

1934

„Коммунизм есть советская власть
плюс электрификация всей страны“
ЛЕНИН

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

16 АПР. 1934.

№ 3

ФЕВРАЛЬ
ВЫПУСК II



МОСКВА
ЛЕНИНГРАД

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

AEG

Ртутные выпрямители для всех встречающихся надобностей



Для силовых и осветительных подстанций, тяги
и электролиза

Автоматические подстанции

Исполнение с управляемыми сетками

Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft
Abt. Rußland / Berlin NW 40

6694

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли. При всех запросах к иностранным фирмам о присылке каталогов образцов и проспектов просим ссылаться на номер нашего журнала.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

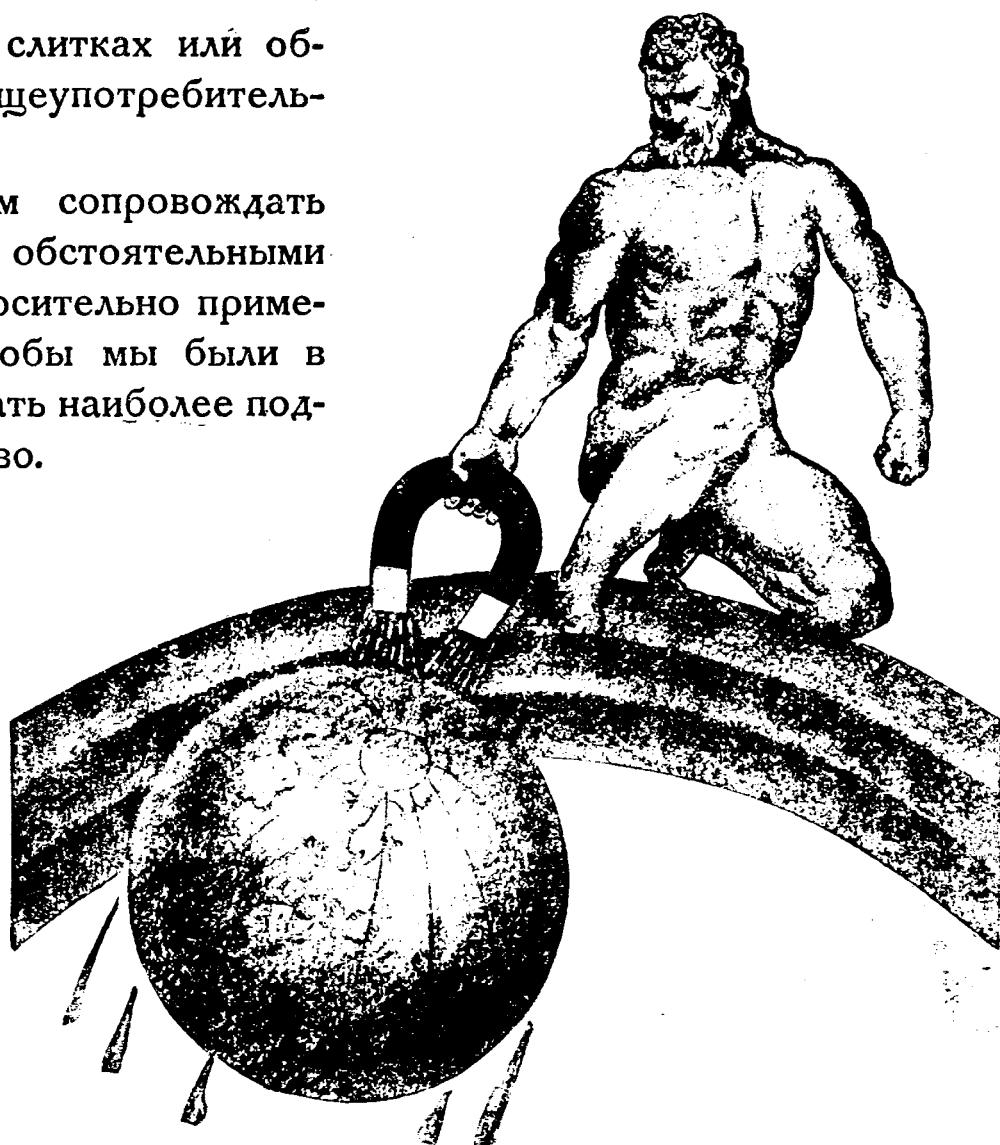
www.booksite.ru

МАГНИТНАЯ СТАЛЬ „САНДВИК“

Мы уделили много времени обстоятельному изучению производства магнитной стали, и в состоянии теперь предложить потребителю серию разных типов этой стали, особенно высокого качества в отношении однородности, точности, прочности закалки (никаких трещин при закалке), возможности переработки, коэрцитивной силы и т. д.

Поставляется в слитках или обручах всех общепотребительных размеров.

Запросы просим сопровождать наименее возможно обстоятельными сведениями относительно применения стали, чтобы мы были в состоянии выбрать наиболее подходящее качество.



**SANDVIKENS JERNVERKS AKTIEBOLAG
SANDVIKEN (ШВЕЦИЯ)**

6698

Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии внешней торговли. При всех запросах к иностранным фирмам о присыпке каталога образцов и проспектов просим ссылаться на номер нашего журнала.

К XVII СЪЕЗДУ ВКП(б) **ВЫПУЩЕН СБОРНИК**

„СИЛЬНОТОЧНАЯ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТЬ на рубеже 2-й пятилетки“

СБОРНИК ПОСВЯЩЕН ВОПРОСАМ ПРОИЗВОДСТВА И ТЕХНИКИ СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ И РАБОТЕ ЕЕ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА, ДАВАЯ ОСВЕЩЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ВСЕХ ОСНОВНЫХ ЕЕ ОТРАСЛЕЙ И ОСОБЕННО ЕЕ НОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Сборник состоит из следующих разделов:

1. Электропромышленность сильных токов к началу 2-й пятилетки (Экономический обзор).
2. Электропромышленность — база электрификации.
3. Электрификация промышленности.
4. Электрификация транспорта.
5. Светотехника.
6. Научно-исследовательская работа.

В сборнике приняли участие:

П. Л. Алаторцев, Александров, А. Е. Алексеев, С. Е. Аронов, Н. И. Борисенко, О. В. Вильнер, В. А. Витке, Н. Б. Герман, Л. И. Гольдмертейн, Е. Ф. Добронравов, П. Н. Иванов, И. Ю. Каплан, Н. Ф. Карпичев, В. К. Крапивин, Б. И. Луговской, Р. А. Лютер, Д. К. Минов, М. И. Московский, А. М. Николаев, Н. Ф. Перевозский, В. И. Поз, В. Г. Прелков, С. И. Рубинштейн, А. Д. Степанов, С. С. Стукалов, М. Д. Суховольский, А. М. Харин, М. А. Шезцов и В. А. Шибакин.

ОБЪЕМ СБОРНИКА — 372 стр., 224 иллюстрации

ЦЕНА В КОЛЕНКОРОВОМ ПЕРЕПЛЕТЕ — 5 руб.

ЗАЯВКИ НАПРАВЛЯТЬ: в Редбазу ВЭТ — Москва, Ильинка, Ипатьевский пер. 2.

ОНТИ

Энергоиздат

ОТКРЫТА ПОДПИСКА на 1934 г. на ЖУРНАЛ „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“

Год издания 55-й

Орган Главэнергопрома и Главэнерго НКТП, Энергетического института академии наук СССР и Всесоюзного энергетического комитета рабочей, научной и инженерной технической общественности (ВЭК-РНИТО)

20 номеров в год

Подписная цена:

на 12 мес. . . 25 р.—
на 6 мес. . . 12 р. 50 к.
на 3 мес. . . 6 р. 25 к.
Отдельн. номер 1 р. 25 к.

В группе энергетических журналов СССР „Электричество“ является основным руководящим научно-техническим органом, рассчитанным на квалифицированных работников электропромышленности и электрохозяйства

Программа журнала: Современные научно-исследовательские, теоретические и практические проблемы электротехники и, в частности, вопросы электро-машино- и аппаратостроения и техники высоких напряжений. Наиболее важные технические и технико-экономические вопросы проектирования, строительства и эксплуатации электростанций и вопросы электрификации промышленности, транспорта и сельского хозяйства. Освещение работы электротехнических научно-исследовательских институтов и крупнейших лабораторий. Освещение работы важнейших энергетических съездов, конференций и ВЭНИТО. Основные вопросы подготовки кадров, рационализация и стандартизация в электропромышленности и электрохозяйстве. Критическая библиография о вновь выходящей электротехнической литературе. Обзоры электрификации СССР и капиталистических стран. Рефераты на статьи в иностранной электротехнической печати.

