0,065
	После пребывания в воде 100 h	74,3	0,065	14,5	0,070
	После пребывания над водой 24 h	107,3	0,055	—	—
	После пребывания над водой 72 h	107,2	0,055	—	—
	После пребывания над водой 100 h	85,5	0,060	—	—
	В доставленном состоянии после перегиба	67,0	0,055	60,0	0,060
	После прогрева 18 h при 105° и перегибе	64,0	0,060	24,0	0,060
	При температуре 90°	52,0	0,060	30,0	0,060

Таблица 2
Влияние действия химических реагентов на электрическую прочность пленки и лакошелка

Среда	Средняя пробивная напряженность, кВ/мм	
	пленка	лакошелк
Доставленное состояние . . .	108,7	63,3
Бензин	91,5	61,0
Бензин-бензол (1:1)	113,3	63,0
Трансформаторное масло	95,0	75,0
Глифталевый лак № 1154	85,0	—
Лак № 447	105,3	7,6
5-процентный раствор соляной кислоты	81,5	52,3
Пары аммиака	94,4	11,0

Высокие электрические и механические свойства пленок дают возможность использовать их практически во всех случаях для изоляции электрических машин. Они могут применяться для изоляции секции электрических машин, катушек и т. д. вместо лакоткани и лакошелка. В машинах, где с целью повышения водостойкости применяется гибкий миканит, пленочная изоляция может использоваться для замены миканита.

Как на интересную область применения пленочной изоляции, следует указать на изготовление специальных изолирующих материалов, у которых пленка наносится на подложку (прессшпан, леатероид и т. д.) с одной или двух сторон. Такой материал можно применять в качестве пазовой изоляции. Большие перспективы имеет применение пленочных материалов для непрерывной гильзовой изоляции секций электрических машин.

В заключение была изготовлена опытная партия пленочного материала, который был использован в качестве пазовой изоляции для статоров сельсинов БС-1. Всего было изготовлено 10 опытных статоров БС-1. Пять из них были изготовлены с обычной пазовой изоляцией, состоявшей из одного слоя прессшпана толщиной 0,1 мм и одного слоя лакошелка той же толщины. В пяти других статорах лакошелк толщиной 0,1 мм был заменен пленкой, имевшей толщину 0,06 мм. Изготовленные статоры подвергались затем длительным испытаниям, которые заключались в том, что статоры загружались на 5 суток в гидростат, затем выдерживались сутки на воздухе и сушились в течение 6—7 ч в термостате при температуре 100—105°. Этот цикл был повторен 6 раз. Часть статоров загружалась в гидростат непосредственно после намотки, другая часть предварительно пропитывалась лаком.

Пропитка производилась масляно-асфальтовым лаком № 447, статоры сушились до пропитки при температуре 100—110° в течение 6 ч, после пропитки при той же температуре в течение 8 ч.

После действия влаги наблюдалось изменение сопротивления изоляции статоров во время пребывания их на воздухе непосредственно после извлечения из гидростата. Изменения сопро-

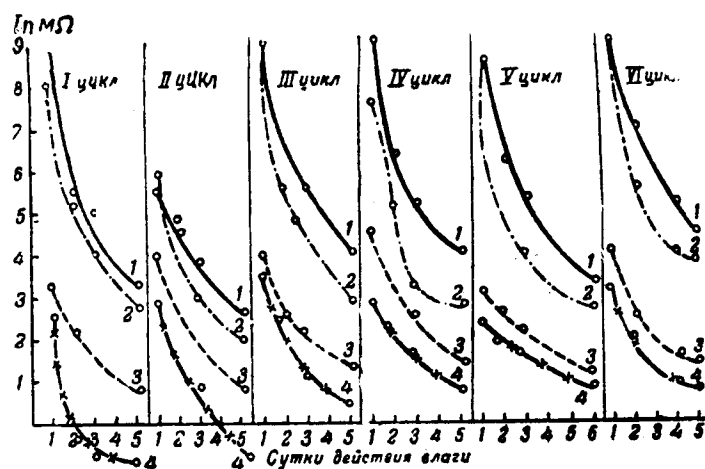


Рис. 6. Влияние действия влаги на сопротивление пазовой изоляции статора.

1, 3—изоляция в виде пленки, статор, пропитанный лаком № 447 и не пропитанный; 2, 4—лакошелк, пропитанный и непропитанный (цикл испытаний: 5 суток пребывания в гидростате, сутки выдержки в воздухе, 5—7 ч сушка в термостате при 100—105°C; всего циклов было шесть).

тивления изоляции статоров в зависимости от времени пребывания их в гидростате по всем шести циклам характеризуются кривыми, изображенными на рис. 6. Как видно из приведенных кривых, сопротивление изоляции статоров с заложеной в паз пленкой во все время испытаний продолжало оставаться более высоким, чем у статоров, изолированных лакошелком, причем это явление наблюдалось как у непропитанных, так и у пропитанных статоров.

Выводы. 1. Опыты испытания ацетобутират-целлюлозных пленок как таковых и на статорах БС-1 показали, что пленочная изоляция не имеет субмикроскопической капиллярной пористости, что дает возможность значительно повысить водостойкость изоляции машин и увеличить надежность их работы.

2. Необходимо широко развернуть опытные работы на заводах электропромышленности по разработке технологии изолирования обмоток электрических машин с применением пленочных материалов.

3. Необходимо провести наблюдение за поведением пленочной изоляции в электрических машинах в условиях эксплуатации.

4. Применение пленочной изоляции дает возможность во многих случаях отказаться от использования натурального шелка и других волокнистых материалов. Наряду с повышением качества изоляции это позволит уменьшить ее толщину, что очень важно для специальных машин.

5. Необходимо на заводах Наркомата химической промышленности поставить производство ацетобутирата целлюлозы и электроизолирующих пленок на их основе.

Литература

1. Отчет БТИ, март 1935.
2. Wire and Wire Products, January 1944.
3. Plastics Catalog, p. 150, 1944.
4. Ушаков. Эфиры целлюлозы. Госхимиздат, 1941.
5. Крюгер. Ацетилцеллюлоза. ГОНТИ, 1938.



Методы синтеза релейно-контактных схем

Кандидат техн. наук, доц. М. А. ГАВРИЛОВ

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

Задача синтеза релейно-контактных схем заключается в том, чтобы из множества всех возможных для данного количества элементов схем выделить одну, удовлетворяющую предъявленным требованиям (в отношении соединений между элементами, их количества и т. п.).

Эта задача принципиально может быть разрешена следующими двумя группами методов: а) путем изучения всего множества схем с целью определения характерных признаков каждой из них и б) при помощи нахождения закономерностей, связывающих структуру схемы с условиями ее работы.

Из числа работ, принадлежащих к первой группе, следует остановиться на работах шк. В. Розенберга, Плехль (O. Plechl) и Пиш (H. Piesch).

В. Розенберг [Л. 1] рассматривает только так называемые «циклические» схемы, в которых при работе их происходит чередование включения и выключения исполнительных элементов (исполнительными элементами будем называть реагирующие органы, сигнальные устройства и т. п., на которые воздействует рассматриваемая схема, а приемными элементами — устройства, находящиеся вне рассматриваемой схемы и участвующие в ней только своими контактами).

Исследование свойств контактных соединений показывает, что схема цепей какого-либо исполнительного элемента однозначно определяет возможные чередования его с другими и те элементы, от которых происходит включение и отключение его.

Поэтому, если составить множество всех возможных схем последовательного, параллельного и последовательно-параллельного соединений контактов и таблицу соответствующих им чередований, то можно получить своего рода ключ для подбора схем соединений контактов в цепях исполнительных элементов. После этого, определив из рассмотрения заданных условий работы схемы количество исполнительных элементов и выписав последовательность включения и отключения их, можно легко определить имеющиеся в схеме чередования элементов и выбрать, пользуясь указанной выше таблицей, схему соединения контактов, обеспечивающую эти чередования.

В другом методе, развиваемом в работах Пиша [Л. 2], Плехль (неопубликованная работа) и второй работе Розенберга [Л. 3] и наиболее подробно

В статье рассматриваются и сравниваются методы построения релейно-контактных схем, имеющих применение в устройствах телеуправления, автоматики электропривода, электроблокировки и др.

Указываются преимущества метода, использующего аппарат алгебры логики. В заключение рассматриваются примеры построения схем.

развитом инж. Пиш, рассматривается множество так называемых первичных цепей, состоящих из последовательно соединенных замыкающих и размыкающих контактов, элементов, входя-

щих в схему. При использовании этого метода сначала намечают число приемных и исполнительных элементов и затем выписывают для этого числа элементов множество элементарных цепей, представляющих различные комбинации замыкающих и размыкающих контактов. После этого выписывают алгебраические выражения для цепей, которые удовлетворяют заданным условиям работы схемы. Наконец, рассматривая совместно выражения для отдельных исполнительных элементов, устраняют противоречащие или повторяющиеся условия.

Рассмотрим пример. Предположим, что имеется три приемных элемента A , B и C и исполнительный элемент схемы X , который должен срабатывать при включении любого одного или двух из них и не срабатывать при включении трех или невключении ни одного.

Все возможные цепи для трех элементов выписаны в табл. 1. Условиям работы схемы будут соответствовать цепи 2—7. Это отмечено в таблице знаком плюс в графе исполнительного элемента X . Контакты приемных элементов обозначены в этой таблице буквами, соответствующими обозначениям самих элементов, причем для размыкающих контактов принята обозначение в виде черточки над буквой. Смысл этого обозначения будет разъяснен далее.

Так как реле X должно срабатывать при существовании каждой из цепей в отдельности, то каждая из комбинаций контактов, указанных в табл. 1, должна создавать для него отдельную, независимую от других цепь. Все эти цепи при выполнении схемы должны быть поэтому соединены параллельно. Отдельные контакты в этих цепях должны быть, очевидно, соединены последовательно.

Обозначим параллельное соединение знаком алгебраического сложения и последователь-

Таблица 1

	a	b	c	X
1	a	b	c	—
2	\bar{a}	b	c	+
3	a	\bar{b}	c	+
4	a	b	\bar{c}	+
5	\bar{a}	\bar{b}	c	+
6	\bar{a}	b	\bar{c}	+
7	a	\bar{b}	\bar{c}	+
8	$\bar{\bar{a}}$	$\bar{\bar{b}}$	$\bar{\bar{c}}$	—

ное соединение знаком алгебраического умножения. Тогда согласно табл. 1 для цепей, соответствующих условиям работы схемы, запишется следующее аналитическое выражение:

$$F_{(X)} = \bar{a}bc + a\bar{b}c + abc\bar{c} + \bar{a}bc\bar{c} + \bar{a}b\bar{c}c + a\bar{b}\bar{c}c.$$

Это аналитическое выражение будет характеризовать собой первоначальную структуру схемы, которая может содержать ряд одинаковых контактов и в соответствии с этим может быть упрощена¹.

После производства упрощений, пользуясь установленным соответствием между знаками алгебраического сложения и умножения, непосредственно по полученному окончательно аналитическому выражению рисуют искомую схему.

Практическое применение описанных выше методов возможно только для сравнительно простых схем, содержащих небольшое количество приемных и исполнительных элементов. Причиной этого является, с одной стороны, ограниченность, а с другой, — громоздкость их. Количество первичных цепей, рассматриваемых в методе Пиша и представляющих различные комбинации замыкающих и размыкающих контактов, равно

$$L = 2^n, \tag{1}$$

где n — число элементов. Уже при небольшом числе элементов выписывать и анализировать все количество цепей становится затруднительным. Число всех схем, которые можно составить из первичных цепей, определяется выражением

$$K = 2^{2^n} - 2. \tag{2}$$

Оно растет еще быстрее, и поэтому при рассмотрении множества схем приходится ограничиваться, как это делает, например, В. Розенберг, только определенным классом их.

Отметим, что в методах, основанных на анализе множества самих схем, задача синтеза схемы сводится в значительной степени только к выбору по вполне определенным признакам одной какой-либо схемы из ряда уже полученных. В методе, основанном на анализе множества первичных цепей, для осуществления их преобразований приходится устанавливать ряд закономерностей, имеющих место в релейно-контактных схемах, т. е. привлекать уже некоторый математический аппарат.

Переходя ко второй группе методов синтеза релейно-контактных схем, упомянем прежде всего о работах М. Цимбалистого и Эдлера (Edler).

В методе, предложенном М. Цимбалистым [Л. 4], для каждого исполнительного элемента составляется таблица состояний контактов, соответствующих условиям срабатывания и несрабатывания его. Затем сравнивают положение контактов в графах, соответствующих включенному и выключенному состояниям исполнительного элемента, и на основании этого сравнения определяют количество, характер и схему соединения контактов в его цепях.

Проиллюстрируем применение этого метода на примере, взяв те же условия работы схемы, что и в методе инж. Пиш. Представим себе некоторую

Таблица 2

	1	2	3	4	5	6	7	8
A	-	+	-	-	+	+	-	+
B	-	-	+	-	+	-	+	+
C	-	-	-	+	-	+	+	+
X	-	+	+	+	+	+	+	-

последовательность переключения контактов приемных элементов, при которой исполнительный элемент X переходит из нерабочего состояния в рабочее и затем опять в нерабочее. Эта последовательность

изображена в табл. 2, где знаком плюс отмечено замыкание контактов и рабочее состояние элемента X .

Сравнивая столбец 1 со столбцами 2—4 и 5—7 таблицы, можно установить, что исполнительный элемент X должен включаться при срабатывании любого из приемных элементов A , B или C . Из этого следует, что в цепи исполнительного элемента должны существовать три параллельные цепи, образованные замыкающими контактами элементов A , B и C . Эти же цепи будут, очевидно, давать путь для тока и при включении любых двух из элементов A , B и C .

Схема указанных цепей изображена на рис. 1, причем недостающая часть схемы, соответствующая не рассмотренному еще условию перехода элемента X из рабочего состояния в нерабочее, изображена условно в виде некоторого контактного многополюсника $f(a, b, c)$. Очевидно, что при работе любого одного или двух приемных элементов A , B или C в этом многополюснике должна существовать замкнутая цепь, при работе же всех трех исполнительных элементов эта цепь, как это следует из сравнения столбцов 2—4 и 5—7 табл. 2 со столбцом 8, должна разрываться.

Это может быть осуществлено, если многополюсник $f(a, b, c)$ будет состоять из трех параллельных цепей, содержащих каждая размыкающий контакт элементов A , B или C . Полная схема соединений контактов представлена на рис. 2.

Метод Эдлера [Л. 5] аналогичен только что рассмотренному и отличается от него только тем, что вместо таблиц изображаются схемы последовательных состояний, в которых представлены связи, существующие в данном состоянии для каждого исполнительного элемента схемы с источником питания, линиями и т. п. После этого путем сравнения схем состояний определяют, какие связи при переходе от одного состояния к другому устанавливаются и какие нарушаются и при помощи каких контактов это может быть сделано. На основании этого определяют число контактов и схемы их соединений для каждого из исполнительных элементов.

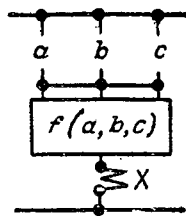


Рис. 1,

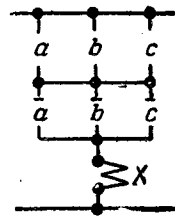


Рис. 2.

¹ Пример в конце статьи.

Методы Цимбалистого и Эдлера применимы для достаточно широкого класса схем. Однако по своему существу они представляют лишь некоторое вспомогательное и облегчающее средство к обычному методу построения схем, позволяя несколько систематизировать обычный при построении релейно-контактных схем ход логических заключений и этим ускорить их и в некоторой степени предотвратить возможные ошибки. Источником ограничений, имеющих в описанных выше методах, является то, что в них не используются те общие закономерности, которые существуют в релейно-контактных схемах и которые единственно могут быть положены в основу научной методики создания релейно-контактных схем. В отношении преобразования схем эти закономерности частично вскрываются, как говорилось выше, в методе Пиша. Однако получение самих первичных цепей производится в этом методе на основе анализа всего множества схем, что делает метод громоздким и практически мало применимым.

Для того чтобы иметь возможность производить синтез схемы, исходя из рассмотрения только тех условий, которые заданы для работы данной схемы, недостаточно иметь математический аппарат для преобразования контактных цепей. Необходимо также установить закономерности, определяющие связь между самой схемой и заданными условиями, и найти такой аппарат, который позволил бы переходить от этих условий к структуре схемы, а затем и осуществлять ее преобразование. Этим аппаратом, как показали в своих работах В. Шестаков [Л. 6, 7] и Шеннон (С. Shannon) [Л. 8], является аппарат так называемой «алгебры логики», или «булевой» алгебры [Л. 9, 10].

Возможность использования аппарата алгебры логики для синтеза релейно-контактных схем базируется на том, что как основные задачи, так и законы алгебры логики соответствуют основным задачам и закономерностям, имеющимся в релейно-контактных схемах [Л. 11].

В алгебре логики рассматриваются три действия: логическое умножение, логическое сложение и логическое отрицание. Логическим произведением двух суждений X и Y называется суждение, которое истинно в том и только в том случае, когда оба суждения X и Y истинны; логической суммой двух суждений X и Y называется суждение, для истинности которого достаточно, чтобы по крайней мере одно из суждений X или Y было истинно. Наконец, логическим отрицанием называется суждение, противоречащее данному, т. е. таксе суждение, которое истинно, когда данное суждение ложно, и ложно, когда данное суждение истинно.

Примем, что истинности суждений в релейно-контактных схемах будет соответствовать наличие замкнутой цепи, а ложности суждений — отсутствие замкнутой цепи. Тогда в релейно-контактных схемах логическому произведению суждений будет соответствовать последовательное соединение контактов, а логической сумме — параллельное соединение контактов.

Это следует из того, что как сумма двух суждений истинна, когда истинны одно и другое суж-

дение, так и последовательная цепь двух контактов будет замкнута только тогда, когда и один и другой контакт замкнуты. С другой стороны, как произведение двух суждений истинно, когда истинно одно или другое суждение, так и цепь, состоящая из двух параллельно соединенных контактов, будет замкнута в том случае, когда один или другой контакт замкнут. Это соответствие дает нам право обозначить, как и было сделано выше, последовательное соединение контактов знаком алгебраического умножения, а параллельное — знаком алгебраического сложения.

Логическому отрицанию в релейно-контактных схемах будет, очевидно, соответствовать такая контактная цепь, которая разомкнута, когда замкнута исходная цепь, и, наоборот, замкнута, когда исходная цепь разомкнута. Таким образом отрицанием замыкающего контакта какого-либо исполнительного элемента будет являться его размыкающий контакт. Это дает нам основание, как и было сделано выше, принять для обозначения размыкающих контактов символ отрицания в виде черточки над буквой, обозначающей контакт.

Заметим, что логическому произведению соответствует связь суждений союзом *и*, а логической сумме — связь суждений союзом *или*. Это позволяет установить те закономерности, которые необходимо иметь, как указывалось выше, для перехода от условий, заданных для работы схемы, к структурной формуле ее. Действительно, условия работы любого исполнительного элемента можно записать, пользуясь только союзом *и* и *или*. Так, например, условия работы исполнительного элемента X в рассмотренном выше примере могут быть записаны следующим образом. Цепь исполнительного элемента X должна быть замкнута, если сработает исполнительный элемент A , или B , или C , или A и B , или A и C , или B и C .

Однако, как было показано выше, связь при помощи союзов *и* и *или* соответствует логическому произведению и логической сумме. Поэтому условия работы исполнительного элемента могут быть записаны в символической форме в виде некоторой логической функции. С другой стороны, как было установлено выше, логической сумме и логическому произведению соответствуют вполне определенные соединения контактов. Поэтому логическая функция, выражающая условия работы исполнительного элемента, будет одновременно вполне однозначно определять и схему соединений контактов в его цепи, т. е. будет представлять собой структурную формулу схемы. Таким образом получение первоначальной структурной формулы схемы осуществляется в рассматриваемом методе просто путем записи в символической форме условий работы исполнительных элементов ее.

Рассмотрим теперь основные законы алгебры логики и покажем, что они полностью соответствуют тем закономерностям, которые имеют место в релейно-контактных схемах. В алгебре логики существуют следующие семь основных законов:

а) переместительные законы

$$\begin{aligned}x + y &= y + x, & (3) \\xy &= yx; & (3a)\end{aligned}$$

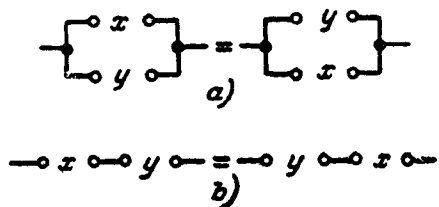


Рис. 3.

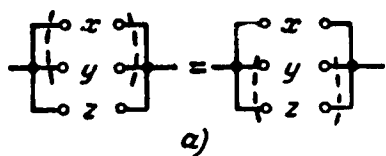


Рис. 4.

б) сочетательные законы

$$(x + y) + z = x + (y + z), \quad (4)$$

$$(xy)z = x(yz); \quad (4a)$$

в) распределительные законы

$$(x + y)z = xz + yz, \quad (5)$$

$$xy + z = (x + z)(y + z); \quad (5a)$$

г) законы инверсии

$$\overline{x + y} = \bar{x}\bar{y}, \quad (6)$$

$$\overline{xy} = \bar{x} + \bar{y}. \quad (6a)$$

Легко показать, что эти законы справедливы и для релейно-контактных схем. Так, например, при последовательном и параллельном соединениях контактов для действия исполнительного элемента безразлично, в какой последовательности соединены эти контакты (рис. 3 а и б), поэтому для релейно-контактных схем справедлив переместительный закон.

Точно так же при наличии в цепи исполнительного элемента трех или нескольких последовательно или параллельно соединенных контактов при одновременном замыкании их совершенно безразлично, как рассматривать образование цепи (рис. 4 а и б) — сперва от замыкания первых двух, а затем третьего контакта или сперва от замыкания первого контакта и затем остальных двух. Это указывает на справедливость для контактных цепей сочетательного закона.

Справедливость для релейно-контактных схем распределительного закона иллюстрируется схемами рис. 5 а и б. Легко видеть, что действие схем, изображенных слева и справа от знака равенства, совершенно одинаково при замыкании контактов в любых комбинациях.

Легко видеть также, что действия схем, изображенных на фиг. 6 а и б и иллюстрирующих закон инверсии, противоположно друг другу. Отсюда следует, что для релейно-контактных схем справедлив и закон инверсии.

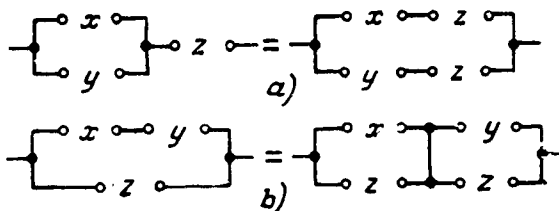


Рис. 5.

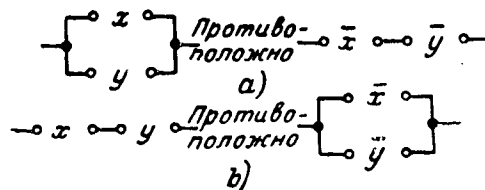


Рис. 6.

Рассмотренные законы алгебры логики представляют собой основные равносильности, позволяющие производить преобразование и упрощение структурных формул схем. Следствия, которые можно вывести из этих основных законов, дают возможность получить выражения, которые позволяют, не прибегая к построению и рассмотрению схем, преобразовывать их в желаемом направлении.

Благодаря этому синтез схемы по заданным условиям в рассматриваемом методе может быть сведен к следующему:

а) составляют условия работы для каждого исполнительного элемента схемы; б) пользуясь символикой алгебры логики, записывают эти условия в виде логической функции; в) полученные выражения преобразуют, используя законы алгебры логики в соответствии с требованиями к структуре схемы, и г) по полученному окончательному выражению изображают схему.

Для иллюстрации сказанного выше примерами рассмотрим некоторые выражения, служащие для преобразования и упрощения схем. Будем обозначать всегда замкнутую цепь через единицу и всегда разомкнутую цепь через нуль. Тогда будем иметь следующие формулы преобразования и упрощения:

$$x\bar{x} = 0, \quad (7)$$

$$x + \bar{x} = 1; \quad (7a)$$

$$x \cdot 1 = x, \quad (8)$$

$$x + 1 = 1; \quad (8a)$$

$$x \cdot 0 = 0, \quad (9)$$

$$x + 0 = x; \quad (9a)$$

$$x \cdot x \cdot x \dots = x, \quad (10)$$

$$x + x + x + \dots = x; \quad (10a)$$

$$x + xy = x, \quad (11)$$

$$x(x + y) = x; \quad (11a)$$

$$x + \bar{x}y = x + y, \quad (12)$$

$$x(\bar{x} + y) = xy; \quad (12a)$$

$$xf(x, y, z, \dots, w) = xf(1, y, z, \dots, w), \quad (13)$$

$$x + f(x, y, z, \dots, w) = x + f(0, y, z, \dots, w); \quad (13a)$$

$$\bar{x}f(x, y, z, \dots, w) = \bar{x}f(0, y, z, \dots, w). \quad (14)$$

$$\bar{x} + f(x, y, z, \dots, w) = \bar{x} + f(1, y, z, \dots, w). \quad (14a)$$

Выражения (11), (11a), (12) и (12a) могут быть также написаны в более общей форме, а именно:

$$f(x, y, \dots, w) + f(x, y, \dots, w)f_1(x, y, \dots, w) + \dots = f(x, y, \dots, w), \quad (11')$$

$$f(x, y, \dots, w)[f(x, y, \dots, w) + f_1(x, y, \dots, w)],$$

$$[f(x, y, \dots, w) + f_2(x, y, \dots, w)] \dots = f(x, y, \dots, w); \quad (11'a)$$

$$x + \bar{x}y + \bar{x}yz + \bar{x}yzw + \dots = x + y + z + w + \dots, \quad (12')$$

$$x(\bar{x} + y)(\bar{x} + y + z)(\bar{x} + y + z + w) \dots = xyzw \dots \quad (12a)$$

Легко также показать равносильность следующих выражений:

$$(x + y)(x + z)(y + z) = xy + xz + yz, \quad (15)$$

$$(x + \bar{z})(y + \bar{z}) = xz + y\bar{z} \quad (16)$$

и т. д.

Рассмотрим несколько примеров синтеза схем.

а) Цепь исполнительного элемента X должна замыкаться при срабатывании любого одного или двух приемных элементов A, B или C и не замыкаться при срабатывании трех и несрабатывании ни одного из них. Эти условия могут быть записаны в символическом виде следующим образом.

Условия замыкания цепи от срабатывания одного из элементов A, B или C :

$$\bar{a}\bar{b}\bar{c} + \bar{a}b\bar{c} + \bar{a}\bar{b}c.$$

Условия замыкания цепи от срабатывания элементов A, B и C :

$$a\bar{b}\bar{c} + \bar{a}bc + \bar{a}bc.$$

Общая структурная формула

$$f_{(x)} = \bar{a}\bar{b}\bar{c} + \bar{a}b\bar{c} + \bar{a}\bar{b}c + a\bar{b}\bar{c} + \bar{a}bc + abc.$$

Эта формула одинакова с полученной выше при рассмотрении метода Пиша. Вынося за скобки общие члены, в соответствии с (5) получим:

$$f_{(x)} = a[(b + \bar{b})\bar{c} + \bar{b}c] + \bar{a}[(b + \bar{b})c + b\bar{c}] =$$

$$= a(\bar{c} + \bar{b}c) + \bar{a}(c + b\bar{c}).$$

Пользуясь выражением (12), будем иметь:

$$f_{(x)} = a(\bar{c} + \bar{b}) + \bar{a}(c + b).$$

Соответствующая схема представлена на рис. 7.

б) Схема электрического замка³. Необходимо создать схему, в которой исполнительный элемент Y ,

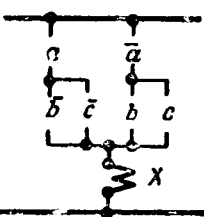


Рис. 7.

освобождающий защелку замка, срабатывал бы при воздействии на элементы A, B и C (ключи или кнопки) в последовательности $C-A-B-A$. При воздействии же на эти элементы во всякой другой последовательности должен срабатывать исполнительный элемент Z , включающий звуковой сигнал W и делающий невозможным включение Y , а также приводящий всю систему в нормальное положение.

³ Сюжеты примеров б) и в) заимствованы из статей К. Шеннона и Пиша.

Так как исполнительный элемент Y должен срабатывать только после нескольких воздействий на элементы A, B и C , то для фиксации всех промежуточных воздействий должны быть предусмотрены вспомогательные исполнительные элементы X_1, X_2 и X_3 . Каждый из них должен срабатывать при воздействии на соответствующий исполнительный элемент A, B или C в правильной последовательности и оставаться во включенном состоянии, фиксируя это воздействие до момента окончания цикла воздействий, т. е. до момента срабатывания исполнительного элемента Y . Естественно, что действие этих элементов должно происходить только в том случае, если не сработал исполнительный элемент Z .

Помимо указанных вспомогательных элементов $X_1 - X_3$ предусмотрим еще возвращающий элемент G в виде кнопки, при воздействии на которую схема должна возвращаться в первоначальное состояние. Условия работы исполнительных элементов запишутся следующим образом:

$$f_{(x_1)} = \bar{g}\bar{y}\bar{z}(c + x_1),$$

$$f_{(x_2)} = \bar{g}\bar{y}\bar{z}x_1(a + x_2),$$

$$f_{(x_3)} = \bar{g}\bar{y}\bar{z}x_2(b + x_3),$$

$$f_y = \bar{g}\bar{z}x_3(a + y).$$

Исполнительный элемент Z должен сработать при воздействии на элементы A, B и C во всех других комбинациях, кроме указанных выше. Поэтому

$$f_{(z)} = \bar{g}[x_1(a + b) + x_1\bar{x}_2(b + c) + x_2\bar{x}_3(a + c) + \bar{x}_3y(b + c)].$$

Наконец, для звукового сигнала W будем иметь:

$$f_{(y)} = z.$$

Общая структурная формула

$$F = \bar{g}\bar{y}\bar{z}(c + x_1)X_1 + \bar{g}\bar{y}\bar{z}x_1(a + x_2)X_2 + \bar{g}\bar{y}\bar{z}x_2(b + x_3)X_3 + \bar{g}\bar{z}x_3(a + y)Y + \bar{g}[x_1(a + b) + x_1x_2(b + c) + x_2x_3(a + c) + x_3y(b + c)]Z + ZW.$$

Вынося за скобки общие члены, получим:

$$F = \bar{g} \left\{ \left\{ \bar{z} \left\{ y[(c + x_1)X_1 + x_1(a + x_2)X_2 + x_2(b + x_3)X_3] + x_3(a + y)Y \right\} + [x_1(a + b) + (x_1x_2 + x_2x_3)y](b + c) + x_2x_3(a + c) \right\} Z \right\} + zW.$$

Схема, соответствующая этой структурной формуле, представлена на рис. 8.