Подписку на журналы и деньги направляйте по адресу: Москва, 19, Гоголевский бульвар, д. 27, Глибиной конторе периодических и подписных изданий ОНТИ „ТЕХПЕРИОДИКА“

Подписка принимается: отделениями, магазинами и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостоверениями, общественными сборщиками подписки на предприятиях, всеми отделениями и магазинами КОГИЗ‘а, всеми почтовыми отделениями и письмоносцами.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

3

1934

ФЕВРАЛЬ

Орган ГЛАВЭНЕРГОПРОМА и ГЛАВЭНЕРГО НКТП, Энергетического института Академии наук СССР и Всесоюзного энергетического комитета рабочей, научной и инженерно-технической общественности (ВЭК-РНITO)

Адрес редакции: Москва, Неглинный пр., 6/2, тел. 65-84.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.		Стр.
Инж. Э. З. ТЫЛЕВИЧ — Применение ртутных выпрямителей в установках для электролиза	3	ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ	
ИЗ РАБОТ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИНСТИТУТОВ И ЛАБОРАТОРИЙ			
Инж. Н. Н. ПЕТУХОВ и инж. М. А. АСТАШЕВ — Опыты с ртутным выпрямителем, управляемым посредством сеток	14	Инж. В. Е. РОЗЕНФЕЛЬД — Применение принципов теории вероятностей к электрическому расчету тяговых сетей	35
Инж. В. А. КАРАСЕВ — О снятии импульсных характеристик без катодного осциллографа	21	Инж. Л. И. СТОЛОВ — Об экономии металла в сетях наружного освещения	44
Инж. Н. П. САВИН — Метод моделей в применении к исследованию вентиляции электрических машин	27	НОРМЫ и СТАНДАРТЫ	
Инж. Ф. А. ДЕМЕНТЬЕВ — К вопросу о влиянии числа полюсов асинхронного двигателя на коэффициент мощности его	32	Инж. Е. К. ЭНГЕЛЬ — Электрические счетчики	48
		ХРОНИКА	55
		ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ	59

Применение ртутных выпрямителей в установках для электролиза

Инж. Э. З. Тылевич

Электропром, Харьков

Одним из основных потребителей электрической энергии в виде постоянного тока являются электрохимические производства. Постоянный ток при этом почти всегда получается путем преобразования трехфазного переменного тока помошью соответствующих преобразователей. Для правильного выбора типа преобразователя необходимо учесть способность различных преобразователей удовлетворять специфическим требованиям, предъявляемым данным потребителем. Вместе с тем необходимо иметь в виду и те преимущества, которые представляет тот или иной тип преобразователя в отношении первоначальных затрат и расходов по эксплуатации установки.

В настоящей работе рассматривается вопрос о технической и экономической целесообразности применения в качестве преобразователя переменного тока в постоянный для токоснабжения электролитических производств ртутных выпрямителей.

Указанный вопрос в целом распадается на три части:

а) возможность применения ртутных выпрямителей для вышеуказанной цели вообще, исходя при этом из существующих в настоящее время реальных условий и возможностей получения выпрямителей нужной мощности союзного производства;

б) сравнение ртутных выпрямителей с вращающимися преобразователями с точки зрения приспособленности их к специфическим условиям данного вида производства, иными словами, с технической точки зрения;

в) экономическое сравнение ртутных выпрямителей с вращающимися преобразователями.

В соответствии со сказанным рассмотрение данного вопроса мы разбиваем на три части. Первая часть представляет собой общий обзор современного положения в русской и заграничной практике с применением выпрямителей для электролитических производств вообще и производства хлора в частности. Здесь же рассматриваются и те предпосылки, обусловливаемые специфическими условиями данного рода производства, которые особенно благоприятствуют применению ртутных выпрямителей. Сравнение ртутных выпрямителей с вращающимися преобразователями (технико-экономическое), проводимое в первой части лишь в самых общих чертах, в дальнейшем, во второй и третьей частях настоящей работы, разрабатывается уже более детально и с учетом реально существующих у нас в Союзе условий.

I. Ртутные выпрямители в электрохимических производствах

В СССР до последнего времени для целей электролиза применялись исключительно вращающиеся преобразователи (мотор-генераторы или одноякорные преобразователи), так как требуемые условиями производства большие токи ввиду отсутствия соответствующих выпрямителей союзного производства можно было получить только путем параллельной работы многих единиц, а это значительно снижало бы ожидаемый экономический эффект от применения этого типа преобразователя.

В настоящее время этот недостаток ртутных выпрямителей (союзного производства) можно считать устраниенным. Выпрямители на токи в 1000 А (РВ-40) для напряжения до 600

намечаются к выпуску уже в ближайшее время, а на токи до 7 000 А (типа PB-70) — в 1934 г.

Относительно последних заметим, что целесообразность со средоточения больших мощностей в одной единице должна быть еще строго обоснована как с экономической, так и с технической точки зрения, ибо экономический эффект, который, естественно, дает применение агрегатов большой мощности, значительно снижается ввиду необходимости иметь соответствующий резерв (общая установленная мощность получается большей, чем при агрегатах меньшей мощности). С другой стороны, выход из строя агрегата большой мощности связан с большими затратами, чем при аварии с агрегатом средней мощности, так как в первом случае ввиду сложности агрегата ремонт его не всегда может быть проведен на месте своими силами.

В заграничной практике выпрямители на 6 000 А работают в настоящее время на многих установках. Что касается выпрямителей на большие токи в одной единице, то, хотя фирмой BBC и построены выпрямители на 10 000 и 16 000 А, опытных данных о работе последних еще не имеется; данные по выпрямителям на 10 000 А имеются лишь по установкам с прерывистой нагрузкой, где средняя нагрузка не превышает 6 000 А, но где имеют место перегрузки до 10 000 А и выше¹⁾.

В тех случаях, когда по условиям производства необходимы большие токи, не могущие быть полученными от одного выпрямителя, заграничная практика применяет параллельноеключение двух выпрямителей на один трансформатор. Такоеключение повышает к. п. д. всей установки в целом. Увеличение весов и потребной площади, отнесенное по всей установке, имеет здесь второстепенное значение. Выпрямители с питанием их трансформатором представляют одно целое и присоединяются к нему непосредственно. Так выполнен ряд установок, в частности установка для электролиза цинка «Consolidated Mining and Smelting Co of Canada²⁾», где установлены три группы ртутных выпрямителей по два выпрямителя по 5 000 А, на 460—560 В в каждой. У нас в Союзе аналогичные установки, выполненные фирмой BBC, имеются в Челябинске и в Орджоникидзе (электролиз цинка), где установлены по две группы выпрямителей на 4 000 А каждый, всего на установку 16 000 А, 475—575 В.

За границей в старых установках в качестве преобразователя переменного тока в постоянный применен почти исключительно мотор-генератор как старейший тип преобразователя. Преимущества его заключаются в хорошей приспособленности к меняющимся условиям режима работы и состояния первичной сети, от которой он работает, относительной нечувствительности к перегрузкам и большей простоте регулирования напряжения постоянного тока. Большим его недостатком является сравнительно низкий к. п. д., не превышающий даже при больших мощностях и высоких напряжениях 90%. Поэтому, во многих случаях мотор-генератору предпочитают одноякорный преобразователь, к. п. д. которого с учетом потерь в трансформаторе и регулировочных приспособлениях достигает при больших мощностях от 92,5 до 93,5%. Большая экономия в электроэнергии частично оправдывает недостатки одноякорного преобразователя, заключающиеся в значительной чувствительности к перегрузкам, ненадежности в эксплуатации и сравнительно сложной регулировке напряжения со стороны постоянного тока, требующей специальных приспособлений.

¹⁾ „BBC-Nachrichten“, 1932, N. 5, стр. 94.

²⁾ „BBC-Mitteilungen“ № 10, 1930, стр. 311.

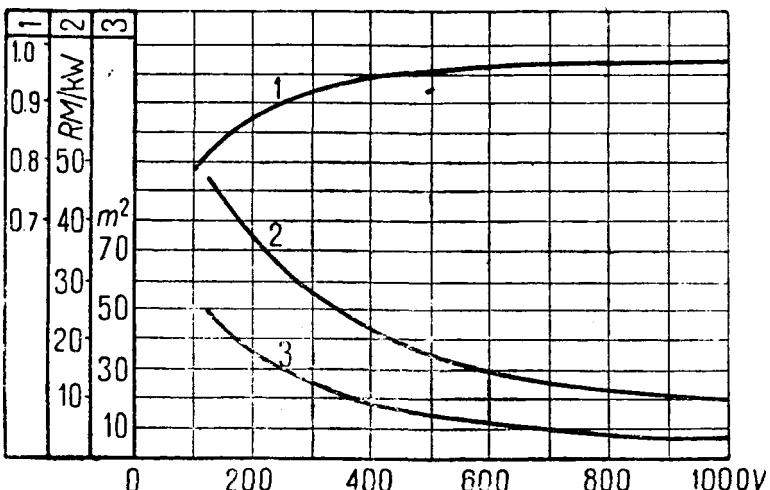


Рис. 1. Экономичность ртутных выпрямителей в зависимости от эксплуатационного напряжения (мощность 6 500 kW постоянного тока)

Кривая 1 — к. п. д.; кривая 2 — удельная стоимость зернистой зуны, кривая 3 — затраченная площадь

Начиная с 1925 г., серьезным конкурентом вращающихся преобразователей становится ртутный выпрямитель. Вначале при ограниченном его ограничивалось только установками небольшой мощности. С течением времени опыт пяти-семилетней эксплуатации этих установок и большие успехи в области постройки мощных ртутных выпрямителей, достигнутые за эти годы, привели к тому, что в последнее время целый ряд больших установок оборудован ртутными выпрямителями. Так, в настоящем время одной только фирмой BBC для нужд электролиза поставлено ртутных выпрямителей общей мощностью в 116 200 kW при 214 870 А, из которых на долю хлорных производств приходится 4 000 kW при 100 000 A³⁾.

Рассмотрим те условия, которые благоприятствуют все увеличивающемуся применению ртутных выпрямителей для токоснабжения электролитических производств и заставляют отдать предпочтение именно этому типу преобразователя.

Электрическая энергия применяется, главным образом, с целью получения работы или других видов энергии, как, например, для привода рабочих машин, для получения света и тепла. Этот род потребления электроэнергии можно обозначить как потребление с целью получения энергии в наиболее удобном для пользования виде.

При электрических процессах количество подводимой электроэнергии непосредственно влияет на количество получаемого продукта; подведенная электроэнергия, следовательно, после электролитического процесса переходит, так сказать, в связанный виде в дальнейшую обработку и становится в известной степени составной частью готового продукта. Таким образом здесь можно говорить о потреблении электроэнергии с целью получения определенного количества известной продукции, т. е. известной ценности. При этом необходимо иметь в виду, что при электролитических процессах одним киловаттчасом достигается значительно меньшее увеличение получаемой ценности, чем при других способах потребления электроэнергии. Удельный вес стоимости электроэнергии в общей стоимости готового продукта, полученного электролитическим путем, очень высок.

Так, в докладе P. S. Braillier'a, сделанного от Американской электрохимической ассоциации на Второй мировой энергетической конференции в Берлине в 1930 г., находим следующие данные стоимости электроэнергии в процентах от стоимости готового продукта в различных электрохимических производствах⁴⁾:

Продукт производства	Стоимость электроэнергии в процентах от стоимости продуктов
Натрий (электролиз NaCl)	18,83
Карбит кальция	12,24
Натрий металлический	9,28
Хлор	8,9
Аммиак (синтетический)	5,46
Фосфор	5,26
Сероуглерод	4,28
Алюминий	18,36

Величины эти значительно превосходят соответствующие значения для других видов промышленности (машиностроительная и др.).

Отсюда следует огромное значение удешевления электроэнергии для электролитических производств. Себестоимости электроэнергии в каждом проекте электролизной установки должно быть уделено такое же внимание, как и стоимости и возможности получения нужного для производства сырья.

Целесообразность применения ртутных выпрямителей для токоснабжения электролитных установок, рассматриваемая с точки зрения экономической, в значительной степени обусловливается применяемым в установке эксплуатационным напряжением выпрямленного тока. Преимущества ртутных выпрямителей в этом отношении приобретают тем большее значение, чем выше напряжение. Для к. п. д., цены и потребной площади это положение иллюстрируется кривыми рис. 1. Кривые эти построены по данным фирмы BBC и относятся к агрегату мощностью 6 500 kW и для напряжений выпрямленного тока до 1 000 V. Веса выпрямителей на единицу мощности также уменьшаются с увеличением напряжения. Кривые показывают, что выпрям-

³⁾ „BBC-Nachrichten“, 1932, N. 5, стр. 99.

⁴⁾ Gesamtbericht der Zweite Weltkraftkonferenz, 1930, Band I, „The Economic Relation of Power to the Manufacture of Electrotechnicals“, P. S. Braillier, стр. 312.

тель будет представлять тем больше преимуществ, чем выше применяемое напряжение.

Желая максимально использовать эти преимущества для экономического токоснабжения электролитных установок, необходимо стремиться к применению в них возможно более высоких и эксплуатационных напряжений. Насколько далеко можно идти в этом направлении, показывает табл. 1, дающая сводку применяемых в настоящее время напряжения и токов в различных новейших заграничных электрохимических установках. К более детальному рассмотрению этого вопроса мы еще вернемся.

Таблица 1

Электролиз	Эксплоатационное напряжение	Ток А
Электролиз расплавленных солей	Производство алюминия	250—600 10 000 + 20 000
	Производство магния .	150—350 2 000—5 000
	Производство натрия и кальция	150—350 2 000—5 000
Электролиз водных растворов	Электролиз воды (производство водорода).	200—3000 1 000—15 000
	Электролиз цинка . . .	600—800 5 000—10 000
	Электролиз меди . . .	200 500 5 000—10 000
	Электролиз хлора и едких щелочей . . .	250—500 2 000—5 000
	Производство перекиси водорода	100—200 до 3 000

При обычно применяемых в заграничной практике мощностях агрегатов от 2 000 до 7 000 kW и средних напряжениях выпрямитель приблизительно в 3—5 раз легче, чем одноякорный преобразователь. Вследствие этого, а также ввиду того, что выпрямитель является статическим преобразователем, при установке его отпадает надобность в возведении специальных фундаментов, необходимых для вращающихся преобразователей. Равным образом, отпадает необходимость в мощных подъемных приспособлениях. Площадь, потребная для установки ртутных выпрямителей, меньше, чем при вращающихся преобразователях, примерно в два раза. В результате здание для установки выпрямителей получается более легким, дешевым, с меньшей площадью и объемом. Выпрямители могут быть установлены в непосредственной близости от помещения ванн, что дает значительную экономию на проводниковом материале. Потери в соединительных шинах также могут быть при этом значительно снижены.

Что касается объема здания, то для больших ртутно-выпрямительных установок, например, мощностью 6 500 kW при 600 V, при выполнении установки по типу, указанному на рис. 2, на 1 kW установленной мощности, включая выпрямитель, трансформатор к нему и распределительное устройство, приходится от 0,1 до 0,15 m³. Считая стоимость 1 m³ здания в среднем около 25 руб., получим величину строительных затрат в среднем около 2 руб./kW. Такая низкая стоимость достижима благодаря возможности установки ртутных выпрямителей в невысоком легком здании, пристроенном непосредственно к зданию электролитных ванн (рис. 2). Для установки вращающихся преобразователей необходимо, напротив, возведение специального машинного зала большой высоты с тяжелым краном, что связано со значительными строительными затратами, примерно в три раза большими, чем в случае установки ртутных выпрямителей.

Дальнейшие преимущества выпрямителей, имеющие по своей природе экономический характер, заключаются в большой простоте ухода за ними и в низких эксплуатационных расходах. Обслуживание ртутного выпрямителя ограничивается управлением масляным выключателем со стороны переменного тока, автоматом со стороны постоянного тока, и коммутатором для регулирования напряжения. Если же автоматизировать управление вспомогательной аппаратурой ртутного выпрямителя, что, заметим, легко осуществимо с незначительными затратами, то обслуживающий подстанцию персонал может быть привлечен также и к другим работам.

Эксплуатационные расходы при ртутных выпрямителях весьма незначительны. Амортизация практически не имеет места за счет

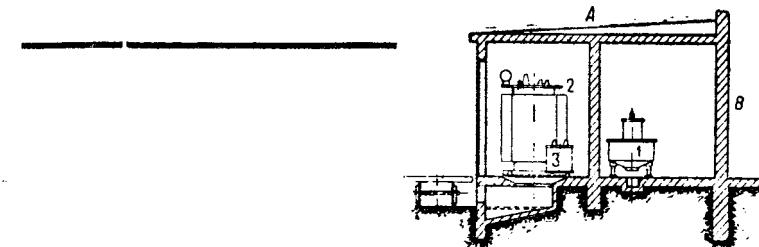
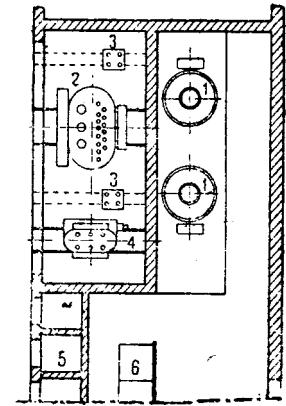


Рис. 2. Установка группы выпрямителей для электролиза: 1 — выпрямитель; 2 — трансформатор; 3 — отсасывающий дроссель; 4 — регулировочный трансформатор; 5 — камеры масляных выключателей; 6 — щит управления; A — помещение подстанции; B — помещение ванн



дающую воду соответствуют таковым на искусственное охлаждение воздуха, необходимое при вентиляции крупных вращающихся преобразователей. Возможное разъединение водопроводов может быть устранено принятием соответствующих мер.

Помимо указанных преимуществ экономического характера ртутные выпрямители обладают также рядом достоинств с точки зрения производственно-технической.

Особое значение здесь получает способность выпрямителей выносить значительные перегрузки и устойчивость их против коротких замыканий. Толчки тока при пуске под полным напряжением выпрямленного тока переносятся выпрямителем безболезненно.

Не имея никаких обмоток (кроме обмоток трансформатора, лежащих в масле), чувствительных в отношении порчи их содержащимися в воздухе во многих электрохимических установках вредными кислотосодержащими парами или газами, выпрямитель с этой точки зрения следует предпочесть всякому другому типу преобразователя. Если упомянуть, что в одной американской установке для электролиза цинка, оборудованной мотор-генераторами, воздух для охлаждения последних подается через фильтр под давлением, и во всем машинном помещении постоянно поддерживается помошью специальных приспособлений давление выше атмосферного во избежание проникновения в него снаружи воздуха, содержащего пары серной кислоты, то становится понятным, какое преимущество представляет отсутствие находящихся в воздухе обмоток машин. При этом как раз такие ответственные части машин, как коллекторы и контактные кольца вращающихся преобразователей, не могут быть предохранены от разъединения путем окраски их масляной или эмалевой красками, как это можно было бы сделать с другими частями машины.