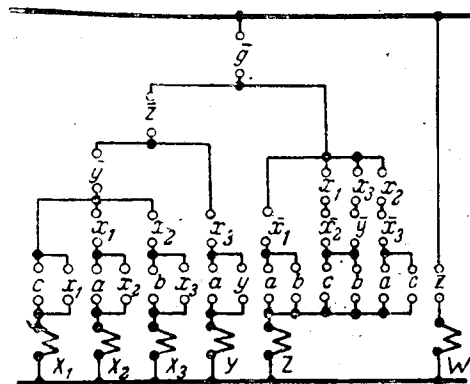


Рис. 8.

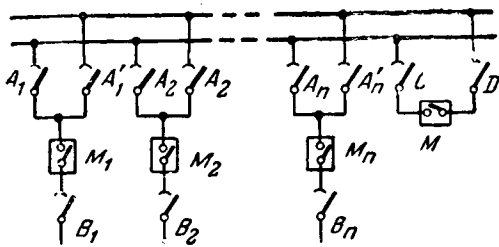


Рис. 9.

в) Схема блокировки шинных разъединителей. Как известно, включение и отключение какого-либо шинного разъединителя A_1 в электрических распределительных устройствах (рис. 9) допускается в следующих случаях: а) если шинный разъединитель второй системы шин отключен, то только при отключенном линейном выключателе M_1 или отключенном линейном разъединителе B ; б) если шинный разъединитель второй системы шин включен, то только при включенном шиносоединительном выключателе M и включенных его разъединителях C и D .

Обозначив катушки электрозщелок шинных разъединителей через X с соответствующими индексами, получим для них в соответствии с указанными выше условиями следующие структурные формулы:

$$\begin{aligned} f_{(X_1)} &= \bar{a}'_1(\bar{m}_1 + \bar{b}_1) + a'_1 mcd, \\ f_{X_1} &= \bar{a}_1(\bar{m}_1 + \bar{b}_1) + a_1 mcd, \\ f_{X_2} &= \bar{a}'_2(\bar{m}_2 + \bar{b}_2) + a'_2 mcd, \\ &\dots \\ f_{X_n} &= \bar{a}'_n(\bar{m}_n + \bar{b}_n) + a'_n mcd, \\ f_{(X'_n)} &= \bar{a}_n(\bar{m}_n + \bar{b}_n) + a_n mcd. \end{aligned}$$

Общая структурная формула

$$\begin{aligned} F &= [\bar{a}'_1(\bar{m}_1 + \bar{b}_1) + a'_1 mcd] X_1 + [\bar{a}_1(\bar{m}_1 + \bar{b}_1) + a_1 mcd] X'_1 + \dots + [\bar{a}'_n(\bar{m}_n + \bar{b}_n) + a'_n mcd] X_n + \\ &+ [\bar{a}_n(\bar{m}_n + \bar{b}_n) + a_n mcd] X'_n = \\ &= (\bar{m}_1 + \bar{b}_1)(\bar{a}'_1 X_1 + \bar{a}_1 X'_1) + (\bar{m}_2 + \bar{b}_2)(\bar{a}'_2 X_2 + \bar{a}_2 X'_2) + \dots + \\ &+ (\bar{m}_n + \bar{b}_n)(\bar{a}'_n X_n + \bar{a}_n X'_n) + mcd(a'_1 X_1 + a_1 X'_1 + a'_2 X_2 + a_2 X'_2 + \dots + a'_n X_n + a_n X'_n). \end{aligned}$$

Соответствующая схема изображена на рис. 10. Дальнейшее упрощение ее возможно только за счет объединения обмоток исполнительных элементов X .

Из рассмотренных методов синтеза релейно-

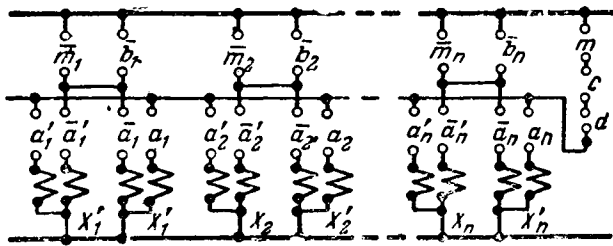


Рис. 10.

контактных схем наиболее прост метод, основанный на применении алгебры логики; достоинство этого метода заключается, однако, не только в том, что при применении его можно наиболее быстро и с наименьшей затратой сил получить по заданным условиям структуру схемы, но также и в том, что он наиболее полно вскрывает закономерности, имеющие место в релейно-контактных схемах. Эти закономерности позволяют значительно сознательнее и правильнее оценивать различные схемные решения, производить общие исследования схем, определять признаки, присущие отдельным классам и типам их, и т. д.

Настоящая статья имеет целью общее ознакомление с существующими методами синтеза релейно-контактных схем и оценки их применимости. Для практического использования этих методов, в частности—последнего из них, необходимо освещение ряда дополнительных вопросов. Нужно указать, например, что алгебра логики и ее символика не полностью удовлетворяют требованиям теории построения релейно-контактных схем к математическому аппарату. Она позволяет описывать структуры схем только параллельно-последовательного класса (схем класса П). Преобразования не параллельно-последовательных схем (схем класса Н), типичным представителем которых является контактная схема с соединениями типа мостика Уит-стона, а также ряда других классов схем (симметричных схем, схем с вентильными элементами [Л. 11], схем с поляризованными исполнительными элементами и т. п.), требуют в ряде случаев разработки специальной символика и обладают некоторой спецификой, которая нуждается в особом изложении.

Литература

1. В. Розенберг. Некоторые свойства релейного набора. Автоматика и телемеханика, стр. 37, № 1, 1939.
2. Н. Pichl. Begriff der allgemeinen Schaltungstechnik. Arch. f. Elektrot., № 10, № 11, 1939.
3. В. Розенберг. Задача о блокировке и преобразовании контактных групп. Автоматика и телемеханика, стр. 49, № 1, 1940.
4. М. Цимбалыстый. К вопросу о рациональном составлении релейных схем. Труды Ленинградской экспериментальной электротехнической лаборатории, вып. 8, стр. 19, 1928.
5. R. Edler. Schalterbau, Bd 2 „Schaltchre“, Leipzig, 1927.
6. В. Шестаков. Алгебра двухполюсных схем, построенных исключительно из двухполюсников. Автоматика и телемеханика, стр. 15, № 2, 1941.
7. В. В. Шестаков. Об одном символическом исчислении, применимом в теории релейных электрических схем. Ученые записки МГУ, вып. 13. Математика, кн. 5, стр. 45, 1944.
8. C. Shannon. A. Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits. Trans. of American Inst. of El. Eng., v. 57, 1938.
9. Л. Кутюра. Алгебра логики, изд. Mathesis, Одесса, 1903.
10. И. Градштейн. Прямая и обратная теоремы, изд. ОНТИ, 1933.
11. М. А. Гаврилов. Релейно-контактные схемы с вентильными элементами. Известия Академии наук СССР, Отделение технических наук, стр. 153, № 3, 1945.



Теорема вариации параметров линейной электрической цепи

Доктор техн. наук, проф. К. М. ПОЛИВАНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Режим любой линейной электрической цепи при изменении сопротивления одной из ее ветвей от нуля до бесконечности может быть, как известно, определен на основании двух опытов. Обычно в качестве таких двух опытов выбирались опыты холостого хода и короткого замыкания. Основанные на этом свойстве цепей метод холостого хода и короткого замыкания и теорема Тевенена-Гельмгольца нашли широкое применение в электротехнической практике.

В настоящей статье рассматривается теорема вариации тока, представляющая некоторое обобщение указанных выше методов; вариация тока определяется по двум режимам электрической цепи, которыми в частности могут являться режимы холостого хода и короткого замыкания. Кроме того на основании излагаемой теоремы может быть определен ток в одной ветви при изменении сопротивления в другой (тогда как по основной теореме Тевенена определяется ток именно той ветви, в которой меняется сопротивление). Опыт применения этой теоремы к расчетам свидетельствует о целесообразности пользования ею.

В настоящей статье приводятся примеры определения (по опытам двух режимов): 1) зависимости тока в диагонали моста Уитстона от изменения сопротивления в одном из его плеч; 2) зависимости напряжения у одного приемника от изменения нагрузки другого в случае их питания от общих источников при любой сложной цепи; 3) тока короткого замыкания.

Теорема вариации тока. В линейной электрической цепи изменение сопротивления δZ_q в какой-либо ветви q вызывает изменение тока в ветви p

$$\delta j_p = \frac{a \delta Z_q}{1 + b \delta Z_q}, \quad (1)$$

где a и b — коэффициенты, постоянные для данной цепи и выбранных ветвей p и q .

Постоянные a и b могут быть выражены через собственную проводимость Y'_{qq} (входная проводимость ветви q), взаимную проводимость

В статье излагается одна из теорем теории линейных электрических цепей, частные случаи которой (теорема Тевенена-Гельмгольца, метод холостого хода и короткого замыкания) нашли широкое применение в электротехнике. Показывается на примерах практическое значение теоремы.

Y'_{pq} ветвей p и q и ток j'_q в ветви q при $\delta Z_q = 0$:
 $a = j'_q Y'_{pq}$, $b = Y'_{qq}$. (2)

Таким образом

$$\delta j_p = \frac{j'_q Y'_{pq} \delta Z_q}{1 + Y'_{qq} \delta Z_q}. \quad (3)$$

Полагая $p=q$ (ветви p и q соединены последовательно), имеем:

$$\delta j_q = \frac{j'_q Y'_{qq} \delta Z_q}{1 + Y'_{qq} \delta Z_q}. \quad (4)$$

Доказательство. Иллюстрацией к приводимому доказательству служат схемы рис. 1, в которых буква A указывает на наличие внутри четырехполюсника генераторов (активный четырехполюсник), а буква P — на отсутствие генераторов (пассивный четырехполюсник). В остальном все элементы внутренней цепи четырехполюсников, считая и внутренние сопротивления генераторов и их соединения, тождественны.

На рис. 1 знаком равенства показана эквивалентность первой и второй схем, а также эквивалентность каждой из них двум последним схемам, токи которых должны суммироваться по правилам суперпозиции. Это показано на рис. 1 знаком плюс, стоящим между третьей и четвертой схемами.

В соответствии с рис. 1 ведется и весь ход рассуждений для вывода теоремы вариации.

Цепь, содержащая сопротивление δZ_q в ветви q , при токе I_q в этой ветви, эквивалентна такой же цепи с э. д. с. $I_q \delta Z_q$, включенной в ветвь взамен сопротивления δZ_q (так как при этом напряжение между точками присоединения ветви q останется неизменным при неизменности тока). Это известный принцип компенсации, на котором основаны различные приемы расчета электрических цепей, в частности теорема компенсации [Л. 1]. Важно отметить, однако, существенную разницу между теоремой компенсации и приведенным здесь соотношением (3), при выводе ко-

¹ Значения всех величин, относящихся к состоянию цепи при $\delta Z_q = 0$, отмечены значком «прим».

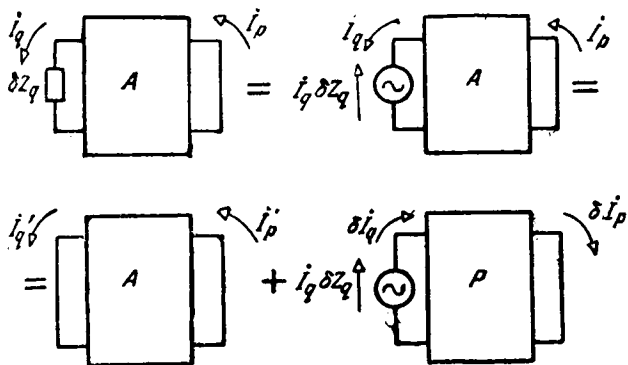


Рис. 1. $i_q = i'_q - \delta i_q = i'_q - i_q \delta Z_q Y'_{qq}$,
 $i_p = i'_p - \delta i_p = i'_p - i_q \delta Z_q Y'_{pq}$.

тогого мы пользуемся *принципом* компенсации. Действительно, входящее в выражение теоремы компенсации значение взаимной проводимости Y'_{pq} также изменяется вместе с введением сопротивления δZ_q , что и является главным неудобством при использовании теоремы компенсации. Это неудобство устранено в формулированной здесь теореме вариации, уравнение (3).

По принципу суперпозиции токи i_p, i_q в такой системе могут быть найдены как разность токов i'_p, i'_q , протекающих при действии всех э. д. с., кроме $i_q \delta Z_q$, и токов $\delta i_p, \delta i_q$, протекающих при наличии одной лишь э. д. с. $i_q \delta Z_q$ (если положительные направления токов i'_p, i'_q и $\delta i_p, \delta i_q$ выбраны противоположно):

$$i_p = i'_p - \delta i_p \tag{5}$$

и

$$i_q = i'_q - \delta i_q. \tag{6}$$

Но токи i'_p и i'_q равны токам данной цепи до изменения сопротивления в ветви q (так как $\delta Z_q = 0$), следовательно, токи δi_p и δi_q выражают уменьшение токов i'_p и i'_q при введении сопротивления δZ_q .

Из линейности системы очевидно, что

$$\delta i_p = i_q \delta Z_q Y'_{pq} \tag{7}$$

и

$$\delta i_q = i_q \delta Z_q Y'_{qq}. \tag{8}$$

После подстановки значения δi_q из (8) в (6) и решения относительно i_q находят

$$i_q = \frac{i'_q}{1 + Y'_{qq} \delta Z_q}. \tag{9}$$

Подстановка i_q из (9) в (7) и (8) приводит к уравнениям (1), (3) и (4), подлежащим доказательству.

Из уравнений (3) и (4) непосредственно получается:

$$Y'_{qq} = \frac{\delta i_q}{(i'_q - \delta i_q) \delta Z_q} = \frac{\delta i_q}{i_q \delta Z_q} \tag{10}$$

и

$$Y'_{pq} = \frac{\delta i_p}{(i'_p - \delta i_p) \delta Z_q} = \frac{\delta i_p}{i_q \delta Z_q}, \tag{11}$$

где $i_q, \delta i_p$ и δi_q соответствуют данному δZ_q , а i'_q и Y'_{pq} соответствуют $\delta Z_q = 0$.

Таким образом по значениям токов в ветвях p и q для двух значений сопротивления в ветви q (первое из них полагаем равным нулю, а второе какому-либо конкретному значению δZ_q , в частности и $\delta Z_q \rightarrow \infty$), находятся значения Y'_{qq}, Y'_{pq} и i'_q или коэффициенты a и b , входящие в выражение $\delta i_p = f(\delta Z_q)$.

При $\delta Z_q \rightarrow \infty$ (опыт холостого хода) одновременно $i_q \rightarrow 0$, а их произведение согласно закону Ома стремится к значению напряжения холостого хода (т. е. к значению напряжения между точками присоединения разомкнутой ветви q).

$$i \lim_{\delta Z_q \rightarrow \infty} i_q \delta Z_q = U_{q0} \tag{12}$$

откуда по (10) и (11)

$$Y'_{qq} = \frac{i'_q}{U_{q0}} \tag{13}$$

и

$$Y'_{pq} = \frac{(i'_p - i_{p0})}{U_{q0}}, \tag{14}$$

так как при изменении δZ_q от 0 до ∞ ток в ветви q меняется от первоначального значения i'_q , до 0, а ток в ветви p меняется от i'_p до i_{p0} , где i_{p0} ток ветви p при разомкнутой ветви q .

Уравнения (13) и (14), решенные относительно i'_q и i'_p , т. е.

$$i'_q = U_{q0} Y'_{qq} \tag{15}$$

и

$$i'_p = i_{p0} + U_{q0} Y'_{pq}, \tag{16}$$

выражают: первое — известную теорему Тевенена-Гельмгольца, а второе — ее обобщение, являющееся предметом специальной статьи Х. Атаки [Л. 2]. Однако это обобщение теоремы Тевенена было хорошо известно и ранее и им часто пользовались в электротехнических расчетах (см., например, уравнение (29) в курсе токов короткого замыкания Н. Щедрина [Л. 3]). Заменяя проводимость через сопротивление, что можно, разумеется, сделать и во всех других выражениях, приводимых здесь, получим более привычную форму записи теоремы Тевенена.

Из всего изложенного видно, что уравнения (15) и (16) являются частными следствиями более общего соотношения (3), которое в соответствии с характером терминологии, принятой в теории электрических цепей, выше названо теоремой вариации для тока. Аналогичные теоремы вариации могут быть сформулированы для других величин, характеризующих цепь, в частности для проводимости. Как это видно из ниже следующего, они легко выводятся из теоремы вариации тока.

Теорема вариации проводимости. Если Y'_{pl} взаимная проводимость ветвей p и l при отсутствии сопротивления в ветви q ($\delta Z_q = 0$), а $Y'_{pl} = Y'_{pl} - \delta Y'_{pl}$ взаимная проводимость тех же ветвей при наличии в ветви q сопротивления δZ_q , то

$$Y \delta_{pl} = \frac{Y'_{pq} Y'_{lq} \delta Z_q}{1 + Y'_{qq} \delta Z_q}. \tag{17}$$

Доказательство. Достаточно предположить, что ток в ветвях p и q создается генератором с э. д. с. U_l , помещенным в ветви l , и, следовательно, что

$$I_p = \dot{U}_l Y_{lp} \quad \text{и} \quad I_q = U_l Y_{lq}. \quad (18)$$

В таком случае

$$\delta I_p = \dot{U}_l \delta Y_{lp} = -\frac{\dot{I}_q}{Y_{lq}} \delta Y_{lp} \quad (19)$$

и согласно уравнению (3)

$$\delta Y_{lp} = \frac{\delta I_p}{I_p} Y_{lq} = \frac{Y'_{lq} Y'_{pq} \delta Z_q}{1 + Y'_{q1} \delta Z_q}, \quad (20)$$

что и требовалось доказать.

Полагая в (20) $l=q$, получаем выражение для δY_{qq} ; полагая еще и $p=q$, находим выражение для δY_{qq} .

Для иллюстрации применения уравнения (3) рассмотрим два примера.

Пример 1 (рис. 2). В одном из плеч (ветвь q) уравновешенного моста Уитстона постоянного тока протекает ток $0,9 \text{ A}$ (I_q). При уменьшении сопротивления этого плеча на $0,2 \Omega$ ($\delta Z_q = 0,2 \Omega$) ток в нем возрастает до 1 A ($\delta I_q = -0,1 \text{ A}$). В диагонали моста (ветвь p) при этом устанавливается ток $10 \mu\text{A}$ ($\delta I_p = -10 \mu\text{A}$, $I_p = 0$). Требуется найти зависимость тока в диагонали ($I_p = \delta I_p$) от изменения сопротивления (δZ_q) рассматриваемого плеча.

По (10)

$$Y'_{qq} = \frac{\delta I_q}{I_q \delta Z_q} = \frac{0,1 \text{ A}}{1 \text{ A} \cdot 0,2 \Omega} = 0,5 \bar{\delta}.$$

По (11)

$$Y'_{pq} = \frac{\delta I_p}{I_q \delta Z_q} = \frac{10^{-5} \text{ A}}{1 \text{ A} \cdot 0,2 \Omega} = 5 \cdot 10^{-5} \bar{\delta}$$

По (3)

$$I_p = \delta I_p = \frac{-I_q Y'_{pq} \delta Z_q}{1 + Y'_{qq} \delta Z_q} = \frac{-0,9 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \delta Z_q}{1 + 0,5 \delta Z_q} = \frac{4,5 \cdot 10^{-5} \delta Z_q}{1 + 0,5 \delta Z_q}.$$

Пример 2 (рис. 3). От общего источника постоянного тока питаются два потребителя p и q . Требуется найти влияние изменения сопротивления Z_q на напряжение у потребителя p при $Z_p = \text{const}$. Известно, что $U'_q = 95 \text{ V}$, $I_q = 50 \text{ A}$, $U'_p = 100 \text{ V}$, $I_p = 20 \text{ A}$ при номинальной нагрузке. При размыкании ветви q (холостой ход) $U_{q0} = 100 \text{ V}$, $U_{p0} = 105 \text{ V}$, $I_{p0} = 21 \text{ A}$.

По (13)

$$Y'_{qq} = \frac{I_q}{U_q} = \frac{50 \text{ A}}{100 \text{ V}} = 0,5 \bar{\delta}.$$

По (14)

$$Y'_{pq} = \frac{I_p - I_{p0}}{U_{p0}} = \frac{(20) - 21 \text{ A}}{100 \text{ V}} = 0,01 \bar{\delta},$$

откуда по (3) после умножения на $Z_p = \frac{U'_p}{I_p} = \text{const}$, находим уменьшение напряжения

$$\delta U_p = Z_p \delta I_p = Z_p \frac{I_q Y'_{pq} \delta Z_q}{1 + 0,5 \delta Z_q} = \frac{-2,5 \delta Z_q}{1 + 0,5 \delta Z_q}.$$

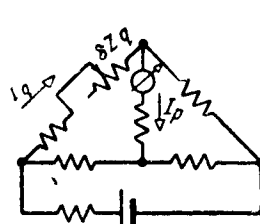


Рис. 2.

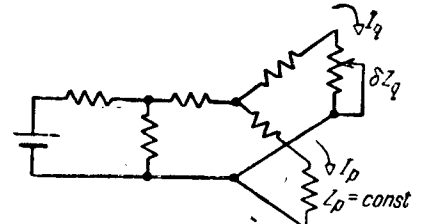


Рис. 3.

Для более полной характеристики применения теоремы вариации можно указать, что из приведенных данных легко найти ток короткого замыкания ветви q , а также напряжение, которое при этом будет существовать у потребителя p . Действительно,

$$\delta I_q = \frac{I_q Y'_{q1} \delta Z_q}{1 + Y'_{qq} \delta Z_q} = \frac{25 \delta Z_q}{1 + 0,5 \delta Z_q}.$$

Но при коротком замыкании

$$\delta Z_q = Z'_q - \frac{U'_q}{I'_q} = 1,9 \Omega,$$

а следовательно, ток короткого замыкания

$$I_{q \text{ к.з.}} = I'_q \delta I_{q \text{ к.з.}} = 50 + \frac{25 \cdot 1,9}{1 - 0,9} = 1000 \text{ A}.$$

Напряжение U_p при коротком замыкании ветви q

$$U_{p \text{ к.з.}} = U'_p \delta U_{p \text{ к.з.}} = 100 - \frac{2,5 \cdot 1,9}{1 - 0,5 \cdot 1,9} = 55 \text{ V}.$$

Заключение. Приведенное выше соотношение (3), существующее в линейных электрических цепях, между изменением тока (δI_p) в какой-либо ветви p и изменением сопротивления (δZ_q) в ветви q

$$\delta I_p = f(\delta Z_q) \quad (21)$$

может оказаться полезным при решении ряда практических задач в области анализа измерительных систем [Л. 4], анализа режимов в сложных электрических сетях и т. п.

Особенно следует отметить возможность определения этого соотношения из опыта двух режимов [уравнения] (10), (11), (13), (14)]. Эти соотношения выражают очень общие свойства электрических цепей и содержат в себе, как частные случаи, выражения теоремы Тевенена-Гельмгольца, метода холостого хода и короткого замыкания, а также других соотношений, известных в теории электрических цепей (уравнение круговой диаграммы и т. п.)

При малых изменениях токов уравнение (1) может быть применено и для исследования режимов в нелинейных цепях.

Литература

1. Т. Е. Ши. Четырехполюсники и электрические фильтры. Связьиздат, 1934.
2. Hikosaburo Ataka. On an Extension of the Thévenin's Theorem. Phil. Mag., т. 25, № 169, 1938.
3. Н. Щедрин. Токи короткого замыкания высоковольтных систем. Энергоиздат, Москва—Ленинград, 1935.
4. М. И. Левин. Общие свойства измерительных схем. Электричество, № 2, 1946.



Общие свойства измерительных схем

Кандидат техн. наук М. И. ЛЕВИН

Московский энергетический институт им. Молотова

1. Все мостовые и компенсационные схемы, широко применяемые в современной электронизмерительной технике, в устройствах для автоматизации и регулирования различных процессов, обладают некоторыми общими свойствами, знание которых облегчает их анализ и расчет.

Можно показать, что закономерности моста Уитстона, выявленные R. I. Weu¹, имеют общий характер и что анализ любой измерительной схемы можно значительно упростить, положив в основу определение некоторых основных параметров².

2. Рассмотрим произвольную измерительную схему с любым числом э. д. с. и любым числом сопротивлений (в общем случае комплексных) и независимых от протекающих по ним токов. Выделим в этой схеме (рис. 1) две ветви — ветвь 1, в которую включено изменяющееся сопротивление Z , и ветвь 2, в которую включен измерительный прибор G . Найдем зависимость тока I_g в ветви 2 от изменения сопротивления Z . Представим сопротивление Z в виде $Z = Z_0 + \Delta Z$ (рис. 2а), где Z_0 — постоянная величина, а ΔZ — переменное приращение, могущее принимать любые значения как по величине, так и по знаку.

Изменение сопротивления Z от Z_0 до $Z_0 + \Delta Z$ можем представить как введение в ветвь 1 между зажимами $a'a''$ сопротивления ΔZ (размыкание рубильника K).

Обозначим \dot{I} и \dot{I}_g токи в ветвях 1 и 2 при $\Delta Z = 0$, \dot{I} и \dot{I}_g — значения тех же токов при введенном сопротивлении ΔZ .

Известно, что токи и напряжения в цепи не

Показано, что установленное R. I. Weu для моста Уитстона положение: связь между током в диагонали и сопротивлением любого плеча исчерпывающе определяется двумя параметрами — чувствительностью моста вблизи нулевого значения тока в диагонали и «эквивалентной нулевой точкой», — носит более общий характер и может быть распространено на любые измерительные схемы с линейными параметрами.

изменяются, если сопротивление ΔZ мы заменим э. д. с. $\dot{E} = -\dot{I}\Delta Z$ (рис. 2, б). Поэтому при введенном сопротивлении ΔZ ток в любой ветви схемы можно рассматривать как результат наложения на

токи, имевшиеся в цепи до введения ΔZ , токов, вызванных этой э. д. с. Обозначив $\Delta\dot{I}$ и $\Delta\dot{I}_g$ токи, вызванные в ветвях 1 и 2 э. д. с. \dot{E} , получим:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I} + \Delta\dot{I}; & \Delta\dot{I} &= -\frac{\dot{E}}{Z_{aa}}; \\ \dot{I}_g &= \dot{I}_g + \Delta\dot{I}_g; & \Delta\dot{I}_g &= \frac{\dot{E}}{Z_{ag}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь Z_{aa} входное сопротивление схемы по отношению к зажимам a' и a'' ; Z_{ag} — взаимное сопротивление ветвей 1 и 2 (при $\Delta Z = 0$).

$\dot{I} = -\frac{\dot{E}}{\Delta Z}$, и из (1) получим:

$$\frac{\dot{E}}{\Delta Z} = \dot{I} + \frac{\dot{E}}{Z_{aa}}, \text{ откуда } \dot{E} = \dot{I} \frac{\Delta Z \cdot Z_{aa}}{\Delta Z + Z_{aa}}. \quad (2)$$

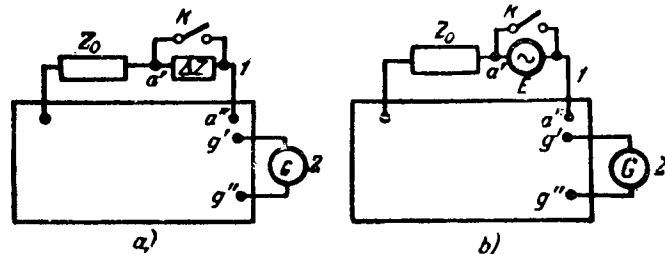


Рис. 2.

Следовательно, введение в ветвь 1 сопротивления ΔZ эквивалентно введению в эту ветвь э. д. с. $\dot{E} = -\dot{I}Z_{окв}$, где \dot{I} — ток, протекавший по этой ветви до введения ΔZ , а $Z_{окв} = \frac{\Delta Z \cdot Z_{aa}}{\Delta Z + Z_{aa}}$ — входное сопротивление схемы по отношению к зажимам $a'a''$ при сопротивлении ΔZ , подключенном к этим зажимам.

Из (1) и (2) получим:

$$\dot{I}_g = \dot{I}_g - \dot{I} \frac{Z_{окв}}{Z_{ag}}. \quad (3)$$

Общность результата не будет ограничена, если положить $\dot{I}_g = 0$, т. е. принять, что при

¹ R. I. Weu. A new Treatment of the Wheatstone Bridge Network, Wireles Engineer, v. XXI, № 250, July 1944.

² Подобная задача в применении к мосту Уитстона была предложена для конкурса по теоретическим основам электротехники проф. К. М. Подивановым в 1944 г. (Литограф. издание МЭИ).

$Z = Z_0$ ($\Delta Z = 0$) схема уравновешена. В этом случае³

$$i_g = -\frac{i'}{Z_{ag}} \cdot \frac{\Delta Z \cdot Z_{aa}}{\Delta Z + Z_{aa}}. \quad (4)$$

3. Найдем чувствительность схемы (тока I_g) к изменению сопротивления Z , т. е. величину

$$\dot{S} = \frac{\partial i_g}{\partial Z}.$$

Дифференцируя выражение (4), получим

$$\dot{S} = \frac{\partial i_g}{\partial Z} = -\frac{i'}{Z_{ag}} \cdot \frac{Z_{aa}^2}{(\Delta Z + Z_{aa})^2}. \quad (5)$$

Полагая в полученном выражении $\Delta Z = 0$, можно определить чувствительность схемы вблизи состояния равновесия \dot{S}_0 — «чувствительность в нулевой точке»:

$$\dot{S}_0 = -\frac{i'}{Z_{ag}}. \quad (6)$$

Подставляем это значение в (4) и (5):

$$i_g = \dot{S}_0 \cdot \frac{\Delta Z \cdot Z_{aa}}{\Delta Z + Z_{aa}}, \quad (7)$$

$$\dot{S} = \frac{\partial i_g}{\partial Z} = \dot{S}_0 \left(\frac{Z_{aa}}{\Delta Z + Z_{aa}} \right)^2. \quad (8)$$

4. Постоянную Z_{aa} можно выразить через другие параметры. Для этого положим $\Delta Z = \infty$. Получающийся при этом ток в ветви 2 обозначим $I_{g\infty}$. Нетрудно видеть, что

$$\begin{aligned} i_{g\infty} &= \lim_{\Delta Z \rightarrow \infty} \left(\dot{S}_0 \cdot \frac{\Delta Z \cdot Z_{aa}}{\Delta Z + Z_{aa}} \right) = \\ &= \lim_{\Delta Z \rightarrow \infty} \left(\dot{S}_0 \cdot \frac{Z_{aa}}{1 + \frac{Z_{aa}}{\Delta Z}} \right) = \dot{S}_0 Z_{aa}, \end{aligned}$$

откуда $Z_{aa} = \frac{i_{g\infty}}{\dot{S}_0}. \quad (9)$

Ток i_g можно представить в виде:

$$i_g = I_{g\infty} \frac{\Delta Z}{\Delta Z + Z_{aa}}. \quad (10)$$

Полученные выражения полностью решают вопрос о зависимости тока i_g от сопротивления Z .

Как видно, для всех схем характер этой зависимости — $i_g = f(Z)$ одинаков и полностью определяется двумя из трех параметров \dot{S}_0 , Z_{aa} , $I_{g\infty}$.

5. Соотношения, аналогичные полученным выше, могут быть установлены и для напряжения между двумя произвольными точками схемы. В частности, если мы обозначим U_g — напряжение у зажимов гальванометра при разрыве

³ Полученная формула (4) дана в ином виде в статье К. М. Поливанова «Теорема вариации параметров линейной электрической цепи», помещенной в настоящем номере. Замена сопротивлений Z_{aa} и Z_{ag} проводимостями $Y_{aa} = \frac{1}{Z_{aa}}$ и $Y_{ag} = \frac{1}{Z_{ag}}$ приводит (4) к виду, тождественному с выражением, данным К. М. Поливановым.

цепи гальванометра, то

$$\dot{U}_g = -i' D_{ag} \frac{Z_{aa}^0 \cdot \Delta Z}{Z_{aa}^0 + \Delta Z}, \quad (11)$$

$$\dot{S}_u = \frac{\partial \dot{U}_g}{\partial Z} = -i' D_{ag} \left(\frac{\dot{Z}_{aa}}{\Delta Z + Z_{aa}} \right)^2. \quad (12)$$

Здесь Z_{aa}^0 — входное сопротивление схемы по отношению к зажимам a' и a'' при разомкнутой цепи гальванометра; D_{ag} — коэффициент, равный напряжению, вызываемому на зажимах гальванометра единичной э. д. с., введенной в ветвь 1; \dot{S}_u — чувствительность схемы по напряжению.

Обозначая \dot{S}_{u0} — чувствительность по напряжению вблизи состояния равновесия, получим далее:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{u0} &= \left[\frac{\partial U_g}{\partial Z} \right]_{\Delta Z=0} = -i' D_{ag}; \\ \dot{U}_g &= \dot{S}_{u0} \frac{\Delta Z \cdot \dot{Z}_{aa}}{\Delta Z + Z_{aa}^0}, \\ \dot{U}_{g\infty} &= \dot{S}_{u0} \cdot Z_{aa}^0 \text{ и } \dot{U}_g = \dot{U}_{g\infty} \frac{Z_{ca}^0}{\Delta Z + Z_{aa}^0}. \end{aligned} \right\} (13)$$

Согласно теореме Тевенена

$$i_g = \frac{\dot{U}_g}{Z_g + Z_{gg}},$$

где Z_g — сопротивление гальванометра; Z'_{gg} — входное сопротивление схемы по отношению к зажимам гальванометра.

Следовательно,

$$\dot{S} = \frac{\partial i_g}{\partial Z} = \frac{\frac{\partial U_g}{\partial Z} (Z_g + Z_{gg}) - U_g \frac{\partial}{\partial Z} (Z_g + Z_{gg})}{(Z_g + Z_{gg})^2}.$$

При $Z = Z_0$ ($\Delta Z = 0$) имеем:

$$\dot{U}_g = 0 \left[\frac{\partial U_g}{\partial Z} \right]_{\Delta Z=0} = S_{u0} \text{ и } Z_{gg} = Z_{gg}^0.$$

Следовательно,

$$\dot{S}_0 = \frac{S_{u0}}{Z_g + Z_{gg}^0}. \quad (14)$$

Z_{gg}^0 — значение сопротивления Z_{gg} при равновесии схемы ($\Delta Z = 0$).

6. При вычислении постоянных измерительной схемы, особенно мостовой, часто удобно воспользоваться соотношениями, дающими зависимость постоянных от изменения отдельных сопротивлений схемы.

Выделим в произвольной схеме три ветви 1, 2 и 3 (рис. 3). Определим, как влияет введение сопротивления ΔZ в ветвь 3 на $Y_{aa} = \frac{1}{Z_{aa}}$ — входную проводимость схемы по отношению к зажимам $a'a''$ (в ветви 1) и на взаимные проводимости ветвей 1 и 2 — $Y_{ab} = \frac{1}{Z_{ab}}$ и ветвей 1 и 3 $Y_{ac} = \frac{1}{Z_{ac}}$.

Предположим, что в схеме действует только одна э. д. с. \dot{E} , включенная в ветвь 1. Токи, вызванные ею в ветвях 1, 2 и 3 при $\Delta Z = 0$ (ключ K замкнут), обозначим соответственно \dot{I}_a , \dot{I}_b , \dot{I}_c ; токи в тех же ветвях при введенном

сопротивления ΔZ (ключ K разомкнут) обозначим $\dot{I}'_a, \dot{I}'_b, \dot{I}'_c$, а значения входной и взаимных проводимостей $Y''_{aa}, Y''_{ab}, Y''_{ac}$.

Имеем $\dot{I}'_b = \dot{E} Y'_{ab}$; $\dot{I}'_c = \dot{E} Y'_{ac}$, и после преобразования с помощью уравнений (3) (4) получим⁴:

$$\Delta Y_{ab} = Y''_{ab} - Y'_{ab} = -\frac{Y'_{ac}}{Z'_{cb}} \cdot \frac{\Delta Z \cdot Z'_{cc}}{\Delta Z + Z'_{cc}} \quad (15)$$

Аналогично:

$$\Delta Y_{ac} = Y''_{ac} - Y'_{ac} = -\frac{Y'_{ac}}{Z'_{cc}} \cdot \frac{\Delta Z \cdot Z'_{cc}}{\Delta Z + Z'_{cc}} \quad (16)$$

и

$$\begin{aligned} \Delta Y_{aa} &= Y''_{aa} - Y'_{aa} = -\frac{Y'_{ac}}{Z'_{ac}} \cdot \frac{\Delta Z \cdot Z'_{cc}}{\Delta Z + Z'_{cc}} = - \\ &= -Y'^2_{ac} \frac{\Delta Z \cdot Z'_{cc}}{\Delta Z + Z'_{cc}} \end{aligned} \quad (17)$$

При $\Delta Z = \infty$ (размыкание ветви 3)

$$\Delta Y_{ab} = -\frac{Y'_{ac}}{Z'_{cb}} \cdot Z'_{cc}; \quad \Delta Y_{ac} = -Y'_{ac}$$

и

$$\Delta Y_{aa} = -Y'^2_{ac} \cdot Z'_{cc}$$

Размыкая сначала ветвь 3 (при э. д. с. E в ветви 1), а затем ветвь 1 (при замкнутой ветви 3 и э. д. с. только в ветви 3), получим:

$$\Delta Y_{aa} = -Y'^2_{ac} \cdot Z'_{cc} \quad \text{и} \quad \Delta Y'_{cc} = -Y'^2_{ca} \cdot Z'_{aa}$$

Так как

$$Z'_{cc} = \frac{1}{Y'_{cc}}, \quad Z'_{aa} = \frac{1}{Y'_{aa}} \quad \text{и} \quad Y'_{ac} = Y'_{ca}$$

то

$$\Delta Y_{aa} \cdot Y'_{cc} = \Delta Y'_{cc} \cdot Y'_{aa}, \quad \text{откуда} \quad \frac{\Delta Y_{ca}}{Y'_{aa}} = \frac{\Delta Y'_{cc}}{Y'_{cc}}$$

т. е. в произвольной цепи относительное изменение входной проводимости со стороны ветви 1 при размыкании ветви 3 равно относительному изменению входной проводимости со стороны ветви 3 при размыкании ветви 1.

7. Найдем зависимость основных параметров измерительной схемы S_0 и Z_{aa} [см. формулу (7)] от сопротивления ветви питания (ветвь Π) и ветви измерительного прибора (ветвь g).

Ограничимся рассмотрением лишь мостовых схем, играющих особо важную роль в измерительной технике. Как известно, при равновесии мостовой схемы изменение э.д.с. источника тока (также любые изменения сопротивления ветви, в которую он заключен) не вызывают изменения тока в ветви, в которую включен измерительный прибор (индикатор), т. е. взаимная проводимость ветви питания и ветви индикатора равна нулю. Наличие в схеме двух ветвей, взаимная проводимость которых равна нулю при определенном соотношении между параметрами схемы («условии равновесия») и отличие от нуля при отсутствии этого соотношения, является характерным и необходимым свойством всех мостовых схем.

Обозначим (рис. 4) Z_n —сопротивление ветви питания, Z_g —сопротивление ветви индикатора;

⁴ Уравнение (15) тождественно «Теореме вариации для проводимостей», данной в названной выше статье К. М. Поливанова.

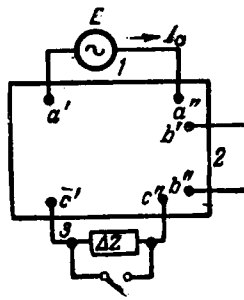


Рис. 3.

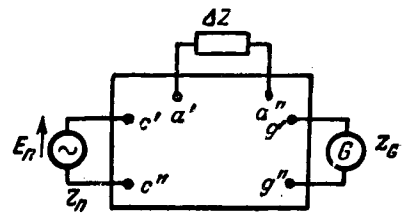


Рис. 4.

S_0 —нулевая чувствительность схемы к изменению сопротивления Z в ветви a .

Входные и взаимные проводимости будем обозначать буквами Z и Y с индексами, причем индекс n будет обозначать ветвь питания; a —ветвь изменяемого сопротивления; g —ветвь индикатора.

Под $S_0^{(n,g)}, Z^{(n,g)}, Y^{(n,g)}$ и т. п.—надо понимать чувствительность, сопротивления и проводимости схемы при $Z_n = 0, Z_g = 0$; $S_0^{(g)}, Z^{(g)}, Y^{(g)}$ —те же величины при $Z_n \neq 0, Z_g = 0$. $S_0^{(n)}, Z^{(n)}, Y^{(n)}$ при $Z_n = 0, Z_g \neq 0$.

Считая, что в исходном состоянии ($\Delta Z = 0$) схема уравновешена, отметим, что $Z_{na} = \frac{1}{Y_{na}}$

и $Z_{nn} = \frac{1}{Y_{nn}}$ не зависят от Z_g , а $Z_{ag} = \frac{1}{Y_{ag}}$ и

$Z'_{gg} = \frac{1}{Y'_{gg}}$ не зависят от Z_n , т. е. $Z_{na}^{(n,g)} = Z_{na}^{(g)}$

$Z_{nn}^{(n,g)} = Z_{nn}, Z_{ga}^{(n,g)} = Z_{ga}^{(n)}, Z'_{gg}^{(n,g)} = Z'_{gg}$.

Согласно предыдущему [см. формулу (6)]

$$S_0^{(g,n)} = -\frac{I^{(ng)}}{Z^{(g,n)}} = -I^{(n,g)} Y_{ag}^{(n,g)}, \quad (18)$$

где $I^{(n,g)}$ —ток в ветви a при $Z_n \neq 0, Z_g = 0$ и равновесии схемы, и

$$S_0 = -I \cdot Y_{ag}$$

Нетрудно видеть, что

$$I' = I^{(n,g)} \frac{Z_{nn}}{Z_n + Z_{nn}}$$

(э. д. с. источника тока предполагается не меняющейся), и согласно (16)

$$Y_{az} = Y_{ag}^{(g)} \frac{Y_{ag}}{Z'_{gg}} \cdot \frac{Z_g Z_{gg}}{Z_g + Z'_{gg}} = Y_{ag}^{(g)} \frac{Z_{gg}}{Z_g + Z'_{gg}}$$

Подставляем эти значения в (18):

$$S_0 = -j^{(ng)} \frac{Z_{nn}}{Z_n + Z_{nn}} \cdot Y_{ag}^{(g)} \frac{Z_{gg}}{Z_g + Z'_{gg}},$$

откуда

$$\dot{S}_0 = \dot{S}_0^{(n,g)} \frac{Z_{aa}}{Z_a + Z_{aa}} \cdot \frac{Z_{gg}}{Z_g + Z'_{gg}} \quad (19)$$

Для $Y_{az} = \frac{1}{Z_{aa}}$ согласно (17) получим следующее выражение:

$$Y_{aa} = Y_{aa}^{(n,g)} - Y_{ng}^{(n,g)} \frac{Z_a Z_{aa}}{Z_a + Z_{aa}} - Y_{cg}^{(n,g)} \frac{Z_g Z'_{gg}}{Z_g + Z'_{gg}} \quad (20)$$



Питание разомкнутых электрических сетей по схеме независимых нитей

Кандидат техн. наук, доц. В. Г. ХОЛМСКИЙ

Киевский политехнический институт

При расчете разомкнутых сетей с несколькими нагрузками пользуются обычно методами, имеющими исходным условием постоянство сечения, постоянство плотности тока или минимум проводникового металла.

Первые два метода с точки зрения затраты проводникового материала теоретически эквивалентны. Расчет на минимум дает экономию металла, зависящую от соотношений нагрузок и длин участков сети. В частных случаях эта экономия может быть весьма невелика и практически даже равна нулю. Значительно больший эффект может дать сооружение сети по схеме независимых нитей, по которой к каждой нагрузке подводится от питательного пункта отдельная линия, и все линии рассчитываются на полную потерю напряжения.

На рис. 1 показаны схемы сети в обычном исполнении и в виде независимых нитей. На схемах показаны активные нагрузочные и линейные мощности, длины участков и расстояния от питательного пункта до отдельных нагрузок. Нагрузки приняты в kW и длины в км.

В статье рассматривается расчет разомкнутых электрических сетей по потере напряжения. Показано, что расход проводникового металла резко уменьшается при питании сети по схеме независимых нитей, при которой к каждому потребителю подводится отдельная линия, рассчитанная на полную потерю напряжения. Приведены формулы для определения экономии металла при расчете на минимум и по предложенной схеме. Исследовано влияние соотношения нагрузок и их расположения на величину экономии металла для сети, питающей две нагрузки.

Считая потерю напряжения во всех случаях одинаковой и положив в основу сравнения расход металла при выполнении сети проводом постоянного сечения, легко показать, что относительная теоретическая экономия металла при расчете на минимум Δv_1 и по схеме независимых нитей Δv_2 соответственно представится выражениями

$$\Delta v_1 \% = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-1} \sum_{k=i+1}^{k=n} l_i l_k \left(\frac{P_i + P_k}{2} - \sqrt{P_i \cdot P_k} \right)}{L_n \sum_{i=1}^{i=n} l_i P_i} 100, (1)$$

$$\Delta v_2 \% = \frac{\sum_{i=1}^{i=n-1} P_i L_i (L_n - L_i)}{L_n \sum_{i=1}^{i=n} L_i P_i} 100. (2)$$

Если нагрузки сети заданы в токах, то в выражениях (1) и (2) следует подставить вместо мощностей значения активных токов. Действительная экономия может несколько отличаться от теоретической за счет округления сечений. Для сетей,

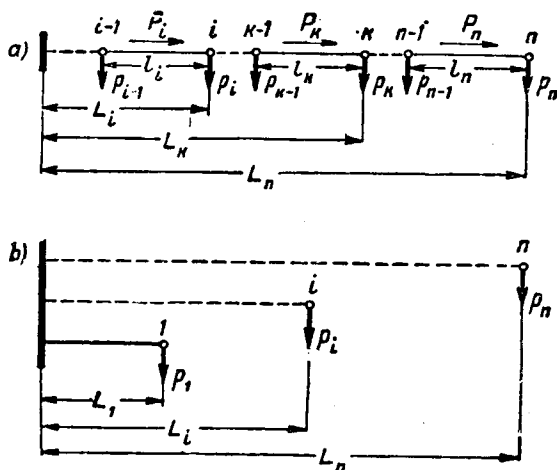


Рис. 1.

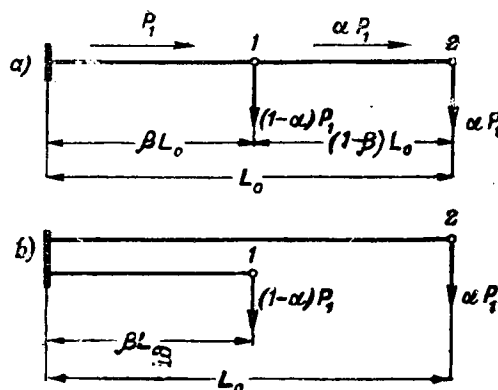


Рис. 2.

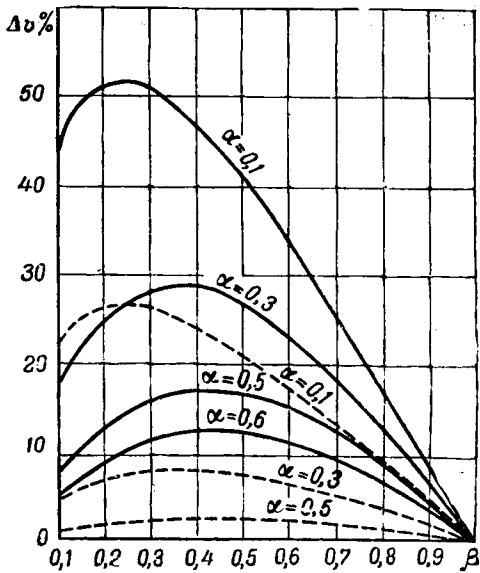


Рис. 3.

рассчитываемых с учетом реактивных сопротивлений, экономия при переходе к независимым нитям резко возрастает за счет расщепления сети, позволяющего увеличить допустимую активную составляющую потери напряжения. Выражение (2) в этом случае дает нижний предел экономии.

Влияние соотношений между нагрузками и их расположения на величину экономии можно проследить на примере простейшей сети, представленной в двух исполнениях на рис. 2. На схемах все мощности выражены в долях от линейной мощности первого участка, а длины — в долях от полной длины сети. В этом случае из выражения (1) и (2) получим:

$$\Delta v_1\% = \frac{\beta(1-\beta)(1+\alpha-2\sqrt{\alpha})}{\alpha-\alpha\beta+\beta} 100 \quad (1a)$$

$$\Delta v_2\% = \frac{\beta(1-\beta)(1-\alpha)}{\alpha-\alpha\beta+\beta} 100. \quad (2a)$$

На рис. 3 показаны графики изменения экономии в зависимости от коэффициентов α и β . Сплошные кривые соответствуют расчету по схеме независимых нитей, а пунктирные — расчету на минимум металла. Из выражения и графиков видно, что экономия растет с уменьшением α . Для $\alpha > 0,3$ расчет на минимум уже не дает ощутительной экономии. При независимых нитях экономия превышает 10% даже при $\alpha=0,6$. Каждому значению α соответствует некоторое оптимальное значение β , при котором получается наибольшая экономия. Это значение β одинаково для обоих методов и определяется выражением:

$$\beta_{opt} = \frac{\sqrt{\alpha-\alpha}}{1-\alpha} \quad (3)$$

β_{opt} растет с увеличением α , асимптотически приближаясь к 0,5. Для более сложных сетей можно сделать общий вывод, что экономия металла тем значительнее, чем большими являются промежуточные нагрузки по сравнению с концевой, осо-

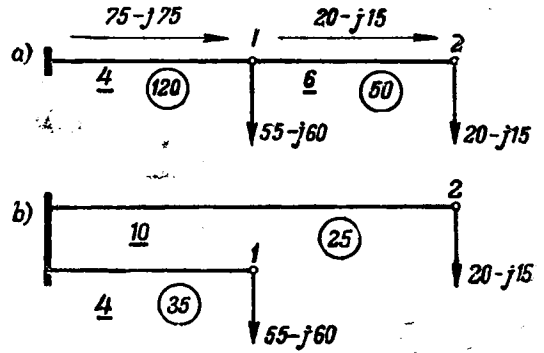


Рис. 4.

бенно если они сосредоточены во второй четверти сети, считая от питательного пункта. В разветвленных сетях имеет смысл питать независимой нитью нагрузку в точке разветвления, если эта нагрузка достаточно велика, и расстояние от нее до питательного пункта лежит в пределах 0,2—0,7 от общей длины сегмента.

При сооружении сети по схеме независимых нитей облегчается регулирование напряжения, так как при этом все потребители оказываются в одинаковых условиях в смысле режима напряжений. В ряде случаев это позволяет увеличить допустимую потерю напряжения, так как отпадает опасность чрезмерного повышения напряжения у ближайших к питательному пункту потребителей. Увеличение допустимой потери напряжения наряду с расщеплением сети позволит шире применять стальные провода.

Предполагая, что все нити имеют общий выключатель, можно считать все же надежность предлагаемой схемы выше обычной потому, что при обрыве линии длительный простой будет только у одного потребителя. В ряде случаев таким путем можно создать систему, почти не уступающую по надежности питания системе с двойными линиями при значительно меньших затратах аппаратуры и металла.

Схема независимых нитей применима преимущественно в воздушных сетях. Ее недостатком является перерасход на изоляторы, штыри и траверзы, но он в большинстве случаев оправдывается экономией цветного металла. Перерасхода на опоры можно часто избежать благодаря резкому уменьшению суммарного сечения проводов.

При работе по данной схеме возрастают потери мощности. Однако в сетях данного типа экономические сечения всегда меньше сечений, обусловленных потерей напряжения. Уменьшая сечения, мы только приближаемся к экономическим сечениям.

Число независимых нитей может быть и меньше числа нагрузок, которые можно сгруппировать наиболее удобным образом и в пределах каждой группы вести расчет обычными методами. В заключение приведем результаты расчетов для двух числовых примеров.

Пример 1. Сеть, рассчитанная на постоянное сечение и минимум металла в книге проф. А. А. Глазунова „Электрические сети и системы“ (ч. I, стр. 140), была пересчитана по схеме независимых

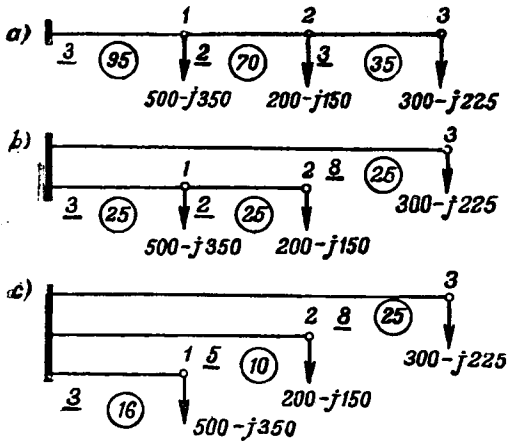


Рис. 5.

нитей. Схемы сети показаны на рис. 4. Нагрузки даны в амперах $U_n=10kV$, $\Delta u=500 V$. Материал проводов—алюминий, расстояние между ними 1 м.

Теоретическая экономия металла при расчете на минимум согласно выражению (1) будет:

$$\Delta v_1 \% = \frac{I_1 I_2 (I_{a1} + I_{a2} - 2\sqrt{I_{a1} I_{a2}})}{L_2 (I_1 I_{a1} + I_2 I_{a2})} 100 = \frac{4 \cdot 6(75 + 20 - 2\sqrt{75 \cdot 20})}{10(4 \cdot 75 + 6 \cdot 20)} 100 = 10\%.$$

Так как сеть рассчитывается с учетом реактивных сопротивлений, то при включении ее по схеме независимых нитей можно написать:

$$\Delta v_2 \% \geq \frac{i_{a1} L_1 (L_2 - L_1)}{L_2 (L_1 i_{a1} + L_2 i_{a2})} 100 \geq \frac{55 \cdot 4 (10 - 4)}{10(4 \cdot 55 + 10 \cdot 20)} \geq 31,4\%.$$

Как показано в книге проф. А. А. Глазунова, при расчете на постоянное сечение необходимо применить провод А-95. Сечения при расчетах на минимум металла и по схеме независимых ни-

тей нанесены на рисунке. Приняв данные о весе проводов согласно ОСТ 5363, получим, что действительная экономия металла составит соответственно 19,2 и 60%. Действительная экономия при расчете на минимум получается больше теоретической, так как при округлении постоянного сечения его пришлось значительно увеличить.

Пример 2. Была рассчитана воздушная сеть, представленная на рис. 5. Нагрузки заданы в виде мощностей $U_n = 6 kV$. $\Delta u = 420 V$. Материал проводов—медь, расстояния между ними 1 м. Теоретическая экономия металла в этом случае будет: $\Delta v_1 \% = 6,28\%$ и $\Delta v_2 \% > 26,8\%$. Расчет сети был произведен для ряда вариантов, показатели которых приведены в таблице.

Для одноцепной линии провода постоянного сечения необходимо взять марки М-70, а для двухцепной—марки 2ХМ-25. Сечения в остальных случаях показаны на рисунках.

Варианты сооружения сети	Максимальная потеря на нагрев, %	Абсолютный расход меди, кг	Экономия меди, %
Одноцепная линия постоянного сечения	425	15 024	—
Расчет на минимум меди	427	14 220	5,35
Двухцепная линия постоянного сечения	419	10 656	29,1
Комбинированное решение	426	8 658	12,9
По схеме независимых нитей	411	7 953	17,0

Конструктивно наиболее удобным является комбинированное решение с разбивкой потребителей на две группы. Из сравнения его с обычным двухцепным вариантом весьма отчетливо выступают преимущества схемы независимых нитей, поскольку по этой схеме оказывается возможным для питания крайнего потребителя применить одноцепную линию вместо двухцепной, с проводами той же марки, сэкономив тем самым 3 км линии М-25.



Расчет тока и времени плавления гололеда на линиях электропередачи

Доктор техн. наук, проф. В. В. БУРГСДОРФ

Тбилисский научно-исследовательский гидроэнергетический институт

Плавление гололеда и изморози электрическим током является одним из наиболее эффективных и экономичных способов

борьбы с гололедно-изморозевыми образованиями на линиях электропередачи. Однако расчет токов и времени плавки не является достаточно ясным. Некоторые авторы ограничиваются рекомендацией соответствующих плотностей тока [Л. 1], другие ориентируются на конечную температуру провода, освободившегося от осадка [Л. 2].

Более полно вопрос был рассмотрен в Америке Климом [Л. 3], и в работе Донэнерго [Л. 4] были предложены специальные формулы. Опыт их применения показывает, однако, что формулы дают значительно преуменьшенные цифры против действительных значений. Формулы имеют тот недостаток, что ими не учтено тепло на нагрев гололедного или изморозевого цилиндра, без чего плавка вообще не может начаться. Весьма приближенно исследуется вопрос и в более поздних работах [Л. 5, 6]. Мы вынуждены были поэтому произвести детальный анализ задачи.

Теплоотдача в окружающей среде. Анализ сложного теплового поля провода, покрытого слоем льда, в движущейся среде представляет очень большие трудности ввиду непрерывно возрастающего эксцентриситета провода относительно гололедной муфты в процессе нагрева. Точное решение требует применения метода ступенчатого интегрирования при каждом расчете [Л. 7]. Рекомендовать такой прием для инженерной практики, очевидно, не приходится, тем более, что согласно произведенному ТНИСГЭИ анализу (В. М. Несберггом) теплоотдача меняется сравнительно мало в зависимости от эксцентриситета до того момента, пока провод не оказывается около наружной поверхности гололедной муфты. При таком положении, однако, наступает излом. Кроме того, повышенная теплоотдача при эксцентриситете компенсируется пониженным рассеянием тепла в начальный период нагрева.

Изложены основы расчета токов и времени плавления гололеда и изморози на линиях электропередачи; приведены расчетные формулы и методика определения теплоотдачи с проводов с учетом конвекции и излучения.

Все это дает основные сохранившие коаксиальную схему расчета. В этом случае тепловое сопротивление муфты с

наружным диаметром D и внутренним d в тепловых омах на 1 м длины

$$R_{то} = \frac{\log \frac{D}{d}}{273 \lambda} \quad (1)$$

Коэффициент теплопроводности льда λ принимается обычно равным $2,27 \cdot 10^{-2} \text{ W/cm}^\circ\text{C}$. Для изморози с объемным весом γ по аналогии со снегом

$$\lambda = (2,1 + 42 \gamma + 216 \gamma^3) 10^{-4} \quad (2)$$

Теплоотдачу в окружающую среду целесообразно анализировать методами гидродинамической теории теплообмена¹, в выражая теплопередачу в виде зависимости между критериями подобия Нуссельта (Nu) и Рейнольдса (Re) или Пекле (Pe). Для воздуха $Re = 1,42 Pe$, и, следовательно, безразлично, какой из критериев положить в основу. Нами в дальнейшем использован критерий Пекле. Выражая физические постоянные воздуха по принятым в США зависимостям от абсолютной температуры T , получим:

$$Nu = \frac{2,94 \cdot 10^3 c d}{T^{0,751}} \quad (3)$$

и

$$Pe = \frac{1,05 \cdot 10^3 \omega d p}{T^{1,751}} \quad (4)$$

где a — коэффициент теплопередачи в W/cm^2 ; p — давление в атмосферах; ω — скорость воздуха в cm/sec .

Выбор расчетной температуры T весьма сложен. Эта величина не является постоянной для слоев воздуха, участвующих в теплопередаче, и уменьшается по мере их удаления от нагреваемого тела. Повидимому, расчетная температура является весьма сложной функцией температуры провода и окружающей среды [Л. 8].

¹ Такая методология позволит обобщить результаты измерений, проведенных в самых различных условиях.