Все это приводит к тому, что вращающиеся преобразователи, работающие на электрохимических установках, должны периодически останавливаться для чистки коллекторов и контактных колец. В известных случаях необходимость таких остановов работающих машин может нарушить непрерывность производства, что, естественно, крайне нежелательно. В таких случаях, как, например, производство хлора по системе Сименс-Биллита, остановка процесса электролиза крайне вредно отражается на аппаратуре (деформация диафрагм ванн, температурные напряжения, вызывающие растрескивание керамики и цементных частей и др.).

Необходимо здесь еще особо отметить одно свойство ртутных выпрямителей, приобретающее исключительно важное значение в установках для производства водорода и кислорода и дающее им значительный перевес в первую очередь перед одноякорными преобразователями. Дело в том, что, несмотря на все новейшие мероприятия, вращающиеся преобразователи могут менять свою полярность, вследствие чего ток в электролитных ваннах пойдет в направлении, обратном нормальному. Водород поэтому начнет выделяться на аноде, а кислород — на катоде. Переядка в газосборники, газы эти смешиваются с находящимися там уже газами (кислородом и водородом соответственно), образуя при этом взрывчатые смеси. Наряду со значительными материальными потерями возможный взрыв может привести и к полному разрушению всей установки. Применение ртутных выпрямителей исключает опасность таких явлений, так как те

мому принципу работы ртутного выпрямителя в нем не может появиться такая э.д.с., которая изменила бы направление выпрямленного тока.

Для других случаев для производства, например, хлора, последнее указанное преимущество ртутных выпрямителей имеет не менее важное значение, чем для производства водорода и кислорода. Попадание значительных количеств водорода в анодное пространство и здесь может вызвать взрыв ванны со всеми отсюда вытекающими последствиями.

Экономическое сравнение выпрямителей с вращающимися преобразователями показывает, что при напряжениях постоянного тока выше 250 V выпрямители экономичней мотор-генераторов, а при 400–500 V — также и одноякорных преобразователей. В табл. 1 приведены данные о применяемых в современных электрохимических производствах, в частности в производстве хлора, напряжениях.

Рассматривая данные табл. 1 с точки зрения возможности применения ртутных выпрямителей, необходимо выяснить те условия, при которых можно повысить приведенные величины напряжений, чтобы полностью использовать все те преимущества ртутных выпрямителей, о которых говорилось выше.

В тесной связи с эксплоатационным напряжением в электрохимических установках находятся производственные условия, электролитический к.п.д., ток и напряжение ванны, изменения последних, выход продукта производства, распределение общей мощности, возможность выполнения надлежащей изоляции, обслуживание ванн, подача и отвод электролита, отвод готового продукта электролиза в твердом, жидком или газообразном виде, а также общее выполнение всей установки в целом.

a) Электролитический к. п. д.

Электрические соотношения для электролизной ванны соответствуют таковым для нормальной аккумуляторной батареи. Приложенное к зажимам ванны напряжение U служит для преодоления напряжения разложения U_g и омического сопротивления r :

$$U = U_g + rI.$$

Мощность, подводимая к электролизеру,

$$P = UI = U_g I + rI^2.$$

Для собственно процесса разложения имеет значение только первый член правой части приведенного уравнения, в то время как второй член представляет величину потерь, обусловливаемых нагревом ванны (за исключением тех случаев, как например, при электролизе расплавленных солей, когда нагрев смеси необходим по условиям самого технологического процесса).

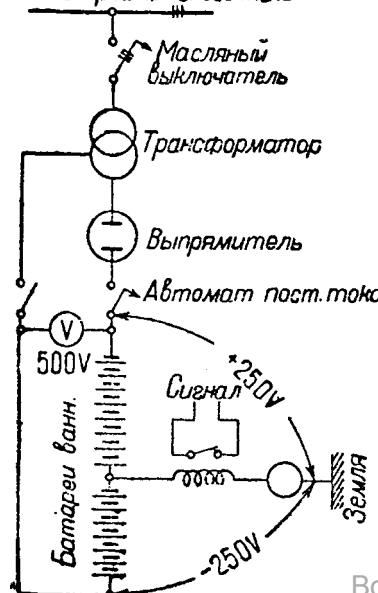
Для получения возможно более высокого электролитического к.п.д.

$$\eta_e = \frac{U_g}{U}$$

необходимо стараться по возможности уменьшить сопротивление ванны r .

Наибольший электролитический к.п.д. будет при электролизе водных растворов, где величина его достигает 0,8 и выше, в то время как в электролизах, где необходимо нагревание или имеются устройства, увеличивающие сопротивление (диафрагмы), величина его не превышает 0,5. При заданном выходе готового продукта увеличение применяемого напряжения позволит работать с меньшими токами и, таким образом, уменьшить величину вредных потерь rI^2 .

Шины трех фазного тока



б) Ток и напряжение на ванну

Нормальные токи на ванну при электролизе колеблются в зависимости от рода производства от 2 000 до 20 000 A. Отдельные ванны могут соединяться между собой в таких комбинациях, чтобы наилучшим образом приспособиться к токоснабжающей установке. Наиболее благоприятным будет, естественно, такое соединение ванн, что мощность, потребная для получения заданного количества готового продукта, будет подаваться при возможном более высоком напряжении.

Напряжение на зажимах отдельных ванн сравнительно невелико. Оно колеблется в пределах от 3,5 до 8,0 V. Для возможности применения эксплоатационного напряжения, достаточно высокого для экономичного ведения производства

между собой последовательно. Величина суммарного напряжения ограничивается заданным количеством готового продукта, или, что то же, мощностью при заданном токе, возможностью выполнения надлежащей изоляции и условиями безопасности обслуживания.

в) Выбор эксплоатационного напряжения

При заданном количестве готового продукта величина эксплоатационного напряжения определяется, исходя из наиболее благоприятной величины тока на ванну. Желая, положим, получить 2 500 t хлора в год, что в сутки составит около 7 t, и полагая расход электроэнергии на получение хлора равным около 6 kWh/t⁶, получим суточный расход электроэнергии 7 000 · 6 = 42 000 kWh, что соответствует мощности

$$P = \frac{42\,000}{24} = 1\,750 \text{ kW.}$$

При выбранной величине тока на ванну в 2 200 A эксплоатационное напряжение

$$E = \frac{1\,750 \cdot 10^2}{2\,200} = 800 \text{ V.}$$

При таких условиях можно установить одну батарею ванн при 800 V или две батареи при 400 V. Как показывают кривые рис. 1, при токоснабжении установки от ртутных выпрямителей эксплоатационное напряжение желательно принять не меньшим 500–600 V.

Допустимо ли применение таких напряжений с точки зрения изоляции установки и безопасности обслуживания ее?

В иностранной литературе⁹ приводится мнение многих специалистов в области электролиза, что не только при электролизе расплавленных солей с его высокими температурами, но и при электролизе водных растворов вполне достижимо как выполнение надлежащей изоляции, так и поддержание ее в исправном состоянии. Изолированная установка отдельных ванн не представляет никаких трудностей. Все трубопроводы для жидкостей и газы, соединяющие ванны с землей, должны отделяться от последних промежуточными изоляционными патрубками из стекла или эбонита. Протекающие все же через эти патрубки заземляющие токи, которые устранить совершенно невозможно, должны во избежание опасности разъединения ограничиваться величиной, не превышающей нескольких миллиампер. Проведя указанные мероприятия, можно без всяких опасностей за состояния изоляции ити на применение напряжения до 1 000 V и выше и тем самым максимально использовать все преимущества ртутных выпрямителей.

Остается вопрос о безопасности обслуживания. В тех случаях, когда длительное обслуживание установки не имеет места, верхний предел применяемого напряжения определяется только заданным количеством готового продукта. Сюда относятся установки для электролитического производства водорода, получившие за последние годы большое распространение вследствие высокого качества получаемого таким путем водорода. Применение напряжений до 1 000 V и выше не представляет здесь никаких затруднений, так что в этой области единственным целесообразным типом преобразователя будет только ртутный выпрямитель.

Чтобы по возможности снизить величину напряжения относительно земли, можно по аналогии с трехпроводными системами с заземленным нулевым проводом заземлять среднюю точку серии последовательно включенных ванн. В этом случае каждая ванна получает определенный потенциал. Кроме того, здесь легко осуществить контроль за состоянием изоляции батареи ванн помощью реле в заземляющем проводе (рис. 3). В настоящее время, однако, заземление какой-либо точки батареи ванн с целью придания ваннам определенного потенциала обычно не применяется, так как в этом случае при случайном соединении между ваннами и землей опасность аварии меньше.

В производстве хлора, щелочи или водорода постоянное обслуживание ванн обычно не требуется. Подвод электролита и отбор готового продукта производится механически. Осмотр отдельных ванн производится, как и в других электролитических производствах, при закороченной ванне, в то время как остальные находятся под напряжением. Полная безопасность здесь может быть достигнута, если устраниить возможность одновременного прикосновения к токонесущим и заземленным частям установки. Последнее требование можно выполнить, хорошо изолировав подмостки для обслуживания и одев все заземленные колонны, подпорки и пр. изолирующим покровом. Также и в этой области с недавнего времени применяется напряжение в 500 V.

Весьма показательным в отношении допустимости применения при электролизе напряжений порядка 500 V и выше является то обстоятельство, что при электролизах цинка и меди, отличаю-

Рис. 3. Заземление средней точки

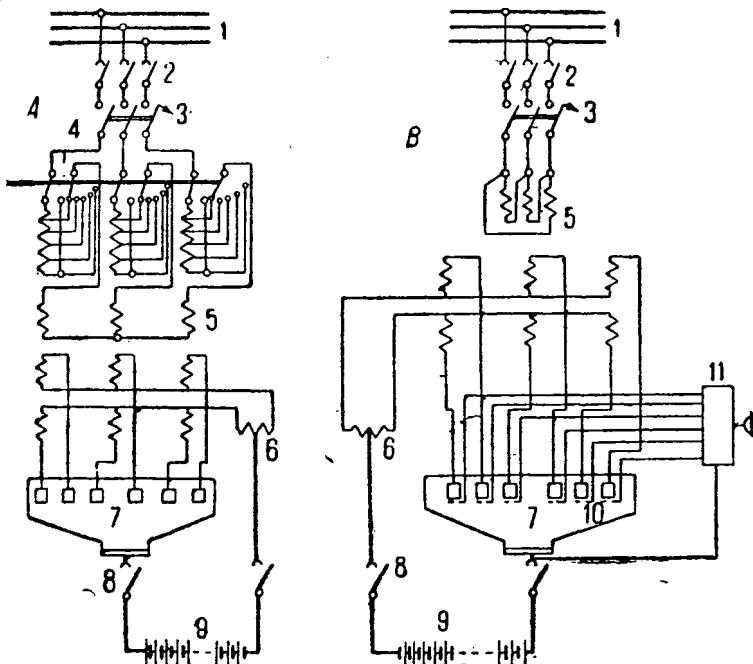


Рис. 4. Регулирование напряжения в ртутновыпрямительной установке:

A — регулировочным трансформатором; *B* — регулирующими сетками; 1 — сборные шины трехфазного тока; 2 — разъединители; 3 — масляный выключатель; 4 — ступенчатый регулятор; 5 — трансформатор выпрямителя; 6 — отсасывающий дроссель; 7 — выпрямитель; 8 — автомат постоянного тока; 9 — электролизные ванны; 10 — регулирующие сетки; 11 — регулировочное приспособление к ним

шихся от вышеупомянутых электролизов водных растворов тем, что здесь необходимо постоянное обслуживание ванн во время работы, применяются в настоящее время напряжения в 500—700 V. В этих производствах готовый продукт отделяется от электродов, удаляется из ванн и заменяется свежим материалом без перерыва в работе. Так как при этом обслуживающий персонал приходит в соприкосновение с ваннами, находящимися под напряжением, то мостики для обслуживания выполняются изолированными. Кран, которым производится выемка пластин, также изолируется от земли. Применение специальных защитных мер против разбрызгивания электролита позволяет без затруднений поддерживать изоляцию установки в хорошем состоянии. В вышеупомянутых установках для электролиза цинка, выполненных у нас в Союзе (в Челябинске и во Владикавказе), применяется напряжение, как уже указывалось выше, в 475—575 V.

При электролизе алюминия, где также необходимо ручное обслуживание ванн, подача сырья и отбор алюминия, поддержание изоляции в хорошем состоянии не представляет никаких затруднений, так как вследствие сильного теплоизлучения окружение ванн всегда остается сухим. Предохранительные меры для персонала, обслуживающего ванны, те же, что и для упомянутых выше производств. Обычно применяемые здесь напряжения — 500—600 V.

В таких же условиях находятся и производства кальция, натрия и магнезии, также допускающие применение напряжений порядка 500 V.

Все сказанное приводит нас к заключению, что при соблюдении соответствующих предохранительных мер в отношении изоляции установки в последней может применяться напряжение до 500 V, не снижая безопасности обслуживания ее.

г) Регулирование тока и напряжения

При электролизе хлора, как и при всех почти других электролизах, процесс ведется при постоянной величине тока, поэтому при неизменяющихся электрических постоянных ванн в регулировании напряжения нет надобности. Если же в процессе работы ванн изменяется их сопротивление или напряжение разложения или будут иметь место колебания напряжения в питающей сети, то становится необходимым регулировать приложенное к ваннам напряжение. В большинстве случаев достаточно поддерживать постоянство тока с точностью до 1%.

Так как ток $i = \frac{U - U_f}{r}$, то регулирование приложенного к ваннам напряжения U должно быть тем точнее, чем больше отношение U_g к U . Если, например, $U_g = 0,5 U$, то изменению тока i на 1% соответствует изменение напряжения на 0,5%. Регулирование напряжения в ртутных выпрямителях осуществляется в настоящей

время преимущественно помощью специальных регулировочных ступенчатых трансформаторов, позволяющих изменять напряжение в пределах ± 25 (рис. 4a). Число ступеней регулирования может быть при этом быть получено до 60.

Указанный способ регулирования напряжения в последнее время начинает вытесняться способом регулирования с помощью управляемых сеток, который дает возможность плавной регулировки напряжения в пределах от нуля до максимальной величины⁷⁾. Принцип действия выпрямителей с регулирующими сетками заключается в следующем: каждой из сеток, находящихся перед анодами выпрямителя, можно придать отрицательный по отношению к катоду потенциал, благодаря чему момент зажигания соответствующего анода может быть задержан на определенное, регулируемое по желанию, время. Таким образом эффективное значение напряжения отдельных анодов (фаз трансформатора) за период горения их произвольно снижается до любой желаемой величины (вплоть до нуля), а так как напряжение выпрямленного тока равно средней арифметической из вышеуказанных эффективных напряжений всех анодов, то, снижая величины последних, мы тем самым получаем возможность изменять и напряжение выпрямленного тока. Затрата мощности, расходуемой при этом способе регулирования (рис. 4b), составляет около 0,0001 мощности со стороны выпрямленного тока, т. е. регулирование в данном случае практически производится без потерь.

д) Обратный ток

Электролитические ванны поляризуются протекающим через них током, благодаря чему при прекращении подачи тока на электролиз и сохранении цепи система ванн способна послать ток в обратном направлении. Системы ванн уподобляются при этом батарее гальванических элементов. Если между генерирующими ток машинами и системами ванн не предусмотрены автоматические выключатели, как это часто имеет место, то протекающий через коллектор и якорь машин обратный ток не прервется. Протекающий же в ваннах в обратном направлении ток может вызвать, как уже указывалось выше, весьма тяжелые аварии.

Выпрямитель имеет здесь то преимущество, что он не проводит тока в обратном направлении даже в том случае, когда напряжение выпрямителя будет ниже напряжения батареи ванн. Вентильное действие выпрямителя обеспечивает разрыв цепи тока даже при отсутствии специальных автоматов. В том же случае, когда вследствие нарушения почему-либо вентильных свойств выпрямителя в нем возникает дуга обратного зажигания, достаточно после выключения масляного выключателя со стороны трехфазного тока замкнуть на короткое время батарею ванн накоротко, что, погасив таким образом дугу в выпрямителе, восстановит его вентильные свойства.

На рис. 5 представлена схема защиты для таких случаев, при которых цель, закорачивающая ванны, спустя некоторое время снова разрывается помощью специального реле времени. Для того чтобы эта защита действовала только при обратных зажиганиях

7) „BBC-Nachrichten“, 1932, N. 1, стр. 7.

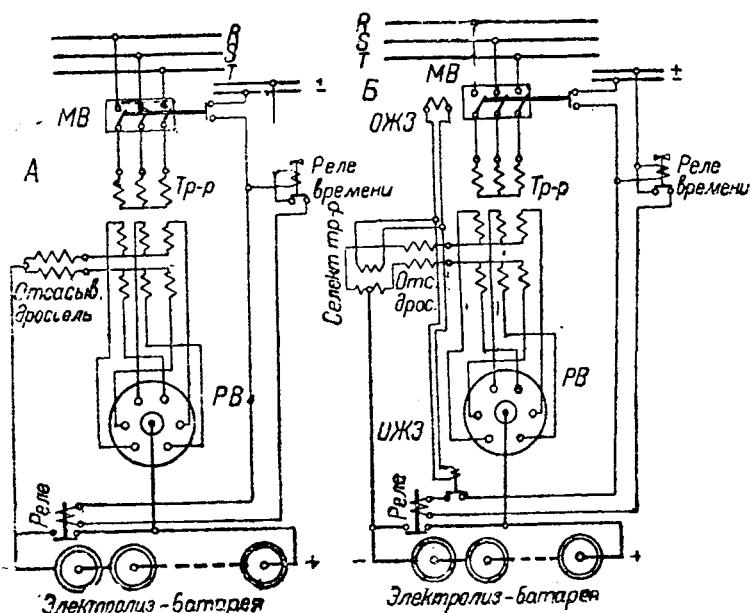


Рис. 5. Защита ртутновыпрямительной установки от обратного тока при электролизе: ОЖЗ — защита, действующая при обратных зажиганиях

таниях в выпрямителе, а не при перегрузках, она может быть выполнена, как указано на рис. 5б, для обычно применяемой в ртутновыпрямительных установках при наличии катушки Кюблера схемы селективной защиты от обратных зажиганий. Пере-рыв в производстве при такого рода авариях может быть ограничен путем применения автоматического повторного включения несколькими секундами.