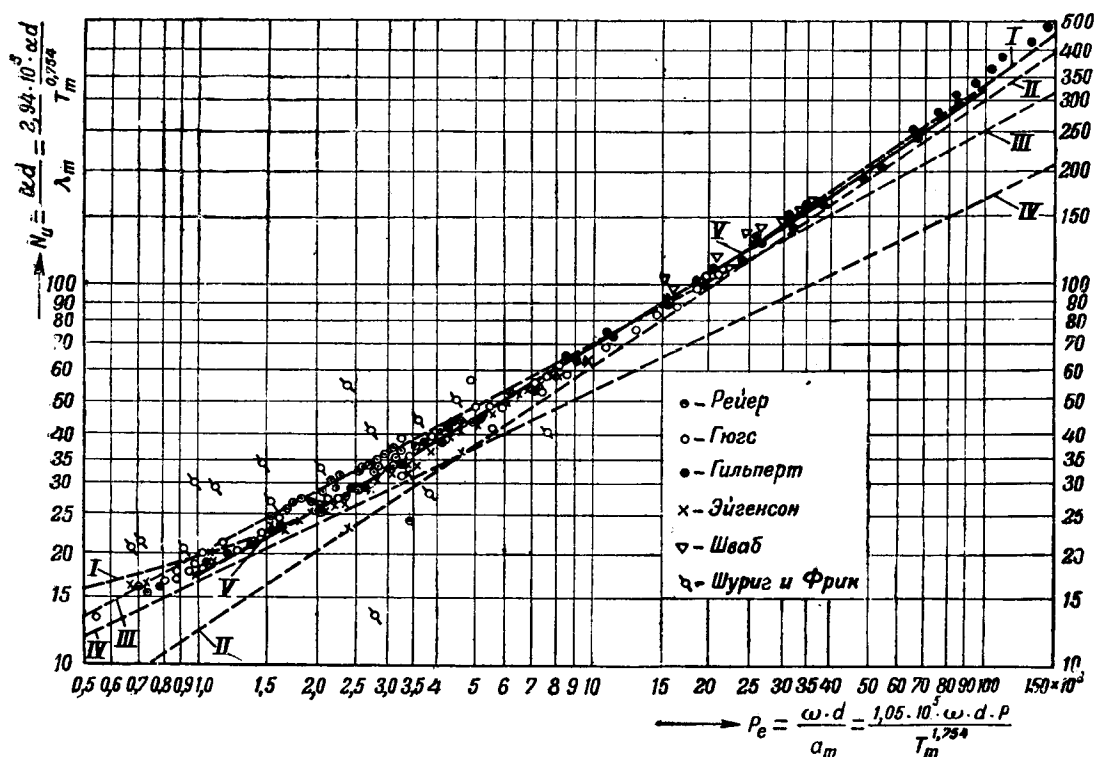


Рис. 1. Зависимость между кривыми Нуссельта и Пекле для горизонтального гладкого цилиндра в воздухе. I—по Нуссельту $[Nu = 0,086 (90 + Pe)^{0,716}]$, опытные данные Гюгса; II—Шак и Румель $[Nu = 6,61 \cdot 10^{-3} T_m^{0,474} \cdot Pe^{0,71}]$; III—Тен-Бош $[Nu = 0,39 Pe^{0,56}]$ опытные данные Рейера и Гюгса; IV—Шуриг и Фрик $[Nu = 0,52 \sqrt{Pe}]$; V—ТНИСГЭИ $[Nu = 3 + 0,145 \sqrt[3]{Pe^2}]$. Опытные данные Гюгса, Гильперта, Эйгенсона.

По этой причине обычно исходят из упрощающих предположений. Расчетная температура нами была принята равной температуре стенки ($T = T_1$). Такое допущение имеет определенные преимущества чисто расчетного характера применительно к нашим задачам².

Результаты измерений ряда исследователей, а также кривые, рассчитанные по некоторым распространенным формулам, после приведения к безразмерным величинам, представлены на рис. 1. Как видно, наибольшие расхождения с опытными данными дают формулы Шурига и Фрика [Л. 9], а также Шака и Руммеля [Л. 10], т. е. именно те, на которых базировались выводы Клима и работников Донэнерго при определении токов плавления. Вместе с тем, большинство опытных точек вполне удовлетворительно группируется в определенной области. Исключение составляют опытные данные тех же авторов Шурига и Фрика, дающие очень значительный разброс. Объясняется это, очевидно, тем, что Шуриг и Фрик экспериментировали на открытом воздухе, где меняющаяся скорость ветра не позволяет сделать точный отсчет. Остальные авторы производили опыты в аэродинамических трубах. Очевидно, материалы Шурига и Фрика следует исключить из дальнейшего рассмотрения³.

Наиболее тщательные опыты были поставлены Гильпертом и Эйгенсом, которые при-

меняли специальные меры для предотвращения повышенной турбулентности воздуха в трубе [Л. 11, 12]. Эти данные и были положены в основу.

Интересующий нас практический диапазон лежит в довольно широкой области значений Пекле, от примерно 1 000 до 70 000 ($D = 3 - 12$ см, $v = 0,5 - 10$ м/сек, $T = 270^\circ$ К).

При помощи графоаналитического метода была подобрана расчетная зависимость, достаточно хорошо совпадающая с опытными точками (рис. 1) и удобная для работы с логарифмической линейкой в отличие от формул, предложенных, например, Нуссельтом и Тен-Бошем, где входят сложные степенные зависимости.

Уравнение имеет вид:

$$Nu = 3 + 0,145 \sqrt[3]{Pe^2}. \quad (5)$$

После простых преобразований получаем:

$$W_k = \frac{7,42}{T_1^{0,415}} \left[4,2 \cdot 10^{-4} T_1^{1,17} + \sqrt[3]{(vdp)^3} \right] \quad (6)$$

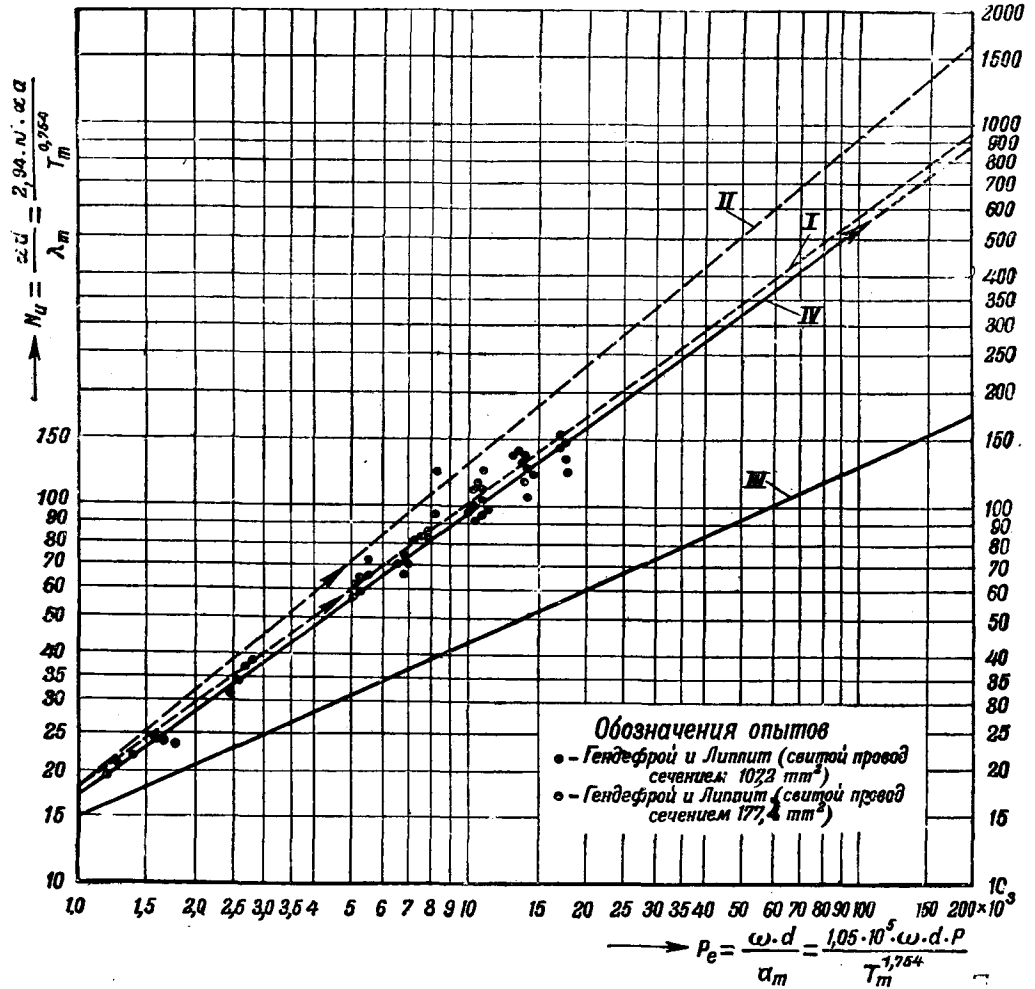
Приведенная формула справедлива для гладких цилиндрических поверхностей и применима лишь для чисто гололедных отложений.

В случае изморози и витых проводов наличие шероховатой поверхности значительно увеличивает теплоотвод. Экспериментальные данные для шероховатых поверхностей показаны на рис. 2. Там же нанесены зависимости, данные Рейером на основе экспериментов с трубами при 12 продольных канавках на их поверхности (опыты были проведены для небольших значений критерий Pe и потому на рис. 2 не показаны) и кривая по формуле Шурига и Фрика для проводов на открытом воздухе, дающая резкое расхождение с экспериментом.

² Часто задается температура провода, в то время как метеорологические условия меняются в широких пределах.

³ Тот факт, что в электротехнике наибольшее распространение получили расчеты, основывающиеся на работах Шурига и Фрика, характеризует недостаточную ясность того вопроса до настоящего времени. Эта практика требует скорейшего пересмотра.

Рис. 2. Зависимость между критериями Нуссельта и Пекле для горизонтального шероховатого цилиндра в воздухе. I — по Рейтеру (шероховатость образована 12 гладкими продольными канавками ($Nu = 0,105 Pe^{0,747}$); II — Рейтер (шероховатость образована 12 ребристыми продольными канавками, $Nu = 0,0495 Pe^{0,865}$); III — Шуриг и Фрик ($Nu = 0,52 \sqrt{Pe}$); IV — ТНИСГЭИ ($Nu = 0,0975 \sqrt[3]{Pe^3}$). Опытные данные Гендефрой и Липпиг.



Удовлетворительно совпадает с опытными точками формула Рейтера, однако она содержит дробную степенную зависимость и неудобна для расчетов. Поэтому были подобраны коэффициенты для уравнения, удовлетворяющего условию удобства расчетов и результатам опытов⁴

$$Nu = 0,0975 \sqrt[3]{Pe^3} \quad (7)$$

или

$$W_k = \frac{19,3}{T_1^{0,562}} \sqrt[3]{(vdp)^3} \quad (8)$$

Приведенными формулами можно пользоваться при углах атаки ветра к проводам от 60 до 90° [Л. 13]. При меньших углах теплоотдача уменьшается и плавка должна пойти несколько быстрее.

В случае овальных и эллипсоидальных отложений следует принимать расчетный диаметр равным среднему геометрическому из наибольшего и наименьшего диаметра овала.

Для определения теплоотода радиацией можно воспользоваться известной формулой Стефана-Больцмана:

$$W_{\text{л}} = 5,76 \epsilon_{\text{л}} \left[\left(\frac{T_1}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{1000} \right)^4 \right], \quad (9)$$

где $\epsilon_{\text{л}}$ — постоянная лучеиспускания.

⁴ Подбор был произведен научным сотрудником института В. М. Несберггом.

При расчетах проводов радиация составляет сравнительно небольшую долю от теплоотдачи конвекцией и с достаточной точностью можно положить:

$$T_1^4 - T_2^4 = 4kT_1^3 \Delta t_1. \quad (10)$$

Коэффициент k при значениях Δt меньше 10 — 20° можно принимать равным единице, при более значительных перегревах, вплоть до 70°, можно считать $k=0,8$. В нашем случае перегревы невелики. Учтя это обстоятельство и пересчитывая на погонный метр провода, получаем:

$$W_{\text{л}} = 7,24 \epsilon_{\text{л}} d \left(\frac{T_1}{1000} \right)^3 \Delta t_1. \quad (11)$$

В соответствии с предварительными расчетами в среднем можно принять $T_1 = 268^\circ \text{K}$ для гололеда и $T_1 = 265^\circ \text{K}$ для изморози. Подставляя эти значения температуры и $1 \epsilon_{\text{л}} = 0,64$ для гололеда и 0,3 для изморози, получаем окончательные формулы для сопротивления теплопереходу с гололедной муфты в окружающую среду на 1 м длины для гололеда:

$$R_{T1} = \frac{\Delta t_1}{W_{\text{к}} + W_{\text{л}}} = \frac{1}{0,09D + 0,223 + 0,73 \sqrt[3]{(VD)^3}} \quad (12)$$

для изморози:

$$R_{T1} = \frac{\Delta t}{W_{\text{к}} + W_{\text{л}}} = \frac{1}{0,04D + 0,84 \sqrt[3]{(V-D)^3}} \quad (13)$$

Полная мощность, отдаваемая в окружающую среду при температурном перепаде между проводом и воздухом Δt_3 , будет:

$$W = \frac{\Delta t_3}{R_{T_0} + R_{T_1}} \quad (14)$$

В тихую погоду расчет теплоотдачи рекомендуется делать, полагая $v = 0,5$ м/сек.

Тепло, затрачиваемое на плавление ссадка и нагрев гололедно-изморозевой муфты. Проведенные эксперименты по плавлению гололеда показали, что ширина выплавленной канавки превышает диаметр провода. Аналогичное явление наблюдалось и другими исследователями [Л. 4]. По нашим данным это увеличение составляет примерно 10%.

Если полагать объемный вес осадка равным γ , то вес выплавленной части на 1 м при толщине стенки b будет:

$$G = 110 \cdot \gamma db \quad (15)$$

Энергия, затрачиваемая на расплавление канавки, будет⁵ (в Wh):

$$A_n = 10 \cdot \gamma db \quad (16)$$

Начальная температура муфты близка к температуре воздуха t_2 .

В процессе нагрева цилиндрический слой с диаметром D_x и толщиной $\frac{d\delta}{2}$ приобретает некоторую отличную температуру t_x .

При этом он поглощает тепло:

$$dA_n = \pi D_x \gamma c_0 (t_x - t_0) \frac{d\delta}{2}, \quad (17)$$

где c_0 — удельная теплоемкость, равная $5,8 \times 10^{-4}$ Wh/g °C.

Полное количество тепла, поглощенное муфтой,

$$A_n = \frac{\pi \gamma c_0}{2} \int D_x (t_x - t_0) d\delta. \quad (18)$$

Так как для осуществления плавления температура на поверхности провода должна равняться нулю, то температура слоя с диаметром D_x будет:

$$t_x = t_1 \frac{\ln \frac{D_x}{d}}{\ln \frac{D}{d}} \quad (19)$$

Откуда после небольших преобразований находим:

$$A_n = \frac{\pi \gamma c_0}{4} d^2 \left[\left(\frac{D}{d} \right)^3 - 1 \right] \left[-t_2 + t_1 \left(1 + \frac{1}{\frac{D^2}{d^2} - 1} - \frac{1}{2 \ln \frac{D}{d}} \right) \right]. \quad (20)$$

Имея в виду, что величина $\frac{D^2}{d^2} \gg 1$, а температура провода при плавке равна нулю и, следовательно, $t_2 = -\Delta t$, $t_1 = -\Delta t_0$, получаем окончательно на 1 м длины:

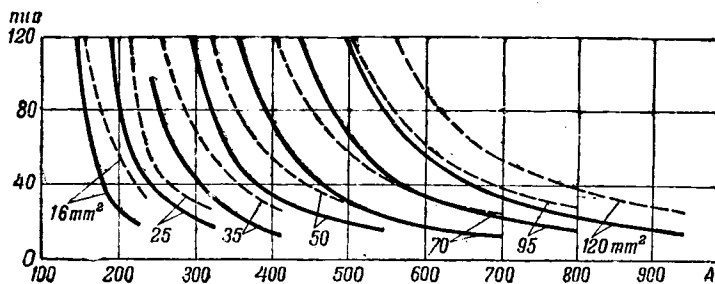


Рис. 3. Время плавления гололеда для медных проводов различного сечения в зависимости от тока при температуре воздуха -5°C и скорости ветра $5 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ (сплошные кривые для диаметра гололедной муфты равного 5 ст, пунктирные — для диаметра муфты 7,5 ст.,

$$A_n = 0,045 \gamma D^3 \frac{\Delta t}{R_{T_0} + R_{T_1}} \left(R_{T_1} + 0,22 \frac{R_{T_0}}{\lg \frac{D}{d}} \right). \quad (21)$$

В последнем выражении учтено, что

$$\frac{\Delta t_0}{R_{T_0}} = \frac{\Delta t_1}{R_{T_1}} = \frac{\Delta t}{R_{T_0} + R_{T_1}}.$$

Полученные зависимости позволяют определить энергию, необходимую для плавления гололедно-изморозевых образований на линиях. Требуемая для этого энергия должна, очевидно, равняться выделяемой электрическим током. Таким образом получаем окончательную расчетную формулу:

$$I^2 R_l \tau = \frac{\Delta t}{R_{T_0} + R_{T_1}} \tau + 10 \gamma ab + \frac{0,045 \gamma D \Delta t}{R_{T_0} + R_{T_1}} \left(R_{T_1} + 0,22 \frac{R_{T_0}}{\lg \frac{D}{d}} \right), \quad (22)$$

где I — ток плавки в А, R — электрическое сопротивление 1 м провода при 0°C в Ω .

В качестве характеристики получающихся соотношений на рис. 3 представлены кривые токов плавки в зависимости от времени для ряда марок проводов при средних погодных условиях: $t_2 = 5^\circ\text{C}$ и $v = 5$ м/сек.

С целью проверки предлагаемых формул был произведен ряд опытов в холодильной камере и на линиях электропередачи. Получающаяся погрешность лежит в пределах $\pm 5\%$. Если же использовать для расчетов формулы Клима, то ошибка в сторону преуменьшения может достигнуть 45%.

Литература

1. Gervasori. Bull. ASE, № 8, 1937.
2. Halbach. ETZ, № 2, 1933.
3. Clem. El. World, Dec. 6, 1933.
4. Краснушкин и Смирнов. Сборник исследований по борьбе с гололедом, ОНТИ, 1934.
5. М. В. Шулейкин. Электр. связь, № 2, 1941.
6. Maret. Bull. ASE, № 17, 1940.
7. Sobin. Conf. Intern. d. Grand. Rescnuh. Electr., 1937.
8. М. А. Михеев. ЖТФ, в. 6, 1943.
9. Schurig a Frick. GER, № 3 1930.
10. Hilpert. Forsch. a. d. Gebiet d. Ing. Wesen № 5, V-IV, 1934.
11. Л. С. Эйгенсон. Изв. ЭНИН, т III, в. 1—2, 1935.
12. М. В. Кирпичев, М. А. Михеев и Л. С. Эйгенсон. Теплопередача, 1949.
13. Gendefroy a Lippit. GER, № 8, 1935.
14. Мак-Адамс. Теплопередача, 1936.

⁵ Скрытая теплота плавления равна 33 Wh/cc'g.



Упрощенный метод расчета токов короткого замыкания с учетом качаний генераторов¹

Кандидат техн. наук, доц. В. А. ВЕНИКОВ
и кандидат техн. наук, доц. С. А. УЛЬЯНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

При расчетах токов короткого замыкания для целей релейной защиты обычно недостаточно ограничиваться только определением наибольших величин токов для заданных моментов времени, а необходимо также иметь данные о наименьших значениях токов, распределении токов в ветвях системы и их фазовых соотношениях. Решение этой задачи представляет значительные трудности, так как система дифференциальных уравнений, описывающих процессы короткого замыкания с учетом влияния относительного движения роторов генераторов, в общем случае не может быть точно решена.

Применение приближенного численного интегрирования, например, методом последовательных интервалов, предложенным Лонглеем [Л. 1], затруднительно из-за его трудоемкости и необходимости производства расчетов с большой тщательностью во избежание ошибок, накапливаемых от интервала к интервалу. В практических расчетах обычно не требуется большая точность, в то время как простота методики расчета является обязательным условием. Предлагаемый ниже метод позволяет, избежав применения последовательных интервалов, получить достаточную для практики точность. Для всякой системы, приводящейся к схеме станция — шины бесконечной мощности, пользуясь принципом суперпозиции, легко определить ток в любой ветви схемы, если знать характер относительного движения ротора $\delta = f(t)$ и закон изменения э. д. с. $E'_a = f(t)$, учитывающий относительное движение ротора. Указанная зависимость может быть представлена в виде

$$E'_a = E'_{a\sim\delta} + (E'_{a0} - E'_{a\sim}) e^{-\frac{t-\lambda}{T'_a}}. \quad (1)$$

Здесь

$$E'_{a\sim\delta} = \frac{X'_{a1}}{X_{d11}} E'_{a0} + \frac{X_{d1} - X'_{a1}}{X_{d12}} U \cos \delta$$

¹ Работа проведена при кафедре электросетей и систем МЭИ (зав. кафедрой — доктор техн. наук, проф. П. С. Жданов) по заданию Гл.вуралэнерго.

установившаяся переходная э. д. с. с учетом изменения угла; $E'_{a\sim}$ — ее значение в предположении неизменности угла $\delta = \delta_0$; E'_{a0} — начальное значение переходной э. д. с.

$$\lambda = T'_a \int_{\delta_0}^{\delta} \frac{\sin \delta}{\frac{E'_{a1} - A}{B} - \cos \delta} d\delta;$$

A и B постоянные, зависящие от параметров схемы; U — напряжение на шинах бесконечной мощности.

Выражение (1) свидетельствует о том, что изменение угла влияет как на установившееся значение э. д. с. E'_a , так и на ее свободную составляющую. Изменение последней может быть представлено экспоненциальным законом, но содержащим не действительные моменты времени t , а уменьшенные на величину λ . Это показывает, что благодаря относительному движению ротора затухание свободной составляющей может замедляться, иногда переходя в возрастание. При обычных параметрах систем изменение E'_a мало сказывается на значении λ , зависящем главным образом от δ . Если при определении λ принять $E'_{a1} = E'_{a0} = \text{const}$, то как показали расчеты:

$$E'_a = E'_{a\sim\delta} + (E'_{a0} - E'_{a\sim\delta}) e^{-\frac{t}{T'_a}}. \quad (2)$$

Имея функциональную зависимость $\delta = f(t)$, можно на основании выражения (2) вычислить э. д. с., а затем и ток для любого момента времени.

Проведенные исследования показали, что нахождение $\delta = f(t)$ для интервалов времени, не превышающих (1,5 ÷ 2) sec., вполне возможно в предположении, что $E'_a = \text{const}$, с использованием типовых кривых $\delta = f(t)$, при заданных $\sin \delta_0$ и $\frac{P_0}{P_m}$, где P_0 и P_m — нормальный и максимальный моменты (мощности) эквивалентной станции при коротком замыкании. В качестве

таких кривых могут быть использованы, например, кривые, полученные на интеграторе [Л. 2] и пригодные для генераторов с различной постоянной инерции, поскольку решение дано для некоторого фиктивного времени

$$\tau = t \sqrt{\frac{2\pi f}{M} p_m},$$

где f —частота в Hz; M —постоянная инерция в sec.

Сравнение расчетов, проведенных описанным методом, с расчетами по методу Лонглей, показало весьма хорошее совпадение как для случаев коротких замыканий, сопровождавшихся качаниями при сохранении устойчивости, так и для случаев коротких замыканий с нарушением устойчивости; ошибка в величинах полных токов (в наиболее неблагоприятных случаях) не превышала $5 \div 7\%$, а в величинах токов положительной последовательности $10 \div 15\%$.

В тех случаях, когда система находится на пределе устойчивости, погрешности могут быть более значительными, однако это не является недостатком метода, поскольку и при других („точных“) методах расчета решение является неопределенным: наличие второстепенных и неучитываемых расчетами, но в предельном случае влияющих факторов может обусловить как устойчивую, так и неустойчивую работу системы.

Решение на основе (2) следует рассматривать как первое приближение, позволяющее перейти к более точному решению с вычислением λ . Путем последовательных приближений может уточняться также и характер зависимости $\delta = f(t)$.

Величины токов короткого замыкания с учетом качаний генераторов могут быть найдены с достаточной для практики точностью для любого момента времени путем геометрического суммирования тока от эквивалентного генератора, вычисленного обычными методами расчета токов короткого замыкания (например, по кривым затухания), и тока от источника бесконечной мощности. Значение углового сдвига определяется по упрощенной зависимости, принимая $E'_d = \text{const}$, или, как указано выше, по типовым кривым.

Описываемый метод дает наибольшую точность при определении токов в ветви короткого замыкания и несколько меньшую для прочих

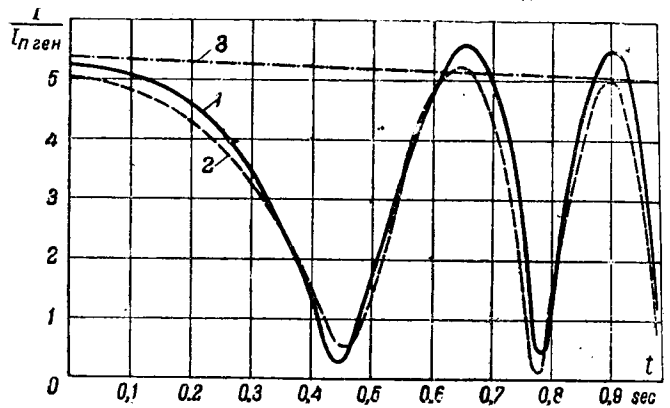


Рис. 1. Изменение тока в месте короткого замыкания при двухфазном замыкании на землю.

1—расчет по методу Лонглей; 2—расчет по кривым затухания с учетом изменений угла по типовым кривым $\delta = f(t)$; 3—расчет по кривым затухания.

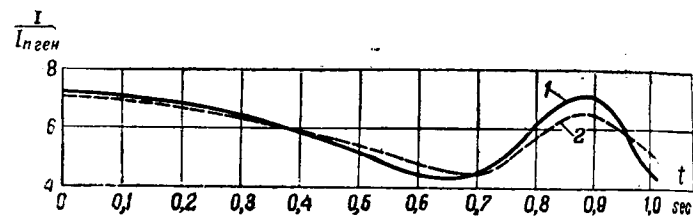


Рис. 2. Изменение тока в месте короткого замыкания между двумя фазами.

1—расчет по методу Лонглей; 2—расчет по кривым затухания с учетом регуляторов напряжения и изменения угла по типовым кривым $\delta = f(t)$.

ветвей схемы. Сравнение результатов вычислений токов короткого замыкания (в месте повреждения) приведено на рис. 1 и 2. Токи в других ветвях схемы вычисляются с меньшей точностью, чем в месте короткого замыкания. Несколько меньшая точность получается и при замыканиях между тремя фазами.

В заключение следует отметить, что инж. А. Б. Барзагом был предложен упрощенный способ учета влияния качаний на токи короткого замыкания, пригодный для некоторых частных случаев.

Литература

1. F. R. Longley. The Calculation of Alternator Swing 9, Curvers. The step by step Method, Trans. AIEE, p. 132, v. 4 1930.
2. I. H. Summers and Mellor Progress in the Study of System Stability. Trans. AIEE, v. 49, p. 1129, 1930.



Синхронизация импульсных схем заторможенным искровым разрядом

Кандидат техн. наук В. С. КОМЕЛЬКОВ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Последовательное (во времени) включение высоковольтных импульсных контуров широко используется в технике и лабораторной практике (не вполне точно такое включение называют синхронизацией). Интервалы времени, отделяющие срабатывание одного контура от другого, могут изменяться в пределах от 0,1 до 100 μ sec и более. Малые интервалы (0,3 + 0,8 μ sec) сравнительно просто и надежно осуществляются с помощью искрового или светового реле. Запоздывания длительностью свыше 100 μ sec легко достичь, применяя механический синхронизатор, в котором две пары неподвижных контактов последовательно замыкаются движущимся контактом. Реализовать интервалы времени от 1 до 100 μ sec бывает значительно труднее. Обычно сооружаются промежуточные ударные контуры или схемы. Однако этих дополнительных устройств можно избежать, если воспользоваться искровым разрядом в длинных промежутках, как средством управления последовательной работой синхронизируемых контуров высокого напряжения.

Если к выходу первого (синхронизирующего) контура подключить через большое сопротивление искровой промежуток, то время от момента появления напряжения на выходе до конца разряда поддается регулировке для такого промежутка в пределах от 1 до 100 μ sec и более в зависимости от максимума напряжения контура.

Ток в цепи, где развивается заторможенный искровой разряд, отличается той положительной особенностью, что наиболее стремительное его нарастание и максимум наблюдаются в конечной стадии пробоя, когда завершается лидерная стадия и возникает обратный разряд.

Типичная форма кривой тока показана на рис. 1; a — время запаздывания, t_3 — начала разряда, считая его от момента появления напряжения на электродах. Оно определяется формой и амплитудой волны импульса, падающего на электроды, емкостью электродов, сопротивлением торможения и статистикой запаздывания зажигания разряда.

Отрезок $a-b$ изображает длительность лидерной стадии или время развития разряда t_p , определяемое напряжением на электродах, их емкостью, сопротивлением торможения, статистическими особенностями развития разряда в промежутке (изменение длины траектории искры, зигзагообразность) и формой поля. Отрезок $b-c$ — время существования обратного разряда, оно удлиняется с возрастанием длины промежутка, длительности лидерной стадии и сопротивления,

включаемого в цепь заземленного электрода; от точки c и далее — стадия дуги.

На рис. 2 показана схема соединений синхронизатора с импульсным генератором, где ИО — испытуемый объект.

После срабатывания первого контура, через время t_3 , искровое реле ИР второго контура получит синхронизирующий импульс. Промежуток в реле ИР подбирается так, чтобы его пробой возникал при максимуме тока в цепи заторможенной искры, т. е. в период образования обратного разряда. Регулировку времени синхронизации удобнее осуществлять за счет изменения сопротивления торможения, длины промежутка и формы электродов. При этом меняется время запаздывания и время разряда.

Чтобы не исказить форму волны, падающей на объект, необходимо сопротивление торможения, включаемое в цепь искрового промежутка, выбирать на порядок больше разрядного сопротивления контура I .

При известных: потенциале зажигания, емкости электродов и форме волны контура I время t_3 может быть приближенно подсчитано по обычным уравнениям заряда емкости через сопротивление R_T . Время t_3 приближенно оценивается по отношению длины промежутка к средней скорости лидера.

При электродах острей — острие образуются два встречных лидера, движущихся с разными

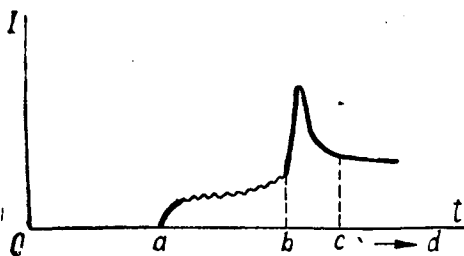


Рис. 1.