е) Пульсация

Как на недостаток ртутных выпрямителей указывают на большую, чем при вращающихся преобразователях, пульсацию напряжения выпрямленного тока. Однако тот факт, что в настоящее время сотни аккумуляторных батарей, среди которых есть батареи и на 6000 А зарядного тока, заряжаются от ртутных выпрямителей, указывает на то, что в этом отношении не возникает никаких затруднений. Ток обычно достаточно слаживается всегда имеющейся индуктивностью проводов без помощи каких-либо специальных мер. По указаниям иностранной литературы⁸⁾ пульсация выпрямленного напряжения, хотя и вызывает легкие колебания тока, не может тем не менее считаться препятствием к применению ртутных выпрямителей.

В наиболее неблагоприятных случаях принятием весьма незначительных мер пульсация тока может быть слажена в любой желаемой степени.

II. ТЕХНИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ РТУТНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

В приводимом ниже сравнении мы рассмотрим три типа преобразователей: 1) ртутный выпрямитель, 2) одноякорный преобразователь и 3) мотор-генератор (синхронный или асинхронный).

В табл. 2 приведены основные данные по этим трем типам преобразователей, причем разрядкой указаны особенности данного преобразователя, получившие большее значение. Из этой таблицы мы видим, что в графе «выпрямитель» входит целый ряд благоприятных условий, отпечатанных для наглядности жирным шрифтом.

Прежде всего выпрямитель обладает всеми выгодными свойствами одноякорного преобразователя и притом в значительно большей степени, а также рядом благоприятных свойств мотор-генераторов, как-то: выбираемый по желанию предел напряжения, большая способность к перегрузкам, немедленная готов-

⁸⁾ Nowag, Die Verwendung von Grossgleichrichter für Elektrolyse, „E и М“, 1929, N. 59, стр. 1085.

ность к работе после падения и восстановления затем напряжения и любые условия в сети. При всем этом выпрямитель имеет ряд преимущества сравнительно со всеми другими типами преобразователей, как, например, незначительный вес, возможность обойтись поэтому без фундаментов для установки его, быстрота пуска, бесшумность в работе, простота ухода и большая приспособленность к автоматизации. Отрицательных свойств у ртутных выпрямителей сравнительно мало, и самым существенным из них можно считать неспособность к слаживанию толчков. Другие его недостатки, как, например, невозможность получения реактивной мощности или регенерации энергии, менее существенны, причем последнее обстоятельство имеет значение почти исключительно при электрификации горных дорог и в данном случае, как уже указывалось выше, является даже немаловажным достоинством выпрямителя.

Поэтому неудивительно, что, обладая столькими достоинствами и такими несущественными недостатками, выпрямитель получает широкое применение наряду с вращающимися преобразователями. И если последние до сих пор не вытеснены выпрямителем, то это объясняется тем, что вследствие некоторых возникших вначале затруднений развитие выпрямителяшло более медленным темпом, чем это предполагалось. Но теперь уже можно сказать, что благодаря ряду конструктивных усовершенствований и эти затруднения частично устранены и, вероятно, будут полностью устранены в недалеком будущем, так как они касаются одного только случая работы выпрямителя, а именно возникновения обратных зажиганий.

Переведем теперь общие оценки технических свойств различных преобразователей, приведенные в табл. 2, на язык конкретных цифр.

1. Веса преобразователей без трансформаторов. Как указано в табл. 2, наиболее легким типом преобразователя является ртутный выпрямитель. Веса трех типов выпрямителей, строящихся в настоящее время союзными заводами, РВ-5, РВ-10 и РВ-16/20, будут соответственно 900 (1200); 1000 (1350) и 2000 (2500) kg (в скобках указаны веса выпрямителей с водой). Наибольшая мощность выпрямителя типа РВ-16/20 1000 kW. Вес мотор-генератора такой мощности будет порядка 20—25 t. Вес одноякорного преобразователя такой же мощности будет значительно меньше, но все же не ниже 12—15 t.

2. Занятая площадь. Ртутный выпрямитель типа РВ-16 (мощность 1000 kW) занимает один пологий размером около 3 m² (не учитывая площади, занимаемой питающим выпрямитель трансформатором). Мотор-генератор аналогичной мощности занимает площадь в 15 m² (габариты фундамента). Одноякорный преобразователь той же мощности — около 10 m². Что касается необходимости предусматривать при установке

Таблица 2

Сравнение различных преобразователей переменного тока в постоянный

	Ртутный выпрямитель	Одноякорный преобразователь	Мотор (генератор) синхронный или асинхронный
Вес без принадлежностей	Очень незначительный	Незначительный	Средний
Занятая площадь без принадлежностей	Очень небольшая	Очень небольшая	Средняя
То же, с принадлежностями	Небольшая	Средняя	Средняя
Фундаменты	Никаких	Легкие	Большие
Цена с принадлежностями	Небольшая	Средняя	Высокая
Принадлежности	Трансформатор и регулятор	Трансформатор и регулятор	—
Коэффициент полезного действия	Высок, особенно при частичных нагрузках	Высок и при частичных нагрузках	Средний
Коэффициент мощности	0,95	1,0	—
Отдача реактивной мощности	—	Небольшая	Большая, по желанию
Пределы напряжения	По желанию	1 200—1 500	По желанию
Регулирование напряжения	По желанию	+ 35%	По желанию
Деление напряжения	—	Возможно	Возможно
Продолжительность пуска	Секунды	Минуты	Минуты
Род пуска	Только включение	Асинхронный	Асинхронный
Синхронизация	—	—	Только при синхронном двигателе
Смягчение толчков	Отсутствует	Незначительное	Большое
Возможность перегрузки	Большая	Средняя	Большая
Обратный ток	Невозможен	Возможен	Возможен (только в генераторе)
Допустимое состояние сети	Любое	Спокойное	Любое
Обратная работа	Невозможна	Возможна	Легко возможно
Параллельная работа	Возможна	Возможна	Возможна
Приспособленность к автоматизации и за-нулению	Большая	Хорошая	Хорошая
Шум в работе	Никакого	Обычный для машин	Обычный для машин
Уход	Почти никакого	Обычный для машин	Обычный для машин
Износ	Никакого	Обычный для машин	Обычный для машин

Таблица 3

рутного выпрямителя камеру для его трансформатора, то такую же приходится делать и при установке одноякорного преобразователя. Мотор-генераторы предусматриваются преимущественно с синхронным двигателем с асинхронным запуском посредством автотрансформатора или через реактор. В том и другом случае необходимо соответствующее помещение для автотрансформатора или реактора и для одного или двух масляных выключателей.

При этом необходимо помнить, что ввиду трудностей, сопряженных с выполнением надлежащей изоляции, непосредственное питание двигателя мотор-генератора от сети трехфазного тока возможно только при напряжениях, не превышающих 10—15 кВ, при более высоких напряжениях возникает уже потребность в соответствующем трансформаторе и в помещении для установки его. То же относится и к каскадному преобразователю. Что касается ртутного выпрямителя и одноякорного преобразователя, то пределы напряжения сети трехфазного тока для них неограничены благодаря наличию питающего их трансформатора.

3. Пределы напряжения выпрямленного тока для вращающихся преобразователей ограничиваются в настоящее время величиной в 3000 В, в то время как получение значительно более высоких напряжений помостью ртутных выпрямителей не представляет затруднений. Так, за последнее время фирмой BBC и построен ряд выпрямителей для нужд радиостанций на напряжение выпрямленного тока в 12 кВ.

Впрочем, возможность получения напряжений выпрямленного тока выше 500 V нас и не может интересовать, поокольку применение более высоких напряжений связано с известными затруднениями эксплуатационного характера (см. выше — о выборе напряжения).

4. Регулирование напряжения стороны постоянного тока наиболее легко осуществляется в мотор-генераторах без помощи каких-либо дополнительных приспособлений. У ртутных выпрямителей и у одноякорных преобразователей вследствие жесткой зависимости между напряжениями стороны выпрямленного тока и стороны трехфазного тока изменение напряжения на стороне постоянного тока может производиться только путем регулирования со стороны переменного тока. При необходимости регулировать напряжение в пределах $\pm 5\%$ в обоих последних случаях еще можно обойтись без дополнительных приспособлений, поскольку питающие трансформаторы к выпрямителям и одноякорным преобразователям нормально предусматриваются с соответствующими ответвлениями на стороне обмотки высокого напряжения. Такие пределы регулирования недостаточны в данном случае, где необходима возможность регулирования в пределах около 25%. Поэтому здесь возникает необходимость в установке дополнительных приспособлений: потенциал-регуляторов или ступенчатых регулирующих трансформаторов.