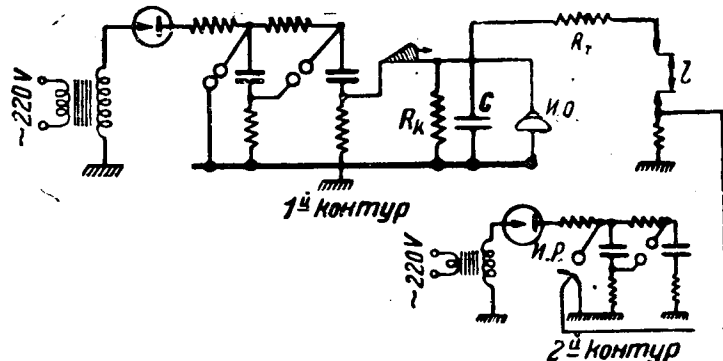


Рис. 2.

скоростями. Таким образом время t , будет определяться отношением длины траектории лидера одного знака к его средней скорости. Количественные характеристики влияния сопротивления торможения на скорости лидеров при различных формах электродов имеются в цитированной ниже литературе.

Совместное исследование времени запаздывания и времени разряда произведено автором.

Условия эксперимента были следующими: импульсный генератор 600 kV, с общей емкостью в разряде $2 \cdot 10^{-3}$ pF, разряжался через сопротивление торможения R_T и искровой промежуток острей — острей с емкостью $7 \div 10$ см. Высоковольтный электрод имел положительную полярность. Токи разряда записывались катодным осциллографом. По осциллограммам определялись искомые времена t_3 , t_p , t_c , результаты которых показаны на рис. 3. Напряжение контура было равно минимальному импульсному или отклонялось от него на $10 \div 12\%$ в ту или другую сторону. Рядом с точками кривых на рисунке указаны межэлектродные промежутки в сантиметрах.

При сопротивлениях свыше $10^5 \Omega$ началу лидерного процесса предшествует стадия короны, в которой наблюдаются отдельные толчки тока, соответствующие коронным стримерам; зажигание разряда не сопровождалось непосредственным переходом его в лидерный разряд. Начальные коронные токи в нашей схеме осциллографирования невозможно было записать. Поэтому в качестве меры времени запаздывания на кривой нанесены интервалы времени, отделяющие момент появления напряжения на электродах от начала непрерывного развития лидерного процесса. Разброс t_c и его составляющих практически достаточно мал для целей синхронизации, если сопротивление торможения не превышает $10^5 \Omega$.

Минимальное импульсное напряжение для синхронизации в большинстве случаев неприемлемо, так как 50% разрядов контура не дают завершенной искры; поэтому интерес представляет влияние перенапряжения на промежутке на времена t_p и t_c .

На рис. 4. показано изменение t_p и t_c с уменьшением межэлектродного расстояния при неизменных параметрах падающей волны; сопротивление торможения в данном случае составляло $9,8 \cdot 10^6 \Omega$, т. е. ту величину, при которой наблюдался наибольший разброс интервалов времени при минимальном импульсном напряжении.

Как видно, повторяемость результатов от опыта к опыту существенно улучшается с увеличением кратности перенапряжения и при двукратном перенапряжении достигает приемлемых величин (отклонения на 10% от среднего значения).

В целом синхронизация контуров путем применения заторможенной искры не обладает высокой точностью ввиду статистического харак-

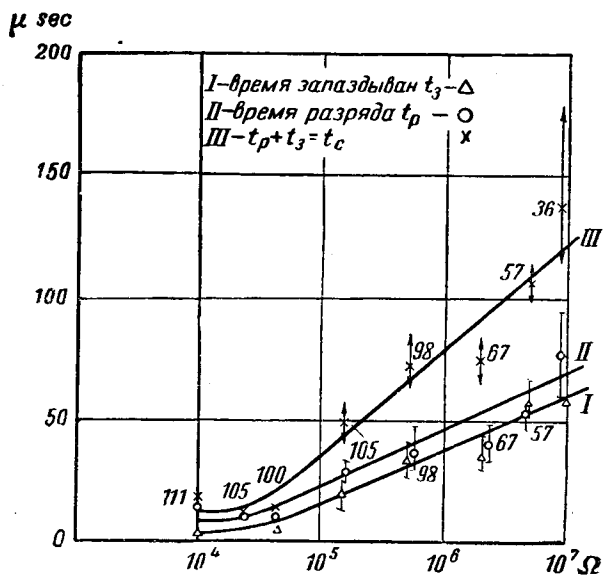


Рис. 3.

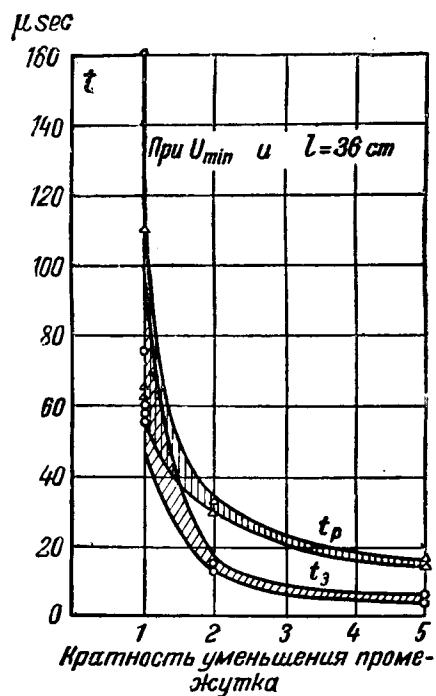


Рис. 4.

тера механизма разряда. Однако простота, надежность и легкость реализации этого метода при наличии высокого напряжения позволяют его рекомендовать для практического использования. Для большинства случаев применения синхронизатора указанная выше точность является достаточной.

Литература

1. И. С. Стекольников и А. П. Беляков. ЖЭТФ, т. 8, вып. 4, стр. 444—445, 1938.
2. T. E. Allibone and J. M. Meek. Proc. Roy. Soc. A., v. 109, № 924 и 937, 1938.
3. В. С. Комельков. ЖТФ, т. 10, вып. 17, стр. 1426—1431, 1940.



О некоторых физических процессах в 35-kV кабелях в связи с частичными пробоями изоляции

Инж. И. Е. БАЛЫГИН

Ленэнерго

Ниже кратко сообщено о некоторых физических процессах в отрезках 35-kV кабелей при прогрессивном росте частичных пробоев в изоляции, главным образом пробоев ветвистого характера. В настоящее время нет сколько-нибудь действенных способов профилактических испытаний в целях выявления повреждений изоляции кабеля в результате старения. Такие способы могут быть разработаны лишь на основе изучения известного комплекса физических явлений, связанных с подобного рода повреждениями изоляции. Поэтому полагаем, что излагаемый опытный материал не лишен практического интереса.

О возможности регистрировать частичные пробои кабельной изоляции и о методах этих испытаний уже сообщалось и к этому вопросу возвращаться не будем.

Опыты велись с отрезками 35-kV кабелей длиной около 6 м, сечением 50 мм² (отдельные фазы) с концевыми фарфоровыми муфтами на одном конце и железными воронками, заполненными массой Е-60 на другом. Для старения изоляции такие куски кабеля подключались под напряжение 50 kV с нагрузкой током 360 А. На нескольких образцах проверялся эффект «отдыха» кабеля: способность изоляции восстанавливать свою диэлектрическую прочность через известные промежутки времени, когда процесс старения доводится только до определенной (неполной) стадии и затем прекращается. Одновременно в этих опытах проверялась способность индикатора частичных разрядов отмечать резкие ухудшения в состоянии изоляции кабелей. Ухудшения контролировались измерением диэлектрических потерь на мосте Шеринга и регистрацией местных повышений температур свинцовой оболочки.

На рис. 1 приведены кривые, показывающие изменения интенсивности частичных пробоев изоляции в кабеле при различных условиях. Кривая I записана при помощи индикатора до включения образца на старение. Заметные показания

здесь между прочим начинались при 35 kV. Кривая II записана при неизменном напряжении 50 kV в процессе старения, но в зависимости от температуры свинцовой оболочки образца в месте наметившегося потом аномального нагрева. В первые четыре часа старения (до точки А) наблюдался постепенный и весьма медленный процесс увеличения аномальной температуры вблизи фарфоровой муфты. $\text{tg } \delta$ не изменялся и был равен 0,02 (при том же напряжении). В последующие два часа увеличения температуры и $\text{tg } \delta$ не было отмечено. Процесс старения затормозился. Чтобы растормозить процесс, напряжение было увеличено до 55 kV, на 30 мин, затем снижено снова до 50 kV. За это время показания индикатора резко возросли (участок АВ). В последующие три часа температура в месте аномального нагрева поднялась только до 41° С. В отдаленных от места аномального нагрева местах оболочки температура при этом была 33° С. В этой стадии старения $\text{tg } \delta$ увеличился до 0,03 тоже при 50 kV. Сразу же была записана еще кривая III показаний индикатора в зависимости от напряже-

ния. После всего этого кабель был отключен на 15 ч («отдыхал»). Затем его опять поставили на старение при тех же условиях. Перед включением была записана еще кривая IV частичных пробоев в изоляции в зависимости от напряжения. Показания оказались сильно уменьшенными. Этот эксперимент служит иллюстрацией весьма часто наблюдавшемуся эффекту отдыха изоляции кабеля. Можно видеть, что за 15 ч изоляция почти целиком восстановила свою диэлектрическую прочность в отношении частичных пробоев. Очевидно, что за это время очаги повреждения заплыли пропиточной массой. Такое улучшение свойств изоляции, как показали дальнейшие опыты, не является временным и носит стойкий характер. После шестичасового промежутка вторичного старения температура оболочки в месте аномального нагрева, наметившегося еще при первом подключении, поднялась до 49° по сравнению с 35° С в отдаленных участках. Частичные пробои изоляции на этой стадии отмечались уже при 12 kV (кривая V).

Иногда эффект отдыха кабеля приводит к перемене места намечающегося пробоя, о котором можно безошибочно судить по аномальному нагреву оболочки. Это явление наблюдалось на одном образце при следующих обстоятельствах: после семичасового промежутка старения температура свинцовой оболочки в одном месте достигла 45° С при 32° С в отдаленных участках от места аномального нагрева. После этого напряжение и нагрузка от кабеля были отключены на 15 ч и затем включены снова, но за 8 ч аномального

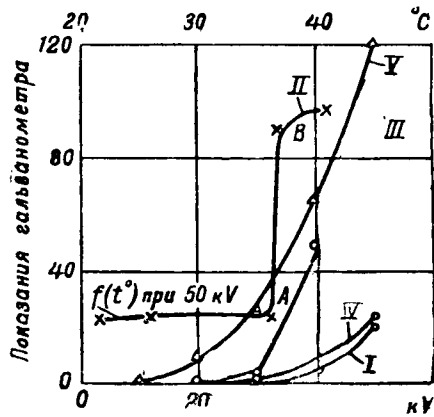


Рис. 1.

нагрева ни в одном месте отмечено не было. Повсюду оболочка имела температуру 32—33° С. Кабель был снова отключен и через 15 h поставлен в третий раз на старение на 5,5 h. Результаты получились те же. Чтобы сдвинуть процесс старения с мертвой точки, напряжение при неизменной нагрузке 360 А было повышено до 55 кV и не снижалось. Через 1 час появился местный аномальный нагрев, но уже в другом месте, на отдалении около 0,5 m от первоначального. Через час температура в этом новом месте поднялась до 49° С и вскоре кабель был пробит. Вскрытие образца показало, что, начиная от жилы, в изоляции имелась широко разветвленная сеть ветвистых побегов, частично захватившая и старое место аномального нагрева.

Представляет некоторый интерес и характер изменений интенсивности частичных пробоев изоляции при различных прогрессирующих процессах старения. На рис. 2 приведены кривые показаний индикатора в зависимости от температуры аномального нагрева оболочки кабеля (степень старения). Записаны эти кривые в процессе старения образцов при неизменном напряжении 50 кV. На одном образце аномальная температура достигла 54° С. После этого на кабель было подано выпрямленное напряжение 100 кV. Через 7 min он был пробит в месте аномального нагрева. При вскрытии образца оказалось, что повреждение изоляции было радиальным, без всяких следов ветвистых побегов и вызвано, очевидно, тепловой неустойчивостью изоляции. Общее состояние изоляции хорошее, без заметного отложения воска и сухости. Обращает на себя внимание асимптотический ход кривой I, соответствующий этому случаю старения. Кривая II записана при старении образца кабеля, когда температура оболочки в месте аномального нагрева достигла 50° С. После этого кабель (через 30 min) выдержал испытание в течение 2 h с одновременной нагрузкой 360 А напряжением выпрямленной полувольты 100 кV.

Вскрытие показало, что над местом аномального нагрева на 18 лентах, начиная от жилы, имелись явно выраженные и в большом количестве ветвистые побеги. Менее поврежденными оказались следующие за ними 4 ленты. Общая изоляция была сильно подсушена и имелось значительное кустообразное отложение воска. Характерно, что при таком процессе старения токи через кабель при переменном напряжении 50 кV, измеренные в начале и к концу старения, двумя миллиамперметрами с кенотронами, включенными на каждую полувольту, отличались приблизительно на 0,1 mA. К этому следует добавить, что частичные разряды в изоляции кабеля даже при 100 кV выпрямленного напряжения практически не отмечались. Форма кривой II, соответствующая процессу старения с появлением ветвистых

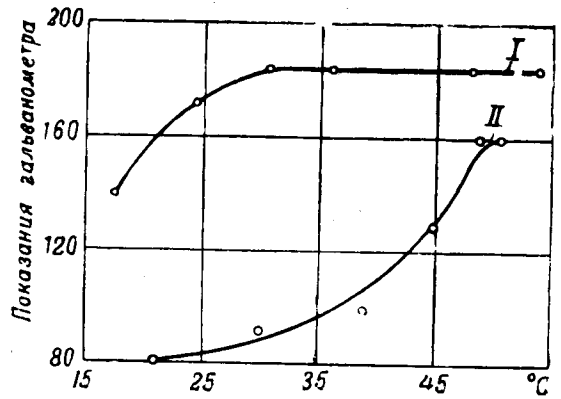


Рис. 2.

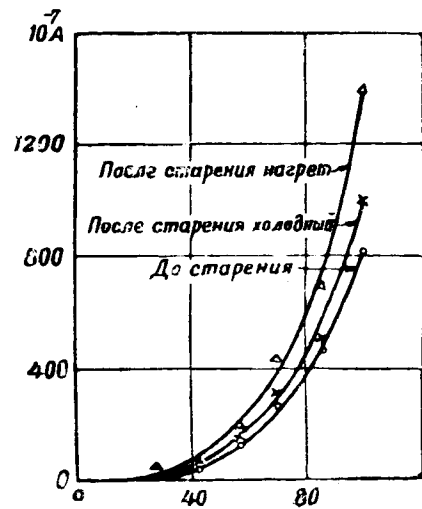


Рис. 3.

побегов, как указывалось выше, совсем не имеет сходства с кривой I, записанной при старении с радиальным повреждением изоляции.

При проверке действенности существующего способа профилактических испытаний 35-кV кабелей выпрямленным напряжением 100 кV в течение 15 min оказалось, что кабели со значительно большим числом поврежденных ветвистыми побегами лент, чем указано выше, выдерживают даже 100 кV в течение 2 h.

На рис. 3 приведены кривые токов через кабель при выпрямленном напряжении (полувольты) до и после старения. К концу процесса старения аномальная температура на оболочке образца достигла 51° С в течение 3,5 h. Отдаленные от места аномального нагрева участки кабеля имели температуру 33° С $t_{гд}$, измеренный при 10 кV, до старения был равен 0,005, а к концу старения увеличился до 0,016. Токи измерялись гальванометром на стороне высокого напряжения. Как можно видеть, заметное увеличение тока получилось только в нагретом кабеле (оболочка при 32°С) после старения.



В техническом совете Наркомата электростанций СССР

Обзор вопросов в области электрических устройств энергосистем, рассмотренных Техническим советом НКЭС СССР в 1945 г.

I. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ

Еще в последние годы войны, подготавливаясь к развитию энергетического хозяйства в послевоенный период, Технический совет НКЭС занялся разработкой вопросов предстоящего технического перевооружения энергетических систем.

В результате этой работы Техническим советом был вынесен ряд решений, формулирующих требования Наркомата электростанций к отечественной электропромышленности в отношении основных видов электрического оборудования энергетических устройств. Требования указывают новые, ранее не выпускавшиеся промышленностью Союза типы электрических машин, аппаратов и других изделий, которые должны быть освоены производством для удовлетворения потребности союзной энергетики в предстоящей пятилетке. В требованиях отмечены также недостатки в уже изготовляемом оборудовании, установленные на основании опыта его эксплуатации, и конкретно указаны необходимые улучшения.

В дополнение к отраженным в решениях 1944 г. требованиям в области высоковольтной аппаратуры, релейной защиты, аппаратуры, устройств связи в энергосистемах, оборудования диспетчерских пунктов и телемеханики, Техническим советом в 1945 г. были разработаны требования в отношении силовых трансформаторов, электродвигателей, силовых кабелей и электроизмерительных приборов.

Силовые трансформаторы. Силовые трансформаторы, изготовляемые в СССР, работают с высокой надежностью и являются наименее повреждаемым оборудованием. Центральным требованием в отношении их является повышение коэффициента полезного действия.

В трансформаторах, находящихся в эксплуатации в Союзе, теряется в среднем около 6% энергии, вырабатываемой в энергосистемах НКЭС. Технико-экономические исследования, проведенные по поручению Технического совета, показывают экономическую целесообразность уменьшения потерь в трансформаторах в среднем на 15—25%. Вызываемый этим дополнительный расход металла и увеличение стоимости транс-

форматоров окупаются в короткий срок вследствие экономии электроэнергии, передаваемой и распределяемой в энергосистемах. Общий экономический эффект, достигаемый при повышении коэффициента полезного действия трансформаторов, становится особенно заметным в случае использования в трансформаторостроении улучшенных сортов трансформаторной стали с более низкими удельными потерями.

Снижение потерь в трансформаторах должно благоприятно отражаться на нагреве трансформаторов, который в новой серии должен быть понижен примерно на 10°. Это повысит перегрузочную способность трансформаторов, даст возможность в ряде случаев не применять на подстанциях неработающий резерв, увеличить срок службы трансформаторов и удлинить продолжительность работы трансформаторного масла.

Представители Московского трансформаторного завода им. Куйбышева, принимавшие участие в обсуждении, отметили, что трансформаторы, выпускаемые отечественной электропромышленностью, не являются оптимальными по своему коэффициенту полезного действия и что трансформаторы лучших американских фирм имеют потери на 25—30% ниже при увеличенном на 30% общем весе.

Представители завода признали желательным разработку и пуск в производство своей серии трансформаторов с улучшенным к. п. д., но указали, что доминирующее значение в решении этого вопроса имеет качество трансформаторной стали. Необходимо, чтобы союзные заводы черной металлургии обеспечили выпуск трансформаторной стали холодной прокатки, имеющей значительно более низкие удельные потери, чем сталь горячей прокатки.

Технический совет в своем решении выдвинул также требование выпуска трансформаторов с регулируемой напряженности под нагрузкой, причем регулирующими устройствами должны снабжаться в первую очередь понижающие трансформаторы 110 кВ и выше.

При обсуждении вопроса было отмечено большое значение регулирования напряженности для улучшения качества энергии и снижения потерь.

в энергосистемах. Представители трансформаторного завода указали, что завод уже имеет некоторый опыт в данной области и что выпущенные им трансформаторы с регулировкой напряжения не имели никаких аварий, которые можно было бы отнести на счет несовершенства конструкции.

Следующим требованием является снабжение всех крупных трансформаторов устройствами для защиты масла от окисления. На ближайший период до проверки в эксплуатационных условиях других видов защиты все выпускаемые трансформаторы должны быть оборудованы термосифонными фильтрами для непрерывной регенерации масла в комбинации с влагоосушителями.

Перед электропромышленностью встает также новая серьезная задача, отмеченная в решениях Технического совета, освоить выпуск комплектных трансформаторных подстанций, в которых вся коммутационная аппаратура и защита монтируется заводом на самом трансформаторе. Применение таких подстанций приведет к значительному удешевлению сетей, сокращению потерь в них, уменьшению колебаний напряжения и повышению надежности энергоснабжения. Необходимо, чтобы подготовка к производству однотрансформаторных подстанций для городских сетей и промышленных предприятий была начата уже в 1945 г.

Учитывая положительный опыт США широкого внедрения однофазных распределительных сетей, дающих наряду с упрощением канализации электрической энергии возможность применения более экономичных трансформаторов с малыми потерями холостого хода и намагничивающим током, Технический совет предложил Техническому отделу НКЭС провести в 1945 г. работу по выяснению целесообразности перенесения опыта США в условия электрохозяйства СССР.

Затронутый на совещании вопрос о расширении шкалы напряжений выпускаемых трансформаторов встретил ряд возражений. Представители электропромышленности указывали, что действующая шкала является удачной и охватывает 300 типов. Введение новых напряжений увеличило бы количество типов и тяжело бы отразилось на производственном процессе. В связи с этими соображениями вопрос о расширении шкалы напряжений был временно отложен.

Помимо указанных выше требований принципиального характера Технический совет сформулировал ряд замечаний по улучшению отдельных конструктивных элементов трансформаторов.

Электрические двигатели. Производство электрических машин до сих пор проводилось Наркоматом электропромышленности, исходя из узкой тенденции к максимальному сокращению расхода вкладываемых в них цветных металлов и стали, без учета того, что подобная экономия в заводском производстве приводит в конечном счете к увеличению расхода цветных металлов в электрических сетях, к уменьшению надежности работы электрических машин в эксплуатации, к повышенным потерям в сетях и к необходимости

иметь излишнюю установленную мощность на электростанциях для покрытия потерь.

Кроме того высокая аварийность двигателей вызывает необходимость иметь на электростанциях и промышленных предприятиях крупные электромеханические мастерские для ремонта машин.

По статистическим данным расход цветных металлов и изоляционных материалов для ремонта находящихся в эксплуатации двигателей настолько велик, что достигает 50% от общего количества этих материалов, затрачиваемого Наркоматом электропромышленности на выполнение годовой программы по производству электродвигателей.

Анализ распределения цветного металла в энергосистемах показывает, что количество меди, вложенной в двигателя, составляет лишь 3% от общего расхода цветного металла в энергосистемах, включая сюда и установки у потребителей, тогда как потери в двигателях достигают 8,5% от всей энергии, вырабатываемой на электрических станциях.

Следует отметить, что американские электродвигатели мощностью 1—100 kW в среднем вдвое тяжелее машин союзного производства той же мощности, а их эффективный к. п. д., т. е. произведение к. п. д. на коэффициент мощности, выше на 0,04—0,05.

Технический совет НКЭС указал на необходимость разработки и пуска в производство новой серии асинхронных двигателей, удовлетворяющей следующим требованиям:

а) Повышенные коэффициенты полезного действия и коэффициент мощности. Как показали технико-экономические исследования, для двигателей от 1 до 100 kW целесообразно повышение к. п. д. на 3,4%—0,7% и повышение коэффициента мощности на 0,032—0,004 в зависимости от мощности и числа полюсов.

б) Повышенная надежность асинхронных двигателей, достигаемая путем снижения температуры нагрева активных частей приблизительно на 10°C, путем повышения качества изоляции, перехода на более надежную вентиляцию и т. п.

в) Увеличенная до 2 перегрузочная способность.

г) Повышенный до 1,15—1,4 (в зависимости от числа полюсов) минимальный момент в период пуска.

Электропромышленность должна выпустить тип закрытых обдуваемых двигателей, предназначенных для работы в наиболее тяжелых условиях в установках собственных нужд электрических станций. Должны выпускаться также различные модификации асинхронных двигателей: с повышенным скольжением, малоскоростные, с увеличенным пусковым моментом и т. п. Необходимо поставить производство однофазных двигателей малых мощностей для работы в распределительных сетях коммунального и сельскохозяйственного значения.

В решениях Техсовета включено также требование к электропромышленности обеспечить действительную и полную взаимозаменяемость отдельных деталей однотипных электродвигателей.

Представитель Всесоюзного комитета стандартов при СНК СССР заявил, что Комитет будет поддерживать требования Технического совета НКЭС при обсуждении нового ГОСТ на электродвигатели.

Силовые кабели. Технический совет высказался за скорейшую отмену всех изменений ГОСТ на силовые кабели, вызванных условиями военного времени, и указал на необходимость внесения ряда улучшений в их конструкцию и в производство.

Защитные покровы кабелей должны быть усилены и усовершенствованы путем увеличения толщины железной брони, усиления и улучшения бумажных и джутовых покрытий. Толщина свинцовых оболочек кабелей должна быть повышена и одновременно улучшена технология их наложения. Должна быть повышена стоимость кабелей в отношении электролитической и химической коррозии. Должно быть обращено внимание на повышение электрической и механической прочности бумажной изоляции в кабелях напряжением 22 — 35 кВ. Гибкость кабелей всех напряжений должна быть увеличена, и должна быть обеспечена возможность их прокладки при температурах минус 10°—минус 15° С без подогрева.

Особенное внимание должно быть обращено на производство кабелей для работы на вертикальных и наклонных участках трасс при значительных температурах нагрева.

Конструкция кабельных барабанов должна быть улучшена.

Основываясь на единодушных выступлениях представителей монтажных и эксплуатационных организаций, Технический совет отметил исключительную ненормальность существовавшего еще до войны положения, при котором кабельные заводы НКЭП не занимались изготовлением кабельной арматуры и не производили ее поставки комплектно с поставляемыми кабелями. Это создавало чрезвычайно затруднительное положение при сооружении кабельных линий и вынуждало потребителей применять муфты собственной конструкции, изготавливаемые кустарным способом.

Технический совет выставил категорическое требование, чтобы электропромышленность приступила к конструктивной разработке и систематическому изготовлению кабельной арматуры. Аналогичное требование выдвинуто и по отношению к специальной испытательной и контрольно-измерительной аппаратуре для эксплуатации кабельных линий.

Техническим советом выдвинуто требование выработки, освоения и выпуска электропромышленностью газонаполненных кабелей низкого и среднего давления на номинальные напряжения 10 — 35 кВ и внесения ряда улучшений в производство маслонеполненных кабелей 110 кВ с

учетом недостатков, выявившихся из опыта эксплуатации.

Электроизмерительная аппаратура. В настоящее время в связи с восстановлением и развитием энергетического хозяйства должно быть обращено особое внимание на снабжение энергетических систем СССР электроизмерительными приборами, стоящими по своему качеству и по номенклатуре не ниже уровня современной приборостроительной техники передовых зарубежных стран.

Ввиду этого Технический совет поставил вопрос о скорейшем создании приборостроительной промышленности, способной удовлетворить в полной мере потребность в измерительных приборах, и об организации выпуска, помимо измерительной аппаратуры, также запасных частей и специального инструмента для ремонта измерительных приборов, находящихся в эксплуатации.

Технический совет высказался за необходимость организации научно-исследовательской базы для разработки электро- и теплоизмерительных приборов и методов измерения и за расширение подготовки специалистов различных степеней квалификации в области измерительной техники.

Принят номенклатурный список электроизмерительных приборов, необходимых для эксплуатации энергетических установок и ранее не изготавливавшихся союзной энергопромышленностью для гражданских нужд; указаны также основные технические требования к ним.

Щитовые измерительные приборы должны изготавливаться квадратной формы, применение которой дает значительную экономию в площади распределительных контрольных щитов. Эти приборы должны выпускаться в двух основных разновидностях по габаритам, а именно — приборы нормального и миниатюрного исполнения. Приборы нормального исполнения в интересах наибольшего удобства отсчетов должны иметь измерительную систему, расположенную в правом нижнем углу корпуса, и должны снабжаться шкалой в 90°; приборы миниатюрные должны изготавливаться со шкалой в 270°.

Амперметры переменного тока на номинальную его величину 5А должны иметь шкалу с перегрузочной областью до 7,5 ÷ 10 А. Вольтметры переменного тока должны выпускаться как нормального типа с полной шкалой, так и специального типа «с подавленным нулем», т. е. имеющие шкалу в пределах от 90 до 100% номинальной величины измеряемого напряжения, с точностью измерения $\pm 0,2\%$. Ваттметры активной мощности для неравномерной нагрузки трехфазного тока должны по требованию выпускаться с переключателем, позволяющим переводить прибор на измерение реактивной мощности. Должен быть обеспечен выпуск стрелочных частотомеров в классе точности 0,5 при шкале 48 ÷ 52 Hz и в классе 0,2 при шкале 49 — 51 Hz. Все указательные приборы, помимо стрелочных частотомеров и вольтметров «с по-

давленным нулем», должны находиться в классе точности 1,5.

Для дистанционного измерения температур должны выпускаться в виде комплектных устройств электрические термометры сопротивления по мостовой схеме с логометром; термоэлектрические пирометры с медно-константановой термопарой и милливольтметром, манометрические термометры с термобаллоном и соединительным капилляром.

В отношении самопишущих приборов выдвинуто требование, чтобы помимо нормального типа, предназначенного для регистрации рабочих режимов, был освещен также тип двухскоростных самопишущих приборов с автоматическим переключением на повышенную скорость при аварийных режимах. Двухскоростной вольтметр должен выполняться трехсистемным для одновременной записи напряжений всех трех фаз на общей ленте.

В области специальных приборов поставлено требование выпуска телевольтметров, телеваттметров, а также специальных мегаваттметров, предназначенных к установке в котельных залах электростанций для контроля суммарной нагрузки.

В номенклатуру переносных приборов, помимо ряда отдельных приборов, необходимых для ведения эксплуатации, включены измерительные чемоданы с вмонтированными в них комплектами миниатюрных приборов в различных сочетаниях и для различных видов измерений, а также переносные установки для испытаний на месте реле, схем релейной защиты, измерительных приборов, изоляции и др.

Для контроля состояния воздушных линий признан необходимым выпуск универсальных штанг для измерения температуры или падения напряжения в контактных соединителях и для испытания изоляторов в гирляндах.

Отечественная электропромышленность должна организовать также выпуск для производственных лабораторий энергосистем: испытательных стендов; газотронно-кенотронных установок; установок для испытаний средств техники безопасности и для испытаний диэлектрических свойств изоляционного масла; мостов Шеринга с напряжением до 100 кВ; шлейфовых осциллографов; катодных осциллоскопов.

Для обеспечения лабораторных установок устойчивыми источниками питания и для получения надлежащего диапазона испытательных напряжений и токов должно быть освоено производство трехмашинных мотор-генераторных агрегатов, состоящих из мотора постоянного тока 110 ÷ 220 кВ мощностью 2 ÷ 3 кВт и двух генераторов трехфазного тока 3 × 220 В с дистанционной регулировкой сдвига фаз, а также выпрямительных установок.

II. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Направление технической политики Наркомэлектро в области эксплуатации электрической части энергосистем. Техническим советом был

рассмотрен по докладу заместителя начальника Технического отдела НКЭС И. А. Сыромятникова вопрос о технической политике в области эксплуатации электрических устройств энергосистем и о ее дальнейшем направлении.

Технический совет признал выбор основных направлений технической политики вполне правильным и отметил, что это дало значительные практические результаты, сказавшиеся в полном разрешении вопроса статической устойчивости энергосистем, в ликвидации массовых сбросов нагрузки при коротких замыканиях в основной сети, в сокращении перерывов в энергоснабжении, вызывавшихся ремонтами воздушных линий, в снижении грозовой аварийности, в улучшении эксплуатации оборудования.

Одобрив предложенные Техническим отделом конкретные вопросы, подлежащие решению, Технический совет рекомендовал осуществление следующих задач:

В области повышения надежности энергосистем. а) Внедрение в восстанавливаемых системах достижений эксплуатации последних лет, а именно: форсировки и регулировки возбуждения, упрощения релейных защит и увеличения их быстродействия, перестройки защит у потребителей, автоматического повторного включения и автоматического ввода резерва, ремонта высоковольтных электрических линий под напряжением, профилактических испытаний и пр.

б) Дальнейшее усовершенствование релейной защиты в сторону упрощения схем и повышения быстродействия; широкое внедрение автоматики, в частности разработка типовых схем для АПВ линий, работающих в кольцо, для пофазного АПВ, автоматической синхронизации и пр.

На основе опыта последних лет должны быть даны указания в области применения разгрузки по частоте и компаундированию, а также применения релейных схем форсировки возбуждения генераторов.

в) Дальнейшая разработка методов профилактических испытаний оборудования, оснащение энергосистем аппаратурой для этих испытаний. В первую очередь разработке и внедрению подлежат: методы проверки изоляции путем измерения сопротивления изоляции в функции времени приложения напряжения и величины последнего; метод лаборатории МТЗ определения степени влажности изоляции путем снятия температурных характеристик емкостного параметра; применение более компактного и простого в обращении неравновесного моста для измерения угла диэлектрических потерь; применение индикатора частичных разрядов; методы измерения и устранения вибрации; усовершенствованные методы контроля изоляции на постоянном токе.

г) Разработка мероприятий по ликвидации аварийных очагов путем отказа от систематической перегрузки основного оборудования в целях повышения надежности и экономичности работы и путем повышения надежности работы электродвигателей собственных нужд.

д) Компенсация токов замыкания на землю как мощное средство повышения надежности воздушных и кабельных сетей.

е) Разработка вопросов эксплуатации сетей низкого напряжения.

ж) Разработка методов пофазного ремонта оборудования подстанций 110 кВ.

В области повышения экономичности энергоснабжения. а) Уделение большого внимания снижению потерь и, в частности, обобщению опыта учета расхода энергии на собственные нужды станций; борьба за сокращение потерь в сетях, особенно в городских распределительных; стимулирование персонала на борьбу с потерями.

б) Разработка методов экономических подсчетов, особенно в области затрат меди и экономии энергии, а также методов сравнительной оценки эффективности вложений и сокращения потерь.

В области изучения и обмена опытом эксплуатации. а) Дальнейшее углубление анализа аварий и использование его результатов для целей улучшения эксплуатации и в особенности при проектировании новых сооружений.

б) Изучение заграничного опыта эксплуатации.

в) Разработка лучших методов эксплуатации и, в частности, установление наиболее целесообразной системы отчетности.

г) Дальнейшее улучшение содержания и формы директивных и инструктивных материалов; создание официальных руководств по эксплуатации отдельных видов оборудования; переход на новую форму типовых инструкций, непосредственно рассчитанных на пользование дежурным персоналом. Выпуск инструкции по эксплуатации распределительных устройств.

д) Улучшение и ускорение информации энергосистем и усиление роли журнала «Электрические станции» в деле обмена опытом.

В области организации ремонтного дела. а) Содействие энергосистемам в переходе на централизованную организацию капитальных ремонтов, в сооружении ремонтных заводов и в усовершенствовании методов ремонта.

б) Пересмотр периодичности ремонтов в сторону возможного удлинения промежутков между ремонтами с улучшением качества ремонта, а также в направлении введения дополнительных профилактических испытаний и улучшений условий работы оборудования.

в) Усовершенствование методов ремонта в направлении дальнейшего улучшения методов ремонта линий 110 и 35 кВ под напряжением; внедрение передвижных резервных трансформаторов; совершенствование методов ремонта и регулирования выключателей и их приводов; обеспечение воздушных и кабельных сетей необходимой аппаратурой; внедрение регенерации и лучших методов очистки изоляционного масла и защиты его от окисления.

В области повышения качества электрических установок. а) Составление «Правил сооружения электрических устройств сильного тока», в которых должны быть учтены достижения и требования современной эксплуатации и наличие оборудования нового типа.

б) Разработка «Теплоэлектропроектом» и «Гидроэнергопроектом» типовых проектов энергетических устройств и перевод нового строительства на сооружение типовых установок по типовым проектам.

в) Строительство энергосистемами производственных лабораторий.

г) Борьба с приемкой в эксплуатацию сооружений, незаконченных или имеющих низкое качество монтажа.

В области руководства научно-исследовательской работой. а) Привлечение исследователей институтов и вузов к научной обработке результатов эксплуатации.

б) Пересмотр методики расчетов статической и динамической устойчивости систем и разработка вопросов устойчивости систем, связанных длинными линиями.

в) Разработка вопросов автоматической регулировки частоты и мощности в системах.

г) Подготовка к практическому разрешению проблемы передачи энергии постоянным током.

д) Изучение молнии и защиты от перенапряжений.

е) Выбор рациональных схем коммутации станций и сетей.

ж) Разработка методов профилактических испытаний.

Итоги анализа аварий и брака в работе в электрической части электростанций и в электросетях НКЭС за 1944 г. Техническим советом ежегодно рассматриваются итоги аварийности в энергосистемах и подвергаются анализу их причины.

Аварийность в электрической части электростанций и электросетей составляла в 1944 г. 61,7% от общего числа аварий при недоотпуске электроэнергии в 50% от всего аварийного недоотпуска по НКЭС.

Удельная повреждаемость генераторов и трансформаторов, т. е. количество повреждений на установленную единицу, уменьшилась по сравнению с предыдущим годом, но значительно возросла удельная повреждаемость линий электропередач, которая повысилась с 1,03 в 1943 до 1,65 повреждений на 100 км. линий в 1944 г.

Общее количество случаев работы релейной защиты понизилось в 1944 г. сравнительно с предыдущим годом на 3,2% при возросшем числе работающих энергосистем. Наибольший процент случаев неправильной работы защиты отмечен по защите шин, генераторов и синхронных компенсаторов, а также по защите линий 110—220 кВ.

Значительная часть аварий объясняется несоблюдением «Правил технической эксплуатации», недостаточным внедрением противоаварийных мероприятий, изложенных в инструк-

циях и циркулярах НКЭС, а также слабой работой по обучению и повышению квалификации персонала.

Причиной аварийности в ряде случаев явилось несовершенство некоторых видов отечественного оборудования (возбудителей, двигателей) и несоответствие установленного оборудования условиям эксплуатации, что объясняется отсутствием производства необходимых типов, например, закрытых двигателей для собственных нужд тепловых электростанций.

Технический совет указал на необходимость проведения в ближайший период следующих противоаварийных мероприятий.

По борьбе с системными авариями: а) Дальнейшее введение автоматического регулирования возбуждения синхронных машин, обеспечивающего мобилизацию всех резервов реактивной мощности, и автоматов разгрузки по частоте.

б) Установка в объединенных энергосистемах Урала и центрального района делительных устройств, разработанных Московским энергетическим институтом;

в) Введение быстродействующих защит, особенно для сетей 110 кВ.

г) Повышение надежности коммутации узловых точек энергосистем путем секционирования сборных шин, перехода с временных схем на постоянные, устройство байпасов и пр.

По борьбе с авариями генераторов: а) Разработка и проведение мероприятий по предотвращению повреждений возбудителей из-за разрыва якорных бандажей.

б) Ускорение выпуска электропромышленностью новой улучшенной серии возбудителей и стандартных щеток требуемого ассортимента.

По борьбе с авариями на собственных нуждах: а) Обеспечение надежности питания собственных нужд путем введения в более широких размерах автоматического включения резервных источников питания и резервных двигателей ответственных механизмов, а также путем секционирования шин собственных нужд на всех напряжениях.

б) Строгое соблюдение объема и сроков профилактических испытаний оборудования и особенно испытаний изоляции обмоток двигателей повышенным напряжением.

в) Разработка простого и эффективного метода выявления ослабленной изоляции двигателей и применение его в форме периодических профилактических испытаний.

г) Использование закрытых обдуваемых электродвигателей для электропривода в запыленных помещениях и для привода дымососов, а также короткозамкнутых двигателей для привода шаровых угольных мельниц.

По борьбе авариями в устройствах защиты, автоматики и вторичной коммутации. а) Снабжение энергосистем лабораторно-измерительной и испытательной аппаратурой, а также высококачественной аппаратурой для монтажа защит.

б) Выпуск инструкций, программ и форм документации по испытаниям и наладке защиты, автоматики и вторичной коммутации.

в) Проведение специальных мероприятий для закрепления на местах и усиления кадров релейщиков.

По борьбе с авариями на линиях электропередачи: а) Усиление сетевых районов общим и специальным транспортом.

б) Широкое введение методов ремонта линий электропередач под напряжением и снабжение энергосистем специальными приспособлениями, необходимыми для его проведения.

в) Централизованное снабжение энергосистем аппаратурой для испытания линий, линейной арматурой, приспособлениями и механизмами для ремонта линий, а также древесиной.

г) Дальнейшее внедрение автоматики повторного включения и, в частности, пофазного АПВ.

д) Разработку эффективных мероприятий по борьбе с загрязнением изоляции и по ее очистке.

По борьбе с кабельными авариями: а) Систематическое проведение в установленные сроки профилактических испытаний кабельных линий.

б) Возобновление деятельности междуведственных комиссий по защите подземных сооружений от блуждающих токов.

в) Выпуск электропромышленностью качественной кабельной арматуры, заливочных компаундов и аппаратуры для эксплуатации кабельных линий.

г) Разработку конструкции подвода кабелей к электродвигателям собственных нужд, исключая повреждения при частых перестановках двигателей.

По борьбе с авариями по вине эксплуатационного персонала:

а) Систематическое проведение на электростанциях и в сетевых районах занятий по повышению квалификации обслуживающего и монтажно-ремонтного персонала.

б) Организацию регулярного обмена опытом между эксплуатационными работниками отдельных энергосистем в форме созыва конференций, командировок, выпуска бюллетеней и пр.

в) Создание Института усовершенствования инженеров-энергетиков НКЭС по типу Института усовершенствования врачей Наркомздрава путем реорганизации существующего Института повышения квалификации ИТР.

г) Выпуск Инспекцией по эксплуатации методических указаний по работе с персоналом.

д) Возобновление издания противоаварийных циркуляров, содержащих указания на вполне конкретные противоаварийные мероприятия и в первую очередь циркуляров по автоматическому вводу резерва.

а) Скорейший выпуск Госэнергоиздатом руководств и наглядных учебных таблиц по обслуживанию и ремонту для рабочего персонала станций и сетей.

ж) Организация составления с привлечением высококвалифицированных авторов и издание производственных инструкций для рабочих. Ин-

струкции должны иметь четкое и понятное изложение, должны быть снабжены техническими пояснениями и рисунками.

3) Широкое применение автоматики в электрических устройствах и приведение в порядок имеющихся устройств автоматической блокировки.

Технический совет отметил необходимость в дальнейшем помимо технического анализа и брака в работе проводить анализ эксплуатации электростанций и сетей по важнейшим элементам и, в частности, вести учет повреждений оборудования при профилактических испытаниях, а также учет и оценку работы защитной автоматики.

III. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Техническим советом рассмотрен в 1945 г. ряд вопросов, относящихся к проектированию и строительству электрических устройств энергосистем.

Правила устройства заземлений в электрических установках сильного тока. Проектирование и выполнение заземляющих устройств в электрических установках сильного тока высокого и низкого напряжения в течение ряда последних лет производилось на основании устаревших проектов правил, не получивших соответствующего утверждения со стороны Наркомата электростанций.

Вошедшие в практику проектирующих организаций технические нормативы по расчету и устройству заземлений сложны и содержат в некоторых частях излишние требования, неоправданные с точки зрения обеспечения безопасности в современных энергетических системах, сильно расходящиеся с соответствующими нормативами передовых зарубежных стран, удорожающие и замедляющие строительство энергетических установок и усложняющие работу проектных организаций.

В связи с этим Техническим советом была организована специальная комиссия, разработавшая проекты правил устройства заземлений в электрических установках сильного тока напряжением до 1 000 В и аналогичные правила для установок свыше 1 000 В. Подготовленные комиссией проекты правил были рассмотрены и утверждены Техническим советом.

Новые правила облегчают и удешевляют заземляющие устройства и кроме того, регламентируют для многих случаев непосредственно величину сопротивлений заземлений, сокращают и упрощают расчетную работу при проектировании электрических установок.

Технический совет поручил Техническому отделу НКЭС организовать в энергосистемах контроль за состоянием заземляющих устройств и восстановлением заземлений, разрушенных вследствие коррозии или других причин.

Комиссия, разрабатывавшая проекты правил, превращена в постоянную комиссию по заземлениям при Техническом совете, которой поручено

изучать и обобщать отечественный и зарубежный опыт в области заземления электрических установок, намечать направления научно-исследовательской работы по электрическим заземлениям и вносить на рассмотрение Технического совета предложения, направленные к улучшению и упрощению заземляющих устройств.

Руководящие указания по защите от перенапряжения установок переменного тока 3-220 кВ.

Техническим советом НКЭС рассмотрен и утвержден проект руководящих указаний по защите от перенапряжений установок переменного тока 3-220 кВ, разработанный по поручению Технического совета комиссией при кафедре токов высокого напряжения Московского энергетического института им. Молотова.

Утвержденные советом «Руководящие указания» содержат разработанные на основе новейших научных воззрений и опыта эксплуатации требования, которым должна удовлетворять защита от перенапряжений электрических устройств. Они должны заменить прежние выпуски аналогичных руководящих указаний, относящихся к 1938—1941 гг. Содержащиеся в новых указаниях расчетные рекомендации имеют назначением дать указания о направлении и методике расчетов, а также обеспечить более четкую сравнительную оценку защитных мероприятий, проектируемых разными организациями.

Техническим советом поручено кафедре техники высокого напряжения МЭИ с привлечением работников эксплуатации составить в дополнение к новым руководящим указаниям сборник примерных расчетов и схем грозозащиты подстанций и линий.

Одновременно Технический совет предложил Техническому отделу НКЭС организовать в 1946 г. проведение научно-исследовательских работ по следующим темам: исследование условий самопогасания открытых дуг, исследование работы заземлителей при импульсных токах, исследование схем защиты подстанционного оборудования и вращающихся машин, исследование вероятностей поражения молнией сооружений и линий, научно-технический анализ эксплуатационных показателей различных схем грозозащиты подстанций и линий.

Нормы проектирования и правила устройства механической части воздушных линий сильного тока. Специальной комиссией Технического совета в 1945 г. закончена разработка проекта «Норм проектирования и правил устройства механической части воздушных линий сильного тока», которые после их утверждения должны заменить проект «Единых норм проектирования и устройства механической части электрических воздушных линий», выпущенных в 1939 г. Проект 1939 г. не получил в свое время утверждения и в настоящее время является устаревшим.

В новом проекте норм подверглась значительной переработке глава «Расчетные климатические условия», в которой ветровые нагрузки согласованы с ГОСТ на ветер. В проект внесен ряд принципиально новых положений, относящихся к схемам расчета опор, и вводится новый

тип опоры — анкерная опора облегченного типа. Расстояния между проводами, обусловленные координатией изоляции по коммутационным и атмосферным перенапряжениям, взяты в соответствии с новыми «Руководящими указаниями по защите от перенапряжений».

Правила расчета закрепления в грунтах воздушных линий. В непосредственной связи с указанной выше разработкой проекта норм механического расчета воздушных линий находится рассматривавшийся Техническим советом вопрос о правилах расчета закреплений в грунтах опор воздушных электрических линий сильного тока.

Метод расчета закреплений опор в грунте, изложенный в издании «Норм механического расчета», относящийся к 1933 г. и предложенный инженером Кудриным, не получал широкого практического применения вследствие его сложности и спорности ряда основных предположений.

Отсутствие достаточно обоснованного и удобного для практического пользования метода расчета устойчивости опор в грунтах ставит в затруднительное положение проектирующие организации и отражается неблагоприятно на экономичности сооружений в связи с введением повышенных коэффициентов запаса прочности.

Признавая необходимым скорейший выпуск новых правил расчета закрепления опор, Технический совет рассмотрел разработанный по поручению Технического совета кафедрой строительной механики Московского энергетического института им. Молотова под руководством профессора С. С. Крюковского, а также разработанный «Теплоэлектропроектом» под руководством инженера И. А. Рихтера методы расчета закрепления опор в группе.

Отмечая отсутствие в настоящее время экспериментально проверенной теории устойчивости опор в грунтах, Технический совет нашел целесообразным ограничиться выпуском «Временных правил закрепления в грунтах опор воздушных линий сильного тока», и указал положения, которые должны быть положены в основу этих правил. Составление «Временных Правил», инструкции к ним и обоснований выбора расчетных величин коэффициентов запаса поручено Теплоэлектропроекту.

Одновременно Техническим советом принято решение выявить путем экспериментальных исследований в полевых условиях действительную картину физических явлений, происходящих в различных грунтах при работе фундаментов опор, находящихся под воздействием опрокидывающего момента, чтобы, используя полученные результаты, разработать обоснованный метод

расчета закрепления опор в грунтах. Разработка программы экспериментальных исследований поручена Московскому энергетическому институту им. Молотова.

Руководящие указания по проектированию сетей электрических систем. Организованной при Техническом совете комиссией закончена разработка проекта «Руководящих указаний по проектированию сетей электрических систем».

Руководящие указания регламентируют нормальные и аварийные режимы, которые должны рассматриваться при проектировании и содержат рекомендации в отношении коммутации электрических сетей, выбора сечений и материала проводов воздушных линий, регулирования и уровней напряжения в электрических системах.

Основные положения по проектированию промышленных тепловых электростанций средней и малой мощности и тепловых сетей. Техническим советом были рассмотрены с привлечением представителей ряда промышленных наркоматов «Основные положения по проектированию промышленных тепловых электростанций средней и малой мощности и тепловых сетей», проект которых разработан «Промэнергопроектом» НКЭС.

Новейшая механизация монтажных работ по сооружению воздушных и подземных электрических линий. До последнего времени строительство электросетей осуществлялось малоэффективными методами с минимальным использованием специальных машин и механизмов, могущих при широком применении их дать большую экономию как в стоимости, так и в темпах производства работ.

Признавая вопрос механизации работ по сооружению электрических линий особенно актуальным в связи с предстоящим широким развитием энергостроительства, Технический совет указал на необходимость организации серийного производства соответствующих машин, механизмов и приспособлений.

В целях сокращения на строительных участках электрических линий количества различных машин комплексной механизации, Опытным заводом механизации энергохозяйства НКЭС должна быть проведена разработка ряда комбинированных мобильных машин, могущих выполнять одним агрегатом ряд различных операций.

В своем решении Технический совет предложил также организовать подготовку персонала и произвести разработку и выпуск инструкций по обслуживанию и ремонту машин и механизмов линейного строительства.



Научно-техническая конференция по вопросам восстановления и реконструкции городского электротранспорта

15—18 декабря 1945 г. Всесоюзное научное инженерно-техническое общество городского электротранспорта (ВНИТО ГЭТ) созвало в Москве научно-техническую конференцию по вопросам восстановления и реконструкции городского электротранспорта. На конференцию съехались делегаты 40 городов СССР, в том числе Москвы, Ленинграда, Горького, Куйбышева, Киева, Риги, Новосибирска, Баку, Тбилиси и др. В работе конференции приняло участие свыше 200 чел.

Кандидат техн. наук **В. А. Изъюров**, заместитель председателя ВНИТО ГЭТ, открывая конференцию, охарактеризовал задачи, стоящие перед инженерами и техниками городского электротранспорта в новых условиях развития и восстановления народного хозяйства после одержанной СССР победы над врагами.

Затем конференция избрала почетный президиум во главе с товарищем И. В. Сталиным и рабочий президиум и приступила к работе.

На пленарных и секционных заседаниях конференции было заслушано 18 докладов. На конференции работало 6 секций: секция подвижного состава трамвая, троллейбусная секция, секция энергоснабжения, секция пути и секция движения.

Инж. **К. К. Клопов**, начальник Главтрамвая НКХ РСФСР, сделал доклад «Современное состояние, восстановление и перспективы развития городского электротранспорта». В настоящее время в трамвайных предприятиях эксплуатируются свыше 20 типов трамвайных вагонов, которые по своим эксплуатационным и динамическим показателям почти не отличаются от подвижного состава, эксплуатировавшегося 20—30 лет назад. Во многих предприятиях совместно эксплуатируются 5—8 типов вагонов, что крайне усложняет и удорожает содержание и ремонт вагонов. Свыше 35% всех инвентарных вагонов требуют капитально-восстановительного ремонта. Путевое хозяйство находится в крайне неудовлетворительном состоянии, так как в ряде трамвайных предприятий рельсы имеют 30—40-летний срок службы и не менялись с момента укладки. Докладчик подробно остановился на первоочередных задачах, подлежащих разрешению в новой пятилетке, основные из которых: преодоление технической отсталости; возобновление с 1946 г. на заводах союзной промышленности производства современного подвижного состава; осуществление модернизации подвижного состава на основе проекта, разработанного в 1945 г. Управлением горьковского трамвая под руководством ВНИТО ГЭТ и Главтрамвая НКХ РСФСР; переход на поточно-зонный метод ночного осмотра подвижного состава ряда трамвайных предприятий.

Докладчик подробно рассмотрел проект пятилетнего плана развития городского электротранспорта на 1946—1950 гг. Основная задача пятилетнего плана в этой области сводится к полному восстановлению трамваев и троллейбусов в 17 городах РСФСР, подвергшихся разрушениям в результате временной оккупации. Предусматривается строительство новых трамваев и троллейбусов в ряде городов; вместе с тем ставятся задачи реконструкции и расширения существующих трамвайно-троллейбусных предприятий. Особую актуальность приобретает вопрос организации серийного производства запасных частей союзной промышленностью, а также организации в системе НКХ РСФСР централизованного производства маложерновых разнотипных запасных частей и деталей для подвижного состава, контактной сети и путевых спецчастей.

Докладчик подчеркнул необходимость унификации и стандартизации деталей и агрегатов, систем подвески и арматуры контактной сети и т. п. для упорядочения и удешевления эксплуатации, а также необходимость внедрения в практику трамвайно-троллейбусных предприятий передовых технологических процессов (закалка токами высокой частоты, металлизация, штамповка, прессовка и пр.) и внедрения диспетчерского управления на линиях. Особое внимание докладчик уделит задачам подготовки

инженерно-технических и рабочих кадров для городского электротранспорта.

После доклада инж. **К. К. Клопова** развернулись оживленные прения.

Инж. **И. Е. Пох**, председатель президиума Ленинградского отделения ВНИТО ГЭТ, рассказал о работе Ленинградского трамвая в годы Великой Отечественной войны. Несмотря на ограниченный выпуск вагонов на линию (1943 г. — 28% к 1940 г.), Ленинградский трамвай добился высоких эксплуатационных показателей (средняя эксплуатационная скорость в 1943 г. составила 11,7 км, а число пассажиров на вагонокилометр достигло 9,1 против 8,3 в 1940 г.).

Инж. **С. С. Тихомиров**, главный инженер управления московского трамвая, поделился опытом работы в части внедрения новой техники (высокочастотная закалка, испытание тяговых двигателей методом толчковой нагрузки в Октябрьском трамвайном депо и пр.).

Инж. **Ю. М. Галонен** отметил научные проблемы, имеющие важное значение для трамвая и троллейбуса (вопросы выбора системы управления, типа вагона, индивидуального учета электроэнергии, выбора наилучшего режима движения, рекуперации энергии, выбора типа тягового двигателя, безреостатного пуска, борьбы с шумом, комплекс вопросов по энергоснабжению, включающий применение автоматизированных подстанций, оборудованных современными типами ртутных выпрямителей и др., внедрение в производство современных методов контроля: электромагнитной дефектоскопии и др.) и обосновал необходимость концентрации всех научно-исследовательских работ в одном центре — Научно-исследовательском институте городского электротранспорта СССР. Создание такого института, оснащенного мощной экспериментальной стационарной и передвижной лабораторной базой, позволит быстрее и лучше разрешить вопросы, связанные с реконструкцией, восстановлением и внедрением новых типов подвижного состава городского электротранспорта.

Инж. **Г. И. Шульга**, главный инженер архангельского трамвая, рассказал о работе архангельского трамвая, уделив особое внимание рационализаторской деятельности предприятия (электродомкраты, трамвайный снегорез и др.). За время войны было построено такое количество новых грузовых путей, которое архангельский трамвай не имел за все годы мирного существования.

Инж. **Н. А. Смирнов**, главный инженер рижского трамвая, поделился опытом работы, указав, что, несмотря на наличие в Риге трамвайных вагонов устаревших конструкций, последние работают практически бесшумно вследствие применения шлифовки рельсовых стыков и рельс с помощью специального шлифовального вагона, а также благодаря шлифовке бандажей; эксплуатационная скорость доведена до 15,5 км/ч; плотность подвижного состава на линии составляет 2,6 ваг/км пути.

Инж. **М. И. Грязев**, главный инженер сталинградского трамвая, рассказал о восстановительных работах, проведенных трамваем.

Инж. **Е. Ш. Гершгорин**, главный инженер трамвайно-троллейбусного управления УССР, отметил, что существовавшие до войны 22 трамвайных и 4 троллейбусных предприятия в результате оккупации были выведены из строя. В настоящее время уже действуют 21 трамвайное предприятие и все троллейбусные. В 1946 г. на трамваях Украины предполагается внедрять новую технику и в частности высокочастотную закалку. По решению Украинского правительства в 1945 г. велись подготовительные научно-исследовательские работы по высокочастотному транспорту, а в 1946 г. должен быть построен первый опытный участок высокочастотного транспорта.

Инж. **С. С. Тихомиров**, главный инженер Управления московского трамвая, сделал доклад: «Новые типы

подвижного состава трамваев на перспективу», в котором сообщил, что подвижный состав Москвы располагает 2166 моторными и прицепными вагонами. Основные эксплуатационные показатели: скорость сообщения 14 км/ч; ускорение 0,5—0,6 м/сек²; замедление 0,6—0,7 м/сек². Московский трамвай нуждается в срочном пополнении парка подвижного состава как путем введения в эксплуатацию новых вагонов, так и за счет замены старых вагонов. В течение новой пятилетки вагонный парк Москвы должен быть доведен до 2300 ходовых единиц.

В докладе был дан подробный анализ трамвайным вагонам новейших конструкций США и Европы. Опыт эксплуатации вагонов типа РСС показал, что при применении вагонов этого типа пробег подрезиненных колес достигает 160 тыс. км; скорость по графику возрастает на 7,7%; стоимость обслуживания снижается на 5—10%; уменьшается износ рельс и тормозных колодок. Рассматривая трамвайные вагоны Германии, докладчик отмечает основную тенденцию немецких трамваев — максимально возможное конструктивное упрощение, часто в ущерб техническим качествам и безопасности движения (барabanная тормоза на валу двигателя, соленоидные тормоза, ручной тормоз).

Докладчик считает нецелесообразным строить ни один из существующих в СССР типов вагонов, вследствие присущих им крупных недостатков. Вместе с тем докладчик считает нецелесообразным принятие к постройке вагонов типа РСС без конструктивных изменений. Вагоны типа РСС рентабельны только при большой частоте движения и при малой длине перегонов (до 200 м). Быстрое освоение вагонов типа РСС затрудняется наличием ряда сложных узлов и конструкций.

К постройке опытных образцов новых вагонов этого типа необходимо, однако, приступить немедленно.

Технический проект вагона, разработанный Центральным конструкторским бюро Управления московского трамвая, учитывает возможно большее конструктивное облегчение и упрощение вагона с тем, чтобы при переходе к постройке вагонов типа РСС потребовались минимальные конструктивные изменения. Основные параметры нового вагона промежуточного типа: длина 13 м; ширина 2,55 м; вес 19 т, управление — кулачковым контроллером; тяговые двигатели — трамвайной подвески; ускорение вагона 0,8 м/сек²; максимальная скорость на площадке — 60 км/ч.

Инж. Л. Я. Лехтман, начальник Бюро подвижного состава завода «Динамо» им. Кирова, сделал доклад «Новый вагон и модернизация существующего подвижного состава», в котором охарактеризовал тенденции развития трамвайных предприятий в Европе и США за последние 10—15 лет и остановился на роли трамвая в СССР.

Докладчик считает бесспорно целесообразным применение в СССР вагонов новейших конструкций типа РСС. Решения предыдущего трамвайного съезда и широко развернувшаяся дискуссия по этому вопросу в технической печати (Электричество № 11—12, 1944, № 1—2 и № 5, 1945) подтверждают единство технической мысли по данному вопросу. Советская промышленность имеет все технические возможности для проектирования и изготовления вагонов типа РСС и их электрического оборудования. Необходимо начать и провести проектирование и изготовление новых вагонов в кратчайший срок. Для достижения этой цели необходимо широкое кооперирование между московскими заводами. Желательно предварительное изучение в США опыта эксплуатации и производства вагонов типа РСС специалистами городского электротранспорта СССР.

Кандидат техн. наук Г. И. Васильев (Академия коммунального хозяйства) сделал доклад «Серия трамвайных вагонов новейшей конструкции». Докладчик охарактеризовал трамвай как мощный вид городского транспорта, способный к значительному усовершенствованию. Трамвай будет играть еще долго важную роль среди остальных видов городского транспорта. Распределение пассажироперевозок (в %) по данным докладчика представляется в перспективе в следующем виде:

Годы	Трамвай	Троллейбус	Автобус	Метрополитен	Итого
1939	86	3,5	7	3,5	100
1960	50	10	30	10	100

Пассажиропотоки, подлежащие освоению трамваем в будущем, будут колебаться от 3 млн. до 18 млн. пассажирокилометров на 1 км пути в год. Такие пассажиропотоки могут быть освоены трамвайными поездами: четырехосными вагонами и вагонами более емкими. Более емкие трамвайные поезда, чем четырехосные 15-м трамвайные вагоны, могут быть подразделены: на поезда, состоящие из одного моторного и одного или двух прицепных вагонов; поезда, состоящие из одних моторных двухосных или четырехосных вагонов, управляемых по системе многих единиц; сочлененные вагоны типа змейка.

Проект серии трамвайных вагонов новейшей конструкции, разработанный Академией коммунального хозяйства, состоит из следующих типов трамвайных вагонов: а) бестележного двухосного вагона; четырехосного 15-м вагона; в) двойного сочлененного вагона типа змейка; г) тройного сочлененного вагона типа змейка. Основным типом серии является четырехосный 15-м трамвайный вагон. Сочлененный кузов трехкузовной змейки имеет среднюю вставку. Если количество этих вставок постепенно увеличивать, то можно получить вагоны типа змейка любой емкости, что позволяет в случае необходимости освоить практически любые пассажиропотоки.

Докладчиком приводятся основные параметры серии новых вагонов по сравнению со старыми. Существующий четырехосный вагон Коломенского завода при длине 12,7 м весит 21,7 т, тогда как четырехосный вагон новой серии при длине 15,2 м будет весить всего 15 т; двойной сочлененный вагон при длине 22,8 м будет весить 21,5 т; вес тройного сочлененного вагона при длине 31,8 м составит 29 т. Относительный вес вагона новой серии составит около 400 кг/м² площади пола, тогда как вагоны старого типа имеют вес 975 кг/м². Максимальная вместимость нового четырехосного вагона составит 151 чел.; двойного сочлененного вагона — 225 чел., а тройного — 315 чел., при максимальной вместимости четырехосного вагона существующего типа — 100 чел.

Трамвайные вагоны новой серии оборудуются быстроходными серийными тяговыми двигателями, мощными тормозами и автоматической системой управления, благодаря чему вагоны имеют одинаковые скоростные и тормозные характеристики, близкие к автотранспорту, которые дают возможность совместной эксплуатации на одних и тех же маршрутах вагонов как сочлененного, так и не сочлененного типа. Вагоны новой серии будут развивать установившуюся скорость в 65 км/ч при скорости сообщения 24 км/ч. Конструктивная скорость новых вагонов составляет 80 км/ч. Пусковое ускорение — 2 м/сек², тормозное замедление — 1,5 м/сек².

После докладов С. С. Тихомирова, Л. Я. Лехтмана и Г. И. Васильева развернулись прения, результаты которых нашли отражение в резолюции, разработанной на заседании секции подвижного состава.

Доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд представил доклад «О повышении напряжения в контактной сети городского электротранспорта». Намечаемое применение нового подвижного состава и увеличение размера движения на городском электротранспорте крайне затруднит его энергоснабжение, вызовет значительное увеличение стоимости сети и подстанций и обусловит огромный расход цветного металла.

При современном состоянии техники электрооборудование трамвая и троллейбуса вполне может быть построено на более высоком напряжении, чем существующее в настоящее время и исторически установившееся напряжение 550 В. Во многих случаях электрооборудование при повышенном напряжении работает лучше и экономичнее. Применяемые на подстанциях ртутные выпрямители могут быть построены на значительно более высоком напряжении чем 600 В, причем с повышением напряжения увеличивается их мощность и улучшается к. п. д. Напряжение 750 В, хорошо зарекомендовавшее себя на мет-

пополитене и промышленном транспорте, не вызывая значительного усложнения электрооборудования, дает большой экономический эффект в отношении удешевления и облегчения всего электрохозяйства. По произведенным предварительным подсчетам ряда существующих трамвайно-троллейбусных сетей переход от напряжения 550 В к напряжению 750 В уменьшает почти в два раза общую затрату меди и в два с половиной — три раза необходимое количество кабеля.

Для суждения о работе подвижного состава при повышенном напряжении следует построить опытные образцы электрооборудования трамвайных вагонов и троллейбусов при напряжении 750 В и испытать оборудование подстанций и контактной сети при этом напряжении. Необходимо осуществить постройку какого-либо из сооружаемых новых трамвайных предприятий для работы при напряжении 750 В, чтобы установить степень надежности и эксплуатационных характеристик трамваев, работающих на напряжении 750 В.

Инж. М. Н. Шполянский, главный инженер треста «Мостроллейбус», сделал доклад «Новые типы и модернизация существующих троллейбусов».

За 12 лет своего существования троллейбусный транспорт СССР занял по масштабу развития третье место в мире (после Англии и США), а столичный транспорт Москвы — второе место в мире, уступая лишь лондонскому троллейбусу. Следует отметить исключительный интерес, проявляемый к троллейбусному транспорту городами СССР, в результате чего за короткий период своего существования троллейбус уже эксплуатируется в 15 городах, строится сейчас в трех городах и намечен к строительству на ближайший период времени еще в 14 городах СССР. Параллельно с количественным ростом подвижного состава троллейбуса повысились и его качественные показатели. В течение семи предвоенных лет в этой области достигнуто: повышение динамических свойств машины — до 40%, снижение веса до 20%, создание удобной системы управления, надежной механической передачи и тормозной системы, а также значительное повышение комфортабельности троллейбуса.

Выпущенный в 1941 г. опытный образец троллейбуса типа ЯТБ-5 показал вполне удовлетворительные эксплуатационные качества. Этот тип троллейбуса является последним типом троллейбуса смешанной конструкции (с деревянным каркасом кузова). Этот тип одноэтажного троллейбуса, поскольку он технологически наиболее подготовлен к производству в системе Наркомата среднего машиностроения и Наркомата электропромышленности, может в наиболее короткие сроки поступить в эксплуатацию городов СССР. Поэтому троллейбус типа ЯТБ-5 после устранения отдельных недостатков может рассматриваться как переходный тип троллейбуса.

Новый тип троллейбуса будет изготавливаться цельнометаллической конструкции с автоматической системой управления. В связи с организацией в СССР производства новых цельнометаллических автобусов вагонного типа весьма актуальной является постановка вопроса об изготовлении новых троллейбусов с цельнометаллическим кузовом, унифицированным с новым автобусом в своих основных конструктивных элементах.

На базе постройки и опыта эксплуатации цельнометаллического троллейбуса уже в новой пятилетке должны быть развернуты работы по созданию серии троллейбусов для СССР, включающей в себя машины как одноэтажного так и двухэтажного типа, что предусмотрено решениями XVIII Съезда ВКП(б) и подтверждено опытом эксплуатации двухэтажных троллейбусов.

Инж. Л. Я. Лехтман, сделал также доклад: «Перспективы развития троллейбуса», в котором отметил высокий технический уровень изготавливаемого электрооборудования для троллейбуса типа ЯТБ-4а по сравнению с современными европейскими и американскими образцами. Основным типом троллейбуса на перспективу должен явиться многоместный комфортабельный троллейбус (на 40—42 места) с высокими динамическими показателями, с двигателем повышенной мощности и автоматической системой управления, в соответствии с лучшими американскими образцами. Необходимо форсировать проектирование и изготовление опытных образцов троллейбу-

сов нового типа на заводах электропромышленности и авиапромышленности.

В прениях по докладам М. Н. Шполянского и Л. Я. Лехтмана инж. Я. А. Рейфер (Ленинград) поделился опытом эксплуатации ленинградского троллейбуса, указав, что ленинградцы применили конструкцию головки скользящего токоприемника типа «Мостроллейбус», которая показала высокие эксплуатационные качества. Наряду с этим можно отметить, что типы московских пересечений уступают применяемым в Ленинграде, где конструкция пересечений допускает скорость движения в 18 км/ч. Необходимо разработать новые усовершенствованные конструкции пересечений на базе ленинградских конструкций, скорость движения на которых могла бы быть поднята до 25—30 км/ч.

Кандидат техн. наук Г. И. Васильев обратил внимание на необходимость приспособления троллейбуса к пассажиропотокам, указав при этом на целесообразность постройки не отдельных типов троллейбусов, а целой серии одноэтажных и двухэтажных двух- и трехосных троллейбусов различной емкости. Такая серия троллейбусов разработана ВНИТО ГЭТ по инициативе треста «Мостроллейбус» и Академии коммунального хозяйства.

Инж. Ю. М. Галонен посвятил свое выступление вопросу снижения потерь электроэнергии на электро-транспорте и в частности внедрению схем безреостатного пуска с применением метадина и амплидина. Эффективность рекуперации электрической энергии составляет для троллейбуса порядка 5,5%; можно и должно создать такую схему, при которой процент рекуперации будет увеличен. В целях обмена опытом в области электро-транспорта необходимо создание технического журнала по вопросам электрической тяги.

Инж. В. Д. Соколов отметил отставание в производстве конструкции арматуры и спецчастей контактной сети. Для ликвидации этого отставания необходима организация специального завода, обеспечивающего производство арматуры контактной сети. Такой завод вполне себя оправдывает, если учесть, что введение в строй в ближайшие годы 1000 троллейбусов потребует строительства 300 км троллейбусных линий.

Заседание 18 декабря 1945 г. И. Е. Пох открыл сообщением, посвященным памяти талантливого организатора и крупнейшего инженера в области городского электро-транспорта — руководителя Всесоюзного научного инженерно-технического общества городского электротранспорта П. К. Пешекерова, скончавшегося 80 лет от роду 18 декабря 1943 г. Делегаты конференции почтили память Петра Кирилловича Пешекерова вставанием.

На секции подвижного состава инж. И. А. Юдов, главный инженер Управления горьковского трамвая, сделал доклад «Модернизация трамвайных вагонов Мытищинского и Усть-Катавского заводов». При выпуске новых вагонов существующие типы вагонов еще долгое время будут находиться в эксплуатации. Около 75% подвижного состава трамвая найдет себе применение в течение длительного срока от 8 до 10 лет и только 25% будет списано за негодностью в ближайшие годы. Значительную часть наличного подвижного состава трамвайных предприятий СССР составляют вагоны выпуска Мытищинского и Усть-Катавского заводов. Число этих вагонов в трамвайных предприятиях СССР достигает 3 тыс. единиц, а с прицепными вагонами Мытищинского завода, эксплуатируемыми в Москве, число этих вагонов достигает 4 тыс. шт. Для устранения основных эксплуатационных и конструктивных недостатков и для улучшения эксплуатационных и динамических качеств вагонов возникает необходимость модернизации вагонов устаревших типов.

Первоочередные мероприятия при проведении модернизации предусматривают: перевод моторных вагонов на одностороннее управление; замену устаревших контроллеров, не имеющих линейных контакторов, на контроллеры кулачкового типа; установку крышевых реостатов; замену устаревших маломощных тяговых двигателей двигателями типа ДТИ-60; перепланировку кузова, с предусмотрением кабины водителя; унификацию частей пневматического и механического оборудования. Намеченные мероприятия по модернизации могут быть осуществлены средствами пред-

приятый, при проведении плановых капитальных больших и средних ремонтов. Стоимость модернизации составляет порядка 20—30 тыс. руб. на один вагон. Модернизация опытного трамвайного поезда в соответствии с проектом, утвержденным Коллегией Наркомхоза РСФСР проведена горьковским трамваем, под руководством ВНИТО ГЭТ и Главтрамвая НКХХ РСФСР; модернизированный поезд находится в опытной эксплуатации.

Инж. П. В. Маренков, начальник службы подвижного состава Управления московского трамвая, сделал доклад «Восстановление и ремонт подвижного состава трамвая». В результате систематического недовыполнения плановых ремонтов подвижного состава в депо и на заводе, низкого качества профилактических вагонов, вагоны начали выходить из строя. В декабре 1943 г. выпуск вагонов на линию в Москве упал до 1360 вагонов, а в марте 1944 г. снизился до 827 вагонов против довоенного уровня в 2 222 вагона.

Управление московского трамвая должно было восстановить до августа 1944 г. 1 089 вагонов. Для этого в каждом депо был создан специальный цех по восстановлению вагонов. В результате помощи правительства выпуск вагонов к октябрю 1944 г. достиг 1 618 вагонов, а на 1 января 1945 г. оставалось не восстановленными всего 93 вагона. За время Отечественной войны Управлением московского трамвая была проведена значительная работа по изменению и усилению отдельных узлов вагонов и увеличению срока их службы. Введена гермическая обработка токами высокой частоты; внедрены кулачковые контроллеры. При производстве ремонтов хорошо себя зарекомендовали на сквозных канавах поточный метод ночного осмотра, а на тульиковых канавах — ступенчатый осмотр.

Кандидат техн. наук **В. А. Изъюров** сделал доклад «Техника восстановительного ремонта трамвайных вагонов», в котором подчеркнул большое значение в ремонтных работах уровня технической культуры производства и остановился на вопросах содержания и технологии ремонтов. По мнению В. А. Изъюрова электросварка ослабляет основной металл, который нагревается в первой зоне сварки до $1\,500^{\circ}\text{C}$, во второй до $1\,200\text{—}1\,400^{\circ}\text{C}$; в третьей до $900\text{—}1\,100^{\circ}\text{C}$, в четвертой до $600\text{—}800^{\circ}\text{C}$; основной металл теряет свои физические свойства уже во второй и третьей зонах сварки. Поэтому недопустимо восстанавливать электросваркой конструктивные элементы, несущие нагрузку, равную или близкую к расчетной. Здесь должен применяться исключительно метод шпигирования. Шпигированием может восстанавливаться изношенная резьба конца вала якоря, изношенные трущиеся поверхности, в том числе шлифовальные вагонные оси и якорные валы.

Докладчик отметил неправильность суждения о качестве изоляции электрооборудования по величине сопротивления изоляции, измеренной мегомметром. Колебания сопротивления изоляции в зависимости от температуры весьма значительны: так, например, сопротивление изоляции тягового двигателя с изоляцией класса А при $+15^{\circ}\text{C}$ в 150 раз больше, чем при температуре $+75^{\circ}\text{C}$, что требует внесения понятия «индекса состояния изоляции», не зависящего от температурных условий.

Докладчик обратил также внимание на процесс сушки инфракрасными лучами, получивший широкое распространение в Англии и США, в частности для сушки пропитанных изоляционным лаком обмоток электрических машин. Сушка при применении инфракрасных лучей происходит в 10 раз быстрее, чем при обычных методах сушки.

На троллейбусной секции инж. **Ю. М. Галонен** в докладе «Применение аккумуляторной тяги на городском электротранспорте» дал обзор последовательного развития электромобилей и рассмотрел их преимущества перед автотранспортом в определенных видах перевозок системы городского хозяйства (см. статью «Электромобили» — Электричество, № 11, 1945).

Выступая в прениях по докладу г. Галонена, инж. **И. С. Ефремов** — директор троллейбусного завода, поделился с делегатами опытом эксплуатации и некоторыми результатами испытаний первого советского троллей-

электромобиля, показавшим, что максимальная грузоподъемность достигает $4\,350\text{ kg}$, а радиус действия при меньшей грузоподъемности достигает 40 km/h при скорости в 20 km/h . Наряду с недостатками первой опытной конструкции, в частности несовершенством электрической схемы, обусловленным отсутствием специальной аппаратуры, **И. С. Ефремов** отметил положительный опыт, полученный при испытаниях троллей-электромобиля, с зарядкой аккумуляторов при работе под контактным проводом.

Все выступавшие в прениях пришли к единодушному выводу, что все виды как электромобильного, так и троллей-электромобильного транспорта, должны будут найти применение в системе городского хозяйства.

Инж. И. С. Ефремов сделал доклад: «Организация техники ремонта троллейбусов» и ознакомил конференцию с системой планово-предупредительного ремонта троллейбусов, оправдавшей себя в результате 12-летнего опыта эксплуатации.

На секции энергоснабжения доц. **С. М. Мессерман** сделал доклад: «Новые типы оборудования и направление при проектировании тяговых подстанций», в которой охарактеризовал состояние производства и новые виды высоковольтной аппаратуры и подчеркнул большое значение для тяговых подстанций комплектных распределительных устройств. Большое значение по мнению докладчика имеют современные типы ртутных выпрямителей. Одним из неразрешенных вопросов на подстанциях является питание цепей собственных нужд тяговых подстанций, для которых с успехом могут быть использованы компактные твердые выпрямители. При производстве коммутационной аппаратуры промышленностью должны быть учтены нужды городского электротранспорта и в частности потребность, обуславливаемая автоматизацией тяговых подстанций.

Инж. В. Д. Соколов, главный инженер службы контактной сети треста «Мосэлектротранс», сделал доклад «Новые типы и модернизация оборудования контактной сети трамвая и троллейбуса».

На секции пути доц. **В. Г. Сосянц**, руководитель сектора городского транспорта Академии коммунального хозяйства, сделал доклад «Новые конструкции пути в четвертой пятилетке».

Инж. П. С. Чудинов, главный инженер службы пути Управления московского трамвая, посвятил свой доклад «Организации содержания пути московского трамвая».

На секции движения кандидат техн. наук, доцент **В. К. Петров** сделал доклад «Практические методы организации и регулирования движения на городском электротранспорте».

На той же секции инж. **А. И. Томили**, главный инженер службы движения московского трамвая, сделал доклад: «Организация движения на московском трамвае».

По всем докладам были вынесены развернутые решения, способствующие развитию и улучшению городского электротранспорта.

После закрытия конференции состоялся расширенный пленум Правления ВНИТО ГЭТ, на котором были заслушаны: отчет Оргбюро о деятельности в 1945 г. (докладчик кандидат техн. наук **В. А. Изъюров**, заместитель председателя ВНИТО ГЭТ) и доклад ревизионной комиссии (докладчик инж. **Е. В. Овечников**). Пленум дал положительную оценку работе Оргбюро ВНИТО ГЭТ, отметив необходимость дальнейшего усиления технической помощи трамвайно-троллейбусным предприятиям и скорейшей реализации решений конференции.

Пленум ВНИТО ГЭТ утвердил новый состав Правления общества: **В. Е. Розенфельд** (председатель), **В. А. Изъюров** (заместитель председателя), **И. Т. Серебряков**, **К. К. Клопотов**, **М. Н. Шполянский**, **Б. Г. Иванов**, **И. Е. Пох**, **А. И. Литвиненко**, **С. С. Тихомиров**, **П. В. Маренков**, **Г. М. Смирнов**, **И. А. Юдов**, **В. Г. Сосянц**, **Л. Я. Лехтман**, **П. В. Шевяков**.

Инж. Ю. М. ГАЛОНЕН



Новый стандарт на тяговые электродвигатели

В начале 1944 г. в связи с предстоявшим тогда возобновлением производства тяговых электродвигателей завод «Динамо» им. С. М. Кирова разработал проект нового стандарта на тяговые электродвигатели постоянного тока.

Проект этот был утвержден 30 июня 1944 г. ВКС при СНК СССР как ГОСТ 2582-44 со сроком введения с 1 января 1945 г. и заменил утвержденный еще в 1937 г. ОСТ/НKM 4320.

Ниже приводится аннотация нового стандарта и сравнение его с отмененным ОСТ/НKM 4320.

Стандарт распространяется на все типы тяговых электродвигателей постоянного тока и содержит следующие разделы: «Определения», «Классификация», «Технические условия», «Правила приемки», «Методы испытаний», «Маркировка, упаковка и паспортизация».

Новый стандарт построен на базе утвержденного ВКС в 1941 г. ГОСТ 183-41 «Машины электрические. Основной стандарт» и поэтому в ряде случаев стандарт ограничивается ссылками на него (например, в части определения классов изоляции, требований к электрической прочности изоляции, методов испытания на нагревание).

В разделе «Определения» стандарта даны определения номинального напряжения, часовой и длительной мощностей, токов и рабочих характеристик тяговых электродвигателей. По сравнению с ОСТ/НKM 4320 этот раздел подвергся лишь редакционным уточнениям.

В разделе «Классификация» приведено подразделение тяговых электродвигателей по системе возбуждения (электродвигатели с серийным возбуждением, с регуляторной или без регуляторной возбуждения, и электродвигатели с компаундным возбуждением, с регуляторной возбуждения) и по системе охлаждения (электродвигатели без вентиляции, с самовентиляцией и с независимой вентиляцией). Данный раздел также существенно не отличается от соответствующих параграфов старого стандарта.

Раздел «Технические условия» по ряду пунктов существенно изменен по сравнению с ОСТ/НKM 4320.

В разделе приведена следующая шкала номинальных напряжений у токоприемника, для которых впредь должны изготавливаться тяговые электродвигатели: 220, 250, 600, 825, 1 650 и 3 300 В. Изготовление электродвигателей на напряжения у токоприемника — 550, 750, 1 500 и 3 000 В, которые до введения нового стандарта являлись номинальными, допускается лишь для старых, т. е. спроектированных до срока введения нового стандарта, электродвигателей.

Изменение шкалы номинальных напряжений произведено, исходя из фактических напряжений, имеющих место на ряде действующих установок, и соответствует шкале номинальных напряжений ртутных выпрямителей, установленной ГОСТ 2329-43 «Выпрямители ртутные». Изменение это принято по требованию НКПС и согласно заключению специально созданной ВКС экспертной комиссии.

В раздел включено отсутствующее в старом стандарте требование о допустимом повышении напряжения в сети у токоприемника. Электродвигатель должен удовлетворительно работать при повышении напряжения на 15% выше номинального при двигательном режиме и на 20% — при генераторном — рекуперативном режиме. Аналогичное требование имеется в стандарте Американского института инженеров-электриков (АИЕЕ) на тяговые электродвигатели издания 1943 г.

Допустимое стандартом превышение температуры частей тяговых электродвигателей при испытании их на стенде над температурой окружающей среды (+25°С) приведено в таблице, причем для обмоток закрытых электродвигателей допустимое превышение температуры повышается на 10°С, а для обмоток с изоляцией класса В электродвигателей с независимой вентиляцией при длительном режиме — на 15°С против значений, указанных в таблице.

Части электродвигателя	Измерение по методу	Превышение температуры			
		Часовой режим		Длительный режим	
		Классы изоляции			
		A	B	A	B
°C					
Обмотки якоря	Сопротивления	100	120	85	105
	Термометра	75	90	65	80
Обмотки полюсов	Сопротивления	100	130	85	115
	Термометра	75	100	65	90
Коллектор	Термометра	95			
Подшипники	Термометра	55			

Как видно из этой таблицы, в нее внесены существенные изменения по сравнению с аналогичной таблицей ОСТ/НKM 4320.

Наиболее существенными изменениями являются:

1. Повышение на 10°С допустимого превышения температуры обмоток полюсов с изоляцией класса В по сравнению с превышением температуры обмотки якоря, поскольку в эксплуатации катушки полюсов находятся в более благоприятных условиях, чем обмотка якоря (в старом стандарте для тех и других была нормирована одинаковая температура).

2. Установление единого допустимого превышения температуры для коллектора вне зависимости от класса изоляции обмоток и режима работы электродвигателя.

В стандарте указаны допустимые в эксплуатации предельные температуры обмоток электродвигателя (рекомендуемые), причем они не изменены по сравнению с приведенными в ОСТ/НKM 4320.

Следует также отметить, что допуск на отклонение числа оборотов отдельных электродвигателей при часовой мощности от значения, установленного при типовых испытаниях, снижен с 5% до 4%.

В разделе «Методы испытаний» введено требование об испытании на повышенную скорость вращения электродвигателей, спроектированных после введения нового стандарта, при скорости вращения, превышающей на 20% гарантированную максимальную скорость вращения (для старых электродвигателей как в ОСТ/НKM 4320, так и в новом стандарте предусмотрено испытание при скорости вращения, повышенной на 10%). Это вызвано выявившейся необходимостью повышения эксплуатационного запаса прочности электродвигателей.

В этом же разделе утяжелены условия проверки коммутации. Согласно ОСТ/НKM 4320 коммутация проверялась только при номинальном напряжении током, равным удвоенному значению часового тока электродвигателя. Новым стандартом предусмотрена кроме того проверка коммутации при напряжении 1,15 номинального и при максимальной скорости вращения электродвигателя.

Инж. У. М. ЛИТВАКОВ

ЭНЕРГЕТИКА

Ветроэлектрическая энергия. *El. World, стр. 8, № 14, 1945; стр. 73, № 17, стр. 102, № 19, 1945; Power, стр. 55—59 и 90, № 6, 1941; стр. 64—68, № 6, 1945.*

Самой мощной в США ветроэлектростанцией является экспериментальная «ветровая турбина» 1 000 kW, сооруженная близ Рутленда в штате Вермонт. Ветроустановка, установленная на башне в 33,5 м, предназначена для работы в местной электроэнергетической системе. Ветроустановка работает при постоянной скорости вращения ветродвигателя и оборудована электрическим генератором переменного тока 60 Hz. С октября 1941 г. по март 1945 г. ветроэлектростанция выработала 360 тыс. kWh; всего она находилась в работе 1 030 h; из них 838 h установка работала со средней мощностью 431 kW параллельно с электрической системой.

В марте 1945 г. ветровая турбина потерпела крупную аварию и временно вышла из строя: на ходу отломилась лопасть колеса ветродвигателя весом 7 т.

В проекте Федеральной энергетической комиссии FPC рассматриваются два варианта ветроэлектростанций в 7 500 kW и в 6 500 kW.

По первому варианту, ветроэлектростанция мощностью 7 500 kW, предусматриваются 2 двухлопастных ветротурбинных колеса, установленных на концах 60 м мостика, который укреплен на 150 м металлической башне. Посредством вала и зубчатых передач ветродвигатели

совместно приводят электрический генератор постоянного тока, установленный на том же мостике в центральном машинном помещении. Обороты двигателя пропорциональны силе ветра в пределах до скорости 15 m/sec (55 km/h), при которой скорость вращения колеса составляет 42,75 об/мин, и расчетная мощность электростанции достигает 7 700 kW. Генератор рассчитан на эксплуатационное изменение числа оборотов от 40 до 100% расчетных. Генератор постоянного тока питает вращающийся преобразователь (вариант-инвертор), который отдает электроэнергию в виде переменного тока в сеть. Управление сводится лишь к регулированию мощности ветровой турбины и соответственно ее скорости. Напряжение генератора постоянного тока определяется оборотами ветродвигателя и током возбуждения (рис. 1).

Нагрузка ветродвигателей регулируется путем автоматического воздействия на возбуждение генератора и изменением коэффициента трансформации с той целью, чтобы удерживать обороты ветродвигателя и отдачу энергии в сеть в соответствии со скоростью ветра в границах нормального эксплуатационного режима.

В условиях, когда скорость ветра превышает 15 m/sec, число оборотов ветродвигателя поддерживается постоянным или же несколько снижается во избежание явления перегрузки. При опасных штормах или при угрозе обледенения установка выключается. Ветроэлектростанции этого типа и мощности предназначаются для работы в районах со средней скоростью ветра 10—11 m/sec.

Для районов США, характеризующихся меньшими средними скоростями ветра 8—9,5 m/sec, разработан второй тип ветроустановки мощностью 6 500 kW, которая достигается при ветре в 12,5 m/sec. В этом варианте два трехлопастных ветродвигателя устанавливаются на башне высотой 145 м. Растяжки лопастей в этом случае помещаются в наветренной стороны колеса, вследствие чего им придан требуемый аэродинамический профиль.

Ветровая электроэнергия характеризуется рядом важных преимуществ: она экономична и запасы ее практически неограничены; ветроэнергетика обычно не связана с повышенными затратами на передачу электроэнергии, так как последняя может генерироваться вблизи центров потребления, нередко удаленных от источников гидроэнергии и топлива; ветроэнергия повышает устойчивость электроэнергетической системы благодаря вводу многих рассредоточенных мощностей со значительными маховыми массами и с характеристиками стационарного режима, содействующими стабилизации напряжения.

На рис. 2 показан характер участия ветроэлектрической энергии в покрытии суточного графика нагрузки системы совместно с тепловыми электростанциями, а также с гидроэлектростанциями различной степени зарегулированности. При этом принято: суточный максимум нагрузки — 2 000 000 kW, суммарная установленная мощность ветроэлектростанций — 600 000 kW, расчетное участие их в максимуме — 300 000 kW, годовая выработка ветроэнергии — $2,63 \cdot 10^9$ kWh.

В этих условиях стоимость ветроэнергии составит 0,134 центов за 1 kWh или 0,204 центов за 1 kWh, соответственно при постоянной составляющей годовых издержек равной 6% или 10,5% от затраченного капитала. Удельные капиталовложения в ветроэлектростанцию мощностью 7 500 kW по проекту составляют 68 долл. на 1 kW установленной мощности, при условии одновременного или последовательного сооружения 10 таких установок в двух или трех пунктах. Соответствующие капи-

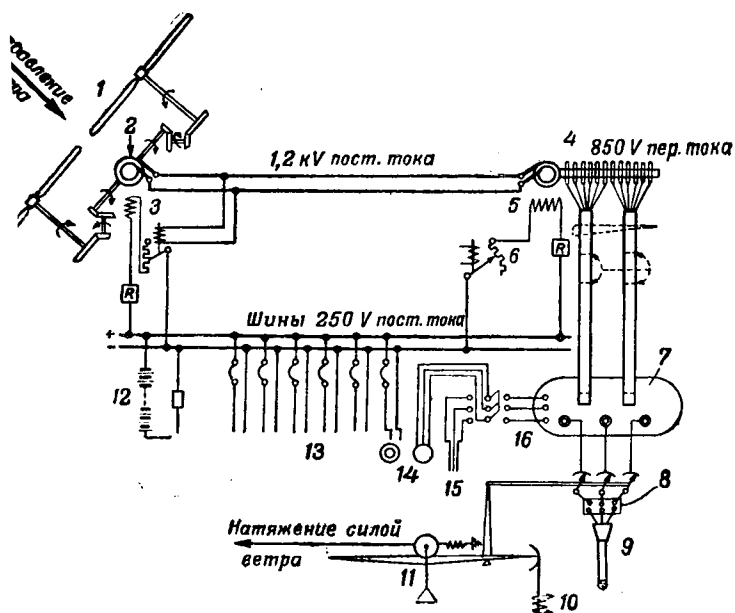


Рис. 1. Принципиальная схема ветроэлектростанции мощностью 7 500 kW.

1—две ветровые турбины; 2—генератор постоянного тока 7 500 kW, 1 200 V; 3—возбуждение генератора; 4—12-фазный вращающийся преобразователь; 5—возбуждение вращающегося преобразователя; 6—регулятор коэффициента мощности вращающегося преобразователя; 7—8 000 kVA трансформатор 66 000/850 V, 12 фаз; 8—36 kV масляный выключатель; 9—трехфазный 66-kV кабель; 10—ваттметр, измеряющий нагрузку; 11—регулятор мощности; 12—аккумуляторная батарея; 13—местные нужды; 14—моторгенераторная установка; 15—резервная дизельная установка; 16—трехфазная 550-V линия от трансформатора.