Однако новейшие конструкции ртутных выпрямителей с регулирующими сетками позволяют регулировать напряжение выпрямленного тока в любых пределах и притом совершенно плавно. Таким образом в отношении возможности широко регулировать напряжение постоянного тока новейшие ртутные выпрямители приближаются к мотор-генераторам, превосходя в этом отношении одноякорные преобразователи, при которых обойтись без специальных регулировочных приспособлений не возможно.

Упоминавшиеся выше ртутные выпрямители фирмы BBC, устаревшие у нас в Сомозе (в Челябинске и Владикавказе), снабжены ступенчатыми регулировочными трансформаторами, и допускают регулировку напряжения в пределах 475—575 В, т. е. около 22%.

Союзные заводы, строящие трансформаторы для ртутных выпрямителей (Электрозвавод в Москве), предусматривают в настоящее время возможность переключения на $\pm 5\%$ со стороны переменного тока, что дает возможность регулировать напряжение со стороны выпрямленного тока в тех же пределах. Однако в случае необходимости со специального разрешения Комиссии по стандартизации возможно будет и специальное выполнение ступенчатых трансформаторов с пределами регулирования до $20-25\%$.

Что касается выпрямителей с регулирующими сетками, то в настоящее время в ВЭИ ведется исследование для выпрямителя типа РВ-70 на 7000 А с управляющими сетками. Выпрямители эти будут строиться на новом заводе ртутных выпрямителей.

5. Продолжительность и род пуска. Для пуска ртутного выпрямителя нужно только открыть кран для подачи охлаждающей воды в корпус и включить возбуждение и главный масляник. Никакой синхронизации, как это имеет место при пуске синхронного мотор-генератора или одноякорного преобразователя, не требуется. Длительность пуска выпрямителя измеряется секундами, в то время как пуск вращающихся преобразователей в лучшем случае отнимает минуту-две и требует особой длительности.

6. Способность к перегрузкам. Ртутные выпрямители типов РВ-5, РВ-10 и РВ-16 допускают следующие перегрузки в рабочем состоянии при полной загрузке:

на 100% (пик) через промежуток времени в 3 мин.
50% в течение 3 мин. " в 45
20% " 20 " 3 мин.

Время перегрузки	Перегрузка в процентах от нормальной	
	Мотор-генератор	Одноякорный преобразователь
2 часа	30	20
1 час	40	30
1/2 часа	60	50
3 минуты	150	75
Мгновенно	200	100

Сопоставляя данные о перегрузках ртутных выпрямителей с величинами перегрузок, допускаемых мотор-генераторами и одноякорными преобразователями (приводимыми в табл. 3), видим, что наиболее выносливыми в отношении перегрузок как кратковременных, так и длительных являются мотор-генераторы. Одноякорные преобразователи допускают большие длительные перегрузки, чем ртутные выпрямители, уступая им в отношении кратковременных перегрузок, ограниченных у них условиями коммутации. Меньшие длительные перегрузки, допускаемые ртутными выпрямителями сравнительно с врачающимися преобразователями, объясняются тем, что при небольшой массе анодов последние быстро нагреваются перегрузочными токами и, раскалившись, могут вызвать обратное зажигание.

кальных, могут вызвать обратное зажигание.

7. Состояние сети переменного тока. Посмотрим, как отражаются на работе различных преобразователей изменения в сети переменного тока, от которой питаются эти преобразователи. Изменения эти могут касаться напряжения переменного тока или частоты его и совершенно не отражаются на работе ртутного выпрямителя, который в этом отношении стоит на первом месте. Почти в такой же степени нечувствителен к колебаниям в первичной сети асинхронный мотор-генератор. Наиболее неблагоприятно отражаются колебания в сети на работе одноякорного преобразователя. При резких колебаниях периодичности в первичной сети одноякорный преобразователь может выпасть из синхронизма. То же относится и к синхронному мотор-генератору.

При одножарочных преобразователях всякие колебания силы тока в сети постоянного тока передаются почти не смягченными на сторону переменного тока, тогда как при ртутных выпрямителях и мотор-генераторах колебания эти не отражаются на сети переменного тока.

Неблагоприятно отражается на работе одноякорного преобразователя также всякое искажение формы кривой напряжения, вредно оказываясь на коммутации его. На работу выпрямителей и мотор-генераторов форма кривой напряжения не влияет.

и мотор-трансформаторов форма крыши напряжения не влияет.

8. Параллельная работа. В отношении параллельной работы как между собой, так и с другими типами преобразователей ртутные выпрямители дают полную возможность осуществлять таковую путем соответствующего подбора внешней характеристики. Этим же способом можно добиться любого распределения нагрузки между параллельно работающими выпрямителями.

9. Надежность в эксплуатации. Большая выносливость мотор-генератора в отношении перегрузок, нечувствительность к колебаниям в первичной сети переменного тока, несвязанность частей переменного и постоянного токов ставят его на первое место по надежности работы. Одноякорный преобразователь, как мы выяснили выше, является весьма чувствительной машиной. Добавим, что круговой огонь на коллекторе как частое следствие коротких замыканий в сети постоянного тока нередко приводил к повреждению щеткодержателей и коллектора преобразователя. В последнее время, правда, путем применения быстродействующих выключателей и выполнения добавочных полюсов одноякорных преобразователей с большим магнитным сопротивлением удается значительно снизить опасность возникновения кругового огня и повысить, таким образом, надежность работы этих преобразователей.

Менее чувствительны к коротким замыканиям на стороне выпрямленного тока ртутные выпрямители. При коротком замыкании между анодами ртутных выпрямителей, разносыльном короткому на стороне низкого напряжения питающего выпрямитель трансформатора, последний мгновенно отключается от сети своим масляным выключателем. В тех же случаях, когда выпрямитель работает параллельно с другими преобразователями или генераторами постоянного тока, короткое замыкание между анодами его сопровождается обратным зажиганием, которое в свою очередь может вызвать чрезмерную перегрузку параллельно работающих преобразователей. В настоящее время благодаря соответствующим мерам по борьбе с обратными зажиганиями работа полустанций с ртутными выпрямителями протекает, как показал опыт эксплуатации большого числа установок

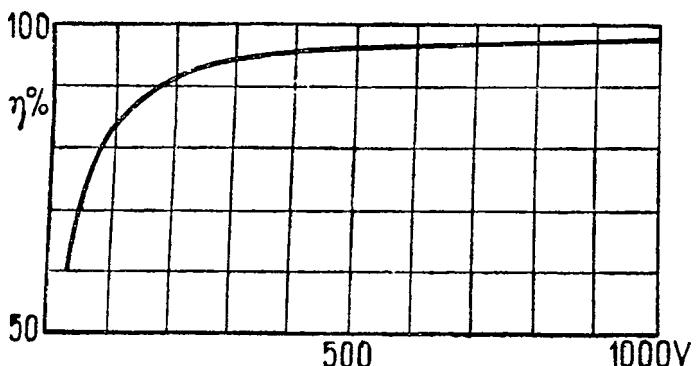


Рис. 6. Коэффициент полезного действия ртутного выпрямителя в зависимости от напряжения

Как на недостаток ртутных выпрямителей можно указать на зависимость бесперебойности работы их от состояния обслуживающей аппаратуры — вакуумных насосов и охладительной установки. В противовес этому недостатку (частично, впрочем, устранимому путем рационального проектирования и надежного выполнения систем охлаждения и сигнализации) работа ртутных выпрямителей не может быть нарушена дефектами в подшипниках, реостатах, регуляторах и пр., как это может случиться у вращающихся преобразователей.

10. Обслуживание. Как было указано выше, в отношении простоты пуска в ход ртутные выпрямители занимают первое место среди преобразователей. Обслуживание работающего выпрямителя сводится:

- к наблюдению за температурой корпуса выпрямителя и
- к наблюдению за температурой корпуса выпрямителя и регулировке количества протекающей через корпус выпрямителя воды для поддержания наиболее благоприятной температуры его;

в) к контролю за непрерывным охлаждением ртутного насоса.
Схема коммутации должна предусматривать надлежащую сигнализацию, которая обращала бы внимание обслуживающего персонала на появление каких-либо дефектов в вакуумной и охладительной системах ртутного выпрямителя, могущих нарушить их нормальную работу. Кроме того, все упомянутые выше операции легко автоматизируются.

Безопасность обслуживания ртутных выпрямителей несколько меньше, чем при вращающихся преобразователях, в связи с тем, что корпус выпрямителя находится под полным напряжением выпрямленного тока. Соответствующими мероприятиями этот недостаток ртутных выпрямителей может быть вполне устранен.

Как на большое достоинство ртутных выпрямителей, весьма облегчающее условия работы обслуживающего персонала, указем на совершенную бесшумность их в работе.