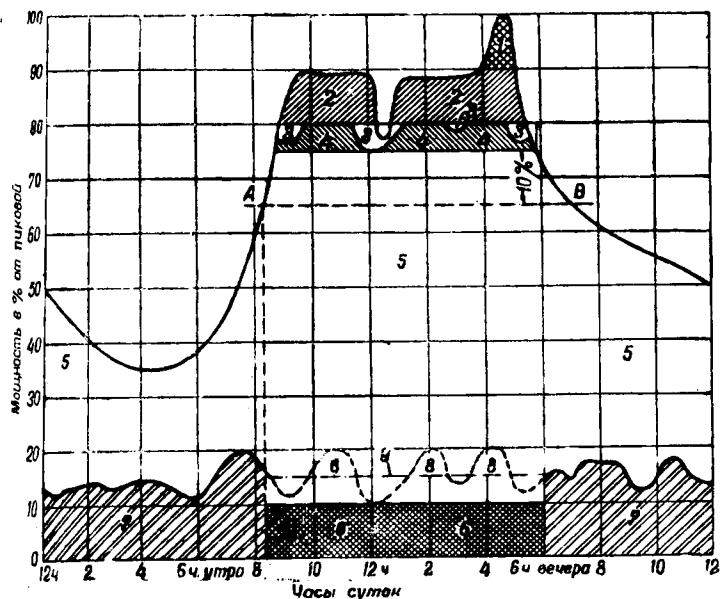


Рис. 2. Характерная схема участия ветроэнергии в покрытии суточного графика электроэнергетической системы в маловодный период года.

1—гидроэлектрическая энергия от сезонного регулирования; 2—то же от стока реки и суточного регулирования; 3—то же, выравнивающая ветроэнергия и полученная от аккумуляирования ветроэнергии; 4—ветроэлектрическая энергия непосредственно от ветростанций; 5—энергия от паровых электростанций; 6—остальная ветроэнергия в часы повышенной нагрузки; 7—ветроэнергия, вытеснившая паровую энергию; 8—избыточная ветроэнергия, гидроаккумулированная в часы повышенной нагрузки; 9—средняя мощность ветроэнергетических станций в те же часы.

таловложения в строительство гидроэлектростанций в США составляют обычно 150—250 долл. на 1 kW. В США обширные территории к западу от р. Миссисипи, удаленные от гидроэнергии и топлива, характеризуются постоянными ветрами относительно высокой средней интенсивности — более 5 м/сек, что может создать благоприятные предпосылки для широкого строительства здесь ветроэлектростанций. Для одного из типичных режимов ветра годовая выработка ветроэлектростанции в 7 500 kW составит: при предельной расчетной скорости ветра $v_0 = 15,2$ м/сек — $25,3 \cdot 10^6$ kWh ($a = 0,35$), при $v_0 = 10,7$ м/сек — $15,9 \cdot 10^6$ kWh ($a = 0,62$), а при отсутствии ограничений по скорости ветра — $31,2 \cdot 10^6$ kWh.

В качестве одного из видов необеспеченной энергии ветроэлектрическая энергия отличается удовлетворительными показателями, характеризуется достаточно постоянными и надежными значениями среднемесячной выработки при сравнительно кратковременных снижениях мощности.

В действительности не отмечалось одновременного резкого снижения скорости ветра сразу во многих пунктах наблюдения, даже если последние, отстояли один от другого менее чем на сотни километров. Поэтому в крупной объединенной группе ветроэлектростанций не должны иметь места особенно значительные понижения мощности, режим отдачи энергии в целом будет относительно равномерным.

В бюллетене FPC выдвигается предложение — в ближайшее время создать экспериментальную ветроэлектростанцию в 7 500 kW, оборудованную необходимой контрольно-измерительной аппаратурой.

Кандидат техн. наук. Н. А. КАРАУЛОВ

D. Schneider. Схема использования гидроресурсов р. Миссури. *Edison. El. Inst. Bull., стр. 95, April, 1945.*

Р. Миссури длиной около 4 740 км является одной из крупнейших рек США. Бассейн ее охватывает почти 1/6 всей площади страны и включает штаты Миссури, Кан-

зас, Иова, Небраска, Миннесота, С. и Ю. Дакоты, Вайоминг и Колорадо, а также частично охватывает канадские провинции Альберта и Саскачеван. Сток реки отличается значительной неравномерностью. Минимальный расход в устье реки составляет 710 м³/сек, максимальный 17 000 м³/сек. Судоходство на реке поддерживается на расстоянии свыше 3 000 км.

В 1939 г. был издан закон «Об общем плане регулирования паводков и других мероприятий по бассейну р. Миссури», получивший название «Пик-плана». По этому закону выделено было около 400 млн. долл. на частичное осуществление строительных работ по Минисгерству внутренних дел и военному министерству (Corps of Engineers). Эта цифра иллюстрирует огромный масштаб требуемых работ по схеме р. Миссури. Однако направление и характер требуемых реконструктивных мероприятий являются объектом споров представителей различных интересов в использовании стока.

Районы, находящиеся к западу от 97 меридиана, заинтересованы главным образом в ирригации и энергетическом использовании водотока, тогда как восточные районы нуждаются в регулировании паводков и улучшении судоходных условий. Осуществление схемы зависит также от исхода борьбы представителей государственного гидроинтереса с частными электrokомпаниями. Предложение президента США об организации Управления по схеме Миссури (MVA) аналогично с долиной Теннесси (TVA) не утверждено до настоящего времени ввиду противодействия тепловых энергосистем.

Основные направления мероприятий по схеме р. Миссури сводятся к обеспечению судоходных глубин порядка 2,7 м на значительном протяжении реки, созданию водохранилищ и плотин для регулирования паводков, сооружению многочисленных гидроэлектростанций и орошению около 1,8 млн. га сельскохозяйственной площади. Схема предусматривает сооружение 12 крупных плотин комплексного значения (5 — на основном русле реки, 5 — на притоках и по одной на рр. Биг Хорн и Иеллоустон). Федеральное энергетическое управление (FPC) рекомендовало в целях достижения максимального энергетического эффекта сооружение 6 дополнительных гидроузлов комплексного значения вместо предусмотренных ранее плотин для регулирования паводков. Наконец, предусмотрено создание ряда чисто ирригационных водохранилищ в ряде штатов, с возможным в дальнейшем сооружением при них гидроэлектростанций. Среднегодовая выработка энергии на проектируемых гЭС схемы р. Миссури оценивается в 10 млрд. kWh при установленной мощности порядка 2 млн. kW.

Единственное крупное водохранилище, построенное до настоящего времени с целью обеспечения судоходных глубин около 1,8 м в низовьях р. Миссури — Форт Пек (1943 г.). На гЭС Форт Пек установлена мощность 35 тыс. kW при проектной мощности порядка 135 тыс. kW.

Недостаточное экономическое развитие районов схемы р. Миссури и конструкция тепловых энергосистем ограничивают сбыт гидроэнергии и строительство новых гЭС. В штате Вайоминг имеется перспектива некоторого роста электропотребления; в этом штате построены 4 гЭС суммарной мощностью в 51 тыс. kW, из которых наибольшая гЭС Семиноль в 36 тыс. kW имеет обеспеченную мощность, равную лишь 1/3 установленной. В этом районе выявлено 11 возможных створов гидроэнергостроительства общей мощностью около 340 тыс. kW, однако, вряд ли может быть обеспечен спрос на подобную мощность.

Автор реферлируемого доклада, ссылаясь на данные Келлога о наличии большого резерва мощности по всем энергорайонам США (23% в 1944 г.), высказывается за ограниченное строительство гидроэлектростанций в районе р. Миссури (с большой обеспеченной мощностью) и за необходимость согласования противоречивых интересов водопользователей без создания Государственного управления (MVA).

В статье выдвигается в качестве наиболее существенной — задача борьбы с разрушительными паводками в низовьях, где горизонт реки повышается на 10—12 м. Автор указывает также на ограниченные возможности осуществления ирригационных мероприятий по схеме Миссу-

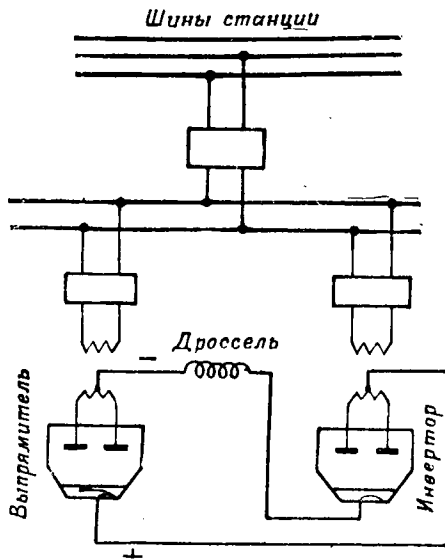
ри ввиду избыточности сельскохозяйственной продукции в районе и в целом по США.

Кандидат техн. наук **Б. Л. ЭРЛИХМАН**

ПЕРЕДАЧА ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ

Передача энергии на дальние расстояния. ВВМ, стр. 19-20, № 1/2, 1945.

Опыты по передаче электроэнергии постоянным током на Швейцарской гидроэлектростанции Биаскина (Электричество, № 3, 1945) в настоящее время закончены. Опытная станция в Биаскине предназначалась для испытания на полную мощность ртутных выпрямителей и инверторов, разработанных фирмой ВВС для целей передачи энергии постоянным током. Она состояла из однофазного выпрямителя, однофазного инвертора и сглаживающего дросселя. Упрощенная схема установки изображена на рисунке.



В течение нескольких месяцев установка успешно работала в режиме рекуперации с нагрузкой до 400—410 А при выпрямленном напряжении 33 кВ. Таким образом группа из 6 однофазных преобразователей этого типа, включенных в каскад по схеме Эреншпергера, может, по-видимому, выпрямлять и инвертировать до 80 тыс. кВт при напряжении 200 кВ постоянного тока.

Параллельно с опытами по передаче энергии постоянным током в Швейцарии продолжались исследования по трехфазным линиям электропередачи очень большой длины. До последнего времени вопрос о целесообразности заземления нейтрали таких линий через катушку Петерсена считался спорным. Для внесения ясности в этот вопрос были определены потери на корону в линии 400 кВ длиной 800 км, с диаметром проводов 50 мм, при наличии катушки Петерсена. При однофазном замыкании на землю потери на корону в такой линии возрастают до 152 тыс. кВт, что практически исключает возможность успешного гашения дуги под действием катушки. Избежать чрезмерного коронирования при замыканиях на землю можно только ценой резкого увеличения диаметра провода, что неприемлемо по экономическим причинам.

Таким образом, если применение трехфазных линий очень большой длины вообще окажется целесообразным, нейтраль этих линий надлежит заземлять наглухо.

Кандидат техн. наук **Я. М. ЧЕРВОНЕНКИС**

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Развитие сельской электрификации в США за 1914 г. Отчет администратора REA за 1944 г. и *El. World*, стр. 105 и 112, № 3, 1945.

За время войны электрификация сыграла значительную роль в производственной деятельности американских ферм. Она способствовала повышению их продуктивности. Так, например, в южной части штата Иллинойс электрифицированные фермы увеличили продукцию яиц и птицы на 65%. В штате Техас вновь присоединенные к сетям фермы увеличили продукцию молока на 34%, а птицы на 50%. В 1944 г. отмечается большой рост строительства сельскохозяйственных электросетей. Всего построено 17,5 тыс. км новых сетей, т. е. в два с половиной раза больше, чем в 1942 и 1943 гг. Общая протяженность высоковольтных сетей администрации по сельской электрификации (REA) достигла в 1944 г. 660 тыс. км. Всего организациями REA закуплено 2,08 млрд. кВт·ч электроэнергии. Произведено же на собственных 65 электростанциях только 0,21 млрд. кВт·ч. Общая мощность электростанций REA достигает 76,5 тыс. кВт; из них: 73,5% дизельных, 3,2% станций на натуральном газе, 12,8% гидростанций и 10,5% паровых станций.

Потребление электроэнергии на одну ферму США продолжает возрастать и составляет в среднем 910 кВт·ч в год. Имеется прямая зависимость между размером потребления и временем, прошедшим со дня присоединения данной фермы к электрической сети. Так, в среднем по США фермы, присоединенные до 3 лет назад, потребляют 710 кВт·ч в год на ферму, от 3—5 лет 860 кВт·ч в год, а свыше 5 лет 1 070 кВт·ч в год.

Для осуществления электрификации всех ферм и вообще домов, находящихся в сельских местностях США, необходимо присоединить к электрическим сетям дополнительно к уже электрифицированным еще 5,25 млн. хозяйств. В настоящее время REA намечает в ближайшие послевоенные пять лет электрифицировать 3,5 млн. хозяйств, что потребует капиталовложений на общую сумму 5,6 млрд. долл. Остальные 1,75 млн. хозяйств предполагается электрифицировать в более продолжительный срок.

Кандидат сельскохозяйств. наук **И. А. БУДЗКО**

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Н. Е. Morton, O. R. Rutemiller. Электрооборудование копировального станка для обработки гребного винта. *El. Eng.*, стр. 205-208, № 4, 1945. **С. R. Hopna, W. O. Osbon, R. A. Hartley.** Следящий привод копировального станка для гребного винта. *El. Eng.*, стр. 201—205, № 4, 1945.

Значительный рост кораблестроения потребовал создания автоматического станка для быстрой и точной обработки различных поверхностей гребных винтов.

В реферлируемой статье описывается подобный (копировально-фрезерный) станок, созданный в 1940 г. американскими фирмами. Снабженный двумя фрезами, работающими одновременно на обеих сторонах винта; для повышения производительности и точности обработки станок приводится в действие 11 электродвигателями постоянного тока, которые питаются от трех мотор-генераторов. Копирование модели производится посредством копир-щупа.

Наибольший интерес в этой установке представляют собой два следящих привода для подачи фрез, каждый из которых питается по системе Леонарда. В цепь возбуждения генератора, последовательно с источником постоянного тока введен добавочный возбудитель. Обмотка возбуждения последнего питается через усиленную четырехэлектродную лампу и потенциометрическую схему от напряжения 325 В. Управление напряжениями на двух сетках лампы производится сильверстратом, на который воздействует копир. В системе предусмотрена трансформаторная обратная противоколебательная связь с цепью генератор-двигатель.

Характеристическое уравнение движения следящей системы в операторной форме имеет вид:

$$-M p^2 x - \frac{r p x}{(1 + T_3 p)} = F_p + F_a + F_v,$$

где x — подача фрезы; M — произведенная масса системы; T_3 — электромагнитная постоянная цепи якоря следящего привода; F_p — сила, обусловленная смещением фрезы от надлежащего положения; F_a — сила, обусловленная наличием обратной связи; F_v — сила, соответствующая скорости поправки.

После подстановки в приведенное уравнение выражений для сил (F_p , F_a и F_v) и замены буквенных обозначений соответствующими числовыми значениями, получается характеристическое уравнение седьмой степени. Это уравнение, решенное приближенным методом Хорнера, заключающимся в последовательных пробах, с использованием синтетического деления, приобретает вид:

$$(p + 16,2)(p + 63,94)(p + 95,0)(p^2 + 2,16p + 5,58)(p^2 + 12,04p + 235,4) = 0.$$

Три линейных фактора этого уравнения представляют собой неколебательное движение подачи, а квадратичные факторы соответствуют колебательным движениям подачи.

Частоты колебаний для рассматриваемой системы получаются равными 0,336 и 2,24 Hz, а коэффициенты затухания, будучи очень высокими, равны соответственно 96% и 93,1% периода.

Достаточную точность приближений двух неизвестных коэффициентов делителей уравнений шестого порядка можно получить меньше чем 10 пробами. Для уравнений 4 порядка достаточно четырех, пяти проб, что ускоряет процесс вычислений по сравнению с методом Ферради-Кардана. Преимуществом рассматриваемого метода является также то, что каждая последующая проба является проверкой предыдущей, чем исключается возможность ошибки.

Доктор техн. наук, проф. В. К. ПОПОВ

Litman. Успокаивающее воздействие двигателей постоянного тока гребных установок судна на колебания, производимые на валу привода большими гребными винтами. *El. Eng., стр. 31—36, № 1, 1945.*

Двигатели постоянного тока находят широкое применение для гребных установок судов. Допуская маневренность и широкое изменение скорости хода, эти двигатели служат также источником успокоения колебаний, получаемых от гребных винтов. Вопрос о затухании колебаний, возникающих на валу привода движения судна, наиболее просто решается заменой механической системы эквивалентными электрическими контурами, которые имеют те же дифференциальные уравнения. При этом источником гасящего момента является приложенное напряжение, элементы привода заменяются емкостями, массы индуктивностями, а сопротивления становятся демпфирующими элементами.

Исследование дифференциальных уравнений, составленных для подобных контуров, показывает, что меньшее сопротивление якоря двигателя способствует большему успокоению системы, тогда как индуктивность якорной цепи уменьшает затухание колебаний. Совместное успокоительное действие гребных винтов и двигателя постоянного тока приводит к поглощению винтами наибольшей части колебаний.

Исследование эквивалентного контура, включающего совместное действие винтов и двигателя с учетом индуктивности его якорной цепи, дает наилучшее представление о действительном протекании процесса.

Инж. Е. Л. КОВАРСКАЯ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

E. J. Vogel. Стандартизация электрической прочности и характеристики изоляции масляных трансформаторов. *El. Eng., стр. 167—171, № 4, 1945.*

В реферируемой статье ставится вопрос о своевременности пересмотра утвержденного в 1942 г. стандарта ASA на трансформаторы в части, касающейся в основном электрических испытаний их изоляции, требования к которой сравниваются с действительными воздействиями на нее эксплуатационных режимов. Автор рассматривает ряд предъявляемых к изоляции требований, которые состоят в том, что она должна выдерживать: нормальное длительно действующее напряжение между всеми частями обмоток и землей; условия аварийных режимов; импульсные испытательные напряжения¹ и коммутационные перенапряжения.

Сравнение допускаемых стандартом 60-периодных приложенных и 120-периодных индукционных испытательных напряжений в указанных выше случаях с напряжениями при любом установившемся аварийном состоянии и обычных коммутационных перенапряжениях, показывает, что испытательные напряжения могут быть снижены.

Одновременно автор констатирует, что главная изоляция трансформаторов с заземленной нейтралью, удовлетворяющая требованиям низкочастотных испытаний, выше, чем это требуется для удовлетворения импульсным испытаниям.

Анализ электрического поля между обмоткой и землей при различных расстояниях между линейными катушками и различных напряжениях между ними позволяет прийти к заключению о том, что при установлении в стандарте соответствующего импульсного испытательного напряжения с предразрядным временем 1 мс обеспечивается как трехмикросекундная, так и 60-периодная прочность и устраняются существующие в настоящее время разногласия в стандарте. Поэтому предлагается ввести следующие контрольные испытания трансформаторов: а) импульсное испытание с предразрядным временем мс; б) импульсное испытание полной волной; в) сохранить испытание индуктированным напряжением равным двойному номинальному.

Инж. А. Г. КРАЙЗ

Вопрос о снижении низкочастотных испытательных напряжений для трансформаторов по сравнению с двойным номинальным поднимается не впервые. Он особенно важен для трансформаторов на высокие и сверхвысокие напряжения, главная изоляция которых имеет относительно большие коэффициенты импульса. Этот вопрос вновь неизбежно встанет при проектировании электрооборудования для наших мощных систем с номинальными напряжениями выше 220 кВ.

Что же касается предложения автора статьи о полном или частичном отказе от низкочастотных испытаний, то его вряд ли можно считать приемлемым, поскольку эти испытания необходимы для контроля качества технологического процесса изготовления трансформаторов и отчасти для контроля качества материалов.

А. К.

Тонкие листы для магнитопроводов трансформаторов. *Rev. of Sc. Instr., стр. 61—62, № 3, 1945.*

Перед войной наиболее тонкие листы из сплава Hi-persil для трансформаторов высокой частоты изготавливались толщиной 0,35 мм. Впоследствии из этого сплава получили листовую сталь толщиной 0,175 мм; она была применена для снижения веса специальных трансформаторов самолетного электрооборудования, работающих при частоте 400 Hz². Через некоторое время магнитопроводы самолетных трансформаторов стали изготавливаться из листов толщиной уже в 0,125 мм. Был построен даже специальный прецизионный прокатный стан, давший возмож-

¹ А. В. Сапожников и А. Г. Крайз. О стандартизации импульсной прочности трансформаторов. *Электричество*, № 9, 1945.

² *Электричество*, стр. 55, № 6, 1945.

ность получать листы из гипертоника с ориентированной структурой при толщине 0,05 мм и даже 0,025 мм. Применение таких тонких листов из материала с весьма малыми потерями дало возможность построить трансформаторы для высоких частот (трансформаторы в телевизионных установках), в то время как ранее приходилось использовать трансформаторы без ферромагнитного сердечника. Применение тонких листов дает снижение веса трансформатора до 50%.

Кандидат техн. наук **Б. М. ТАРЕЕВ**

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ТЕХНИКА

Применение индукционного и диэлектрического нагрева в США. *Electronics, стр. 101, 148—176, № 3, 1945; GER, стр. 23—24, № 2, 1945.*

В 1945 г. в Чикаго состоялась конференция по вопросам индукционного и диэлектрического нагрева¹. На конференции освещались вопросы практического применения высокочастотного нагрева во всех областях промышленности.

Индукционный нагрев применяется в США для поверхностной закалки стали, для плавки, для сварки и пайки, для нагрева металла при ковке, для термообработки магнитных сплавов. При поверхностной закалке потребная мощность составляет от 0,8 до 2,5 кВт/см². Рекомендуемая длительность нагрева — не менее 1 сек. Если глубина закаленного слоя не должна превышать 0,4 мм, зазор между индуктором и закаляемым телом принимается порядка 1,5 мм, при больших глубинах 3—4 мм. Стандартный генератор мощностью 50 кВт может одновременно закалять поверхности площадью до 60 см². При обработке больших поверхностей применяется последовательная закалка².

При закалке небольшого цилиндрического тела для получения совершенно равномерной толщины закаляемого слоя вдоль образующей цилиндра применяется индуктор с катушкой не цилиндрической, а бочкообразной формы³.

Однородность закалки по окружности цилиндра обеспечивается медленным вращением тела во время нагрева. Нагрев с вращением применяется также при закалке шестерен.

Плавка в индукционных печах нашла применение для стали, бронзы, драгоценных металлов и в последнее время для магния. Для металлов с низкой температурой плавления она невыгодна. Современным применением индукционной плавки является расплавление тонкого слоя олова, электролитически нанесенного на жель, для получения плотного и однородного покрытия. Этот способ существенно сократил потребление олова при производстве белой жести для консервных банок.

Применение индукционного нагрева при ковке железа требует в три раза меньше места, чем другие способы нагрева. Потери металла на окисление, составляющие 4—6% при обычных методах, при индукционном нагреве практически отсутствуют. Температура нагрева и ее распределение точно регулируются. Метод нашел применение в пер-

вую очередь в экспериментальном и несерийном производстве.

Диэлектрический нагрев непроводящих материалов обладает тем преимуществом, что тепло выделяется одновременно и практически равномерно во всей толще нагреваемого изделия, что позволяет сократить длительность термообработки толстых изделий, плохо проводящих тепло, в десятки раз при одновременном повышении однородности прогрева. С другой стороны, стоимость 1 саI при этом способе нагрева в несколько раз выше, чем при нагреве паром.

Сушка древесины и других материалов током высокой частоты значительно дороже других способов сушки и оправдывает себя, только если сокращение длительности производственного процесса или же повышение однородности сушки имеют особое значение. Диэлектрическая сушка оправдала себя для некоторых высококачественных текстильных материалов, в частности для искусственного волокна «найлон».

Во взрывоопасных цехах применять диэлектрический нагрев не следует.

При индукционном нагреве в США наиболее распространены следующие значения частот:

Для плавки цветных металлов	60—360 Hz
В больших сталеплавильных печах	960 Hz
Для заковки крупных изделий	9 600 Hz
Для закалки мелких деталей, а также для получения очень тонкого закаленного слоя	100 000—500 000 Hz

При диэлектрическом нагреве применяются частоты $2 \cdot 10^6$ — $30 \cdot 10^6$ Hz; частота определяется из условия ограничения напряжения, прилагаемого к нагреваемому телу до безопасной величины. Источниками токов высокой частоты служат для частот до 10 000 Hz мотор-генераторы мощностью до 1 000 kW, для частот 100 000 Hz и выше ламповые генераторы мощностью до 50 kW и более. При частотах 100 000—200 000 Hz и мощностях не свыше 30 kW широко применяются также усовершенствованные искровые генераторы, не уступающие по к. п. д. ламповым и более дешевые. Для диэлектрического нагрева применяются только ламповые генераторы с к. п. д. порядка 60%.

Интересной новинкой является ионный преобразователь частоты, преобразующий трехфазный ток промышленной частоты в однофазный ток 500—3 000 Hz без промежуточного звена постоянного тока. Преобразователь состоит из трех однофазных двухполупериодных инверторов с самовозбуждением, присоединенным к трем фазам питающей сети. Напряжения высокой частоты, генерируемые инверторами, складываются; в отличие от напряжений каждого инвертора результирующее напряжение почти не модулировано. Частота его автоматически регулируется в зависимости от индуктивности нагрузки. В качестве инверторов использованы анодные металлические вентили с ртутным катодом типа «Экситрон» (с непрерывно горящей дугой возбуждения). Преобразователь частоты мощностью 200—300 kW имеет к. п. д. 90% и выше в диапазоне от 50% до полной нагрузки⁴. Высокий к. п. д., компактность и возможность регулировки частоты могут сделать новый преобразователь частоты серьезным соперником для высокочастотных мотор-генераторов.

Кандидат техн. наук **Я. М. ЧЕРВОНЕНКИС**

¹ Электричество, стр. 64, № 9, 1945.

² Для сравнения можно отметить, что в СССР ламповые генераторы для поверхностной закалки строились на мощности до 400 kW. Прим. реф.

³ Этот способ был впервые предложен в СССР доктором техн. наук Г. И. Бабатом. Прим. реф.

⁴ Высокочастотные мотор-генераторы союзного производства имеют к. п. д. 78% и при той же мощности при оптимальной нагрузке. Прим. реф.



П О П Р А В К И

В статье М. В. Костенко (Электричество, № 1, 1946 г.):

1. В формулах: 1, 2, 5, 6, 7, 8 и во 2-й строке таблицы (стр. 67) и в пояснениях к формуле 12 — вместо напечатанного обозначения скорости света C , следует читать c .

2. В литературе (стр. 69, п. 11) следует читать: „Труды ленинградского политехнического института“.

В статье И. Л. Каганова (в том же номере) цифры, указывающие порядок глав статьи, следует читать последовательно вместо 7—6, вместо 8—7 и т. д. до конца.

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ПРОДОЛЖАЕТСЯ ПОДПИСКА
НА 1946 ГОД

НА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

Основан в 1880 году

12 номеров в год

Журнал рассчитан на инженеров и научных работников в широкой области научного исследования и практического применения электричества в связи с задачами развития всех отраслей электротехники и электрификации СССР

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик Б. Е. Веденеев (отв. редактор), член-корр. АН СССР А. И. Берг, доктор техн. наук, проф. Ю. В. Буткевич, доктор техн. наук, проф. А. А. Глазунов, член-корр. АН СССР М. П. Костенко, академик В. Ф. Миткевич, академик Н. Д. Папалекси, доктор техн. наук, проф. Г. Н. Петров, канд. техн. наук И. А. Сыромятников, инж. А. И. Товстопалов, член-корр. АН СССР М. А. Шателен. Ответственный секретарь редакционной коллегии инж. Я. А. Климовицкий

В журнале принимают участие:

Доктор техн. наук, проф. А. Е. Алексеев, доктор техн. наук, проф. К. А. Андрианов, доктор техн. наук, проф. Б. П. Апаров, член-корр. АН СССР В. К. Аркадьев, доктор техн. наук, проф. Р. Л. Аронов, доктор техн. наук, проф. Г. И. Атабеков, доктор техн. наук, проф. Г. И. Бабат, доктор техн. наук, проф. Л. Д. Белькинд, доктор техн. наук, проф. В. В. Болотов, доктор техн. наук, проф. С. М. Брагин, член-корр. АН СССР И. С. Брук, академик С. И. Вавилов, академик Б. А. Введенский, член-корр. АН СССР В. И. Вейд, академик А. В. Винтер, член-корр. АН СССР В. П. Вологдин, член-корр. АН СССР Б. М. Вул, доктор техн. наук, проф. А. А. Вульф, доктор техн. наук, проф. А. А. Горев, канд. техн. наук П. Н. Горшков, доктор техн. наук, проф. П. Г. Грудинский, доктор техн. наук, проф. Л. И. Гутенмахер, проф. Д. В. Ефремов, доктор техн. наук, проф. П. С. Жданов, доктор техн. наук, проф. А. М. Залесский, доктор техн. наук, проф. А. Г. Иосифьян, академик А. Ф. Иоффе, доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов, доктор техн. наук, проф. П. Л. Калантаров, доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский, инж. В. В. Каплан, инж. Е. Г. Комар, член-корр. АН СССР В. И. Коваленков, академик Г. М. Кржижановский, инж. Ю. С. Кронгауз, член-корр. АН СССР К. А. Круг, академик В. С. Кулебакин, действительный член АН УССР С. А. Лебедев, канд. техн. наук М. И. Левин, доктор техн. наук, проф. С. О. Майзель, доктор техн. наук, проф. Э. А. Меревич, доктор техн. наук, проф. М. М. Михайлов, доктор техн. наук, проф. Д. П. Морозов, доктор техн. наук, проф. Л. Р. Нейман, академик В. П. Никитин, доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов, доктор техн. наук, проф. К. М. Поливанов, доктор техн. наук, проф. В. К. Попов, доц. В. А. Привезенцев, инж. И. И. Ратгауз, доктор техн. наук, проф. С. А. Ринкевич, доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд, проф. Е. А. Руссаковский, доктор техн. наук, проф. Л. И. Сиротинский, доктор техн. наук, проф. И. С. Стекольников, канд. техн. наук Б. М. Тареев, проф. Б. А. Телешев, доктор техн. наук, проф. П. М. Тиходеев, доктор техн. наук, проф. В. А. Толвинский, академик К. И. Шенфер, доктор техн. наук, проф. Е. Г. Шрамков, доктор техн. наук, проф. Н. Н. Щедрин и др.

УСЛОВИЯ ПОДПИСКИ:

Подписная цена на год 96 руб.

Подписка принимается в отделениях „Союзпечати“ и всюду на почте.

Подписку можно также направлять по адресу:

Москва, Шлюзовая набережная, 10—Госэнергоиздат.