11. Пристосованность к автоматизации. Автоматизация подстанций (получившая в последнее время большое распространение, главным образом, в тяговых установках) имеет следующие преимущества:

а) Экономия электроэнергии достигает 5% вследствие более четкой работы аппаратов, сокращения потерь на холостой ход, включения и выключения машин и аппаратов в зависимости от нагрузки и потребности, экономии на обслуживающем персонале;

б) техническое совершенство, создающее безошибочность операций, надежность работы агрегатов и, следовательно, всей установки в целом.

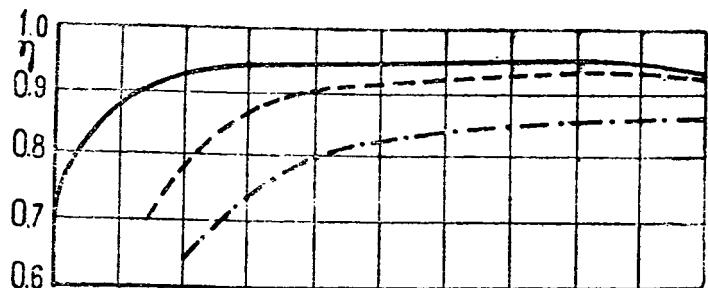


Рис. 7. Коэффициент полезного действия ртутного выпрямителя, одноякорного преобразователя и мотор-генератора

Более простой пуск в ход ртутных выпрямителей схемы с вращающимися преобразователями позволяет, естественно, весьма легко осуществить автоматизацию этой операции. Схема автоматического пуска ртутных выпрямителей несравненно проще и потому надежней в работе, чем у вращающихся преобразователей. У последних даже в наиболее благоприятном случае (асинхронный пуск) схема получается весьма сложной и особенно при пуске одноважорных преобразователей из-за случайной полярности, которая получается на коллекторе при этом пуске. Это требует установки специального реле, отключающего преобразователь в случае неправильной полярности и ставящего его в положение нового пуска, повторяя эту операцию до тех пор, пока преобразователь не получит надлежащую полярность.

Автоматизация контроля за вакуумом, температурой и охлаждением выпрямителя также может быть осуществлена без затруднений, что позволяет, таким образом, полностью автоматизировать работу установки.

III. Экономическое сравнение ртутных выпрямителей с вращающимися преобразователями

До сих пор различные преобразователи сравнивались нами с точки зрения чисто технических достоинств или недостатков того или иного типа. Но правильный выбор типа преобразователя не может быть произведен без учета такого важного фак-

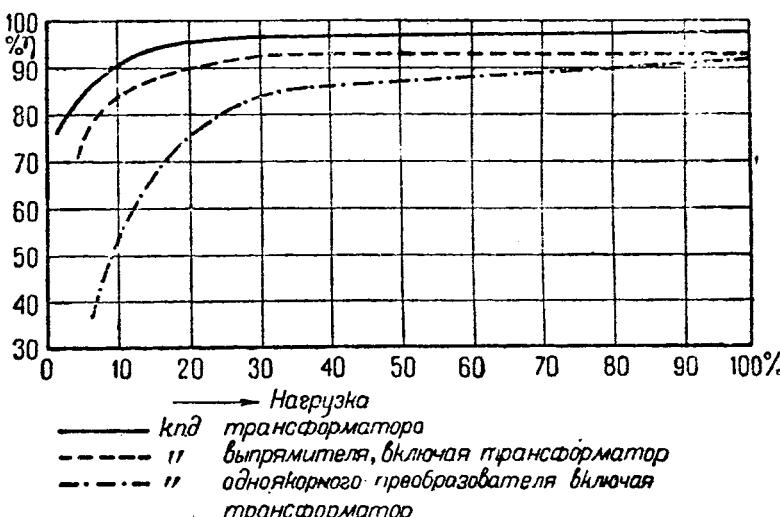


Рис. 8. Напряжение выпрямленного тока 500 В

тора, как величина расходов по эксплуатации установки, иными словами, экономичности в работе, а также первоначальной стоимости.

К сравнению различных типов преобразователей с этой точки зрения мы перейдем теперь.

12. Экономичность в работе. Степень экономичности в работе преобразователя определяется следующими показателями.

- к. п. д. преобразователя;
- коэффициент мощности;
- расходы по эксплуатации.

а) Потери в сосуде ртутного выпрямителя, как известно, обусловливаются падением напряжения в вольтовой дуге в парах ртути. Других потерь в сосуде выпрямителя нет. Так как падение напряжения в дуге почти не зависит от напряжения и величины выпрямленного тока (и равно в среднем около 22–25 В) то отсюда следует, что к. п. д. собственно ртутного выпрямителя (сосуда его) будет тем выше, чем выше напряжение выпрямленного тока, и почти не изменяется при различной нагрузке выпрямителя, оставаясь достаточно высоким и при малых значениях последней. На рис. 6 показана зависимость к. п. д. выпрямителя от напряжения выпрямленного тока.

На рис. 7 приведены кривые к. п. д. в зависимости от нагрузки для ртутного выпрямителя, одноякорного преобразователя и мотор-генератора для напряжения выпрямленного тока в 500 В (данные АЕГ).

При определении к. п. д. всей установки в целом необходимо, естественно, учесть также и потери в обслуживающих механизмах (трансформаторе возбуждения и в печке ртутного насоса) выпрямителя и в питающем его трансформаторе. Кривые к. п. д. различных преобразователей, учитывающие также потери в трансформаторах выпрямителя и одноякорного преобразователя, приведены на рис. 8.

Завод «Электросила» гарантирует следующие к. п. д. установ-

Нагрузка . . .	1/4	2/4	3/4	4/4
для напряжения выпрямленного тока	230 V 86 ± 1	88 ± 1	88 ± 1	86 ± 1%
для напряжения выпрямленного тока	460 V 89 ± 1	91 ± 1	91 ± 1	90 ± 1%
для напряжения выпрямленного тока	600 V 91 ± 1	91 ± 1	93 ± 1	92 ± 1%

Таблица 4

Коэффициент полезного действия вращающихся преобразователей при различных нагрузках (в процентах)

Нагрузка	Мотор-генератор			Одноякорный преобразователь (с трансформатором)		
	AEG 500 kW 600 V 1 000 A	ХЭМЗ 1 000 kW 400 V 2 500 A	Электросила 920 kW 230 V 4 000 A	AEG 500 kW 500 V 1 000 A	ХЭМЗ 600 kW 840 A	ХЭМЗ 400 kW 230 V 1 750 A
	87,5	83,0	84,5	91,0	91,0	90,0
3/4 . . .	85,0	86,0	—	90,0	90,0	—
2/4 . . .	82,0	83,0	—	88,0	89,0	88,0
1/4 . . .	70,0	—	—	80,0	82,0	—

Сравнивая к. п. д. выпрямителей с данными, приведенными в табл. 4, видим, что:

1) к. п. д. мотор-генераторов во всех случаях ниже, чем у одноякорных преобразователей и ртутных выпрямителей;

2) при 600 V к. п. д. ртутных выпрямителей выше, чем у одноякорных преобразователей, причем разница эта особенно заметна при малых нагрузках ($\frac{1}{4}$ от полной), достигая 8%. С увеличением мощности одноякорного преобразователя разница эта несколько уменьшается;

3) при напряжении в 460 V при полной нагрузке к. п. д. выпрямителя ниже, чем у одноякорного преобразователя, превышая его при низких нагрузках. То же относится и к случаю 230 V выпрямленного тока.

Сравнение к. п. д. различных преобразователей при напряжении 120 V нами не производится, так как при этом напряжении применение ртутных выпрямителей неэкономично (к. п. д. их при этом равен около 83%). Зная к. п. д. при различных нагрузках и имея график нагрузки установки, легко можно определить ту экономию на электроэнергии, которую можно получить при том или ином типе преобразователя.

Годовая экономия на электроэнергию определяется, если суючную экономию (в киловаттчасах) умножим на число дней работы установки в течение года. Это, конечно, будет правильно лишь для тех случаев, когда график, по которому мы определяем величину суючной экономии, является типовым суючным графиком для целого года. При отсутствии такого графика годовую экономию энергии при разных преобразователях можно ориентировочно определить следующим образом:

Допустим, что годовая выработка энергии подстанцией будет PT , где P — мощность преобразователей, а T — число часов работы в год (учитывая при этом уже и коэффициент загрузки агрегатов); далее положим, что к. п. д. одного из сравниваемых преобразователей при данной загрузке будет η_1 , а другого — η_2 , причем $\eta_1 < \eta_2$. Тогда энергия, потребленная из первичной сети первым преобразователем, определяется из соотношения

$$A_1 = \frac{PT}{\eta_1},$$

а вторым преобразователем

$$A_2 = \frac{PT}{\eta_2}.$$

Экономия в энергии будет равна

$$\Delta A = A_1 - A_2 = PT \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right),$$

а в процентах по отношению к выработанной энергии

$$\Delta A \% = PT \left(\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right) \cdot \frac{1 \cdot 100}{PT} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1 \eta_2} \cdot 100 = \alpha (\eta_2 - \eta_1) \cdot 100.$$

Таким образом можно сказать, что годовая экономия в энергии при разных преобразователях (в процентах), отнесенная к выработанной подстанцией энергии, будет равна разности к. п. д. сравниваемых преобразователей при данной загрузке, умноженной на коэффициент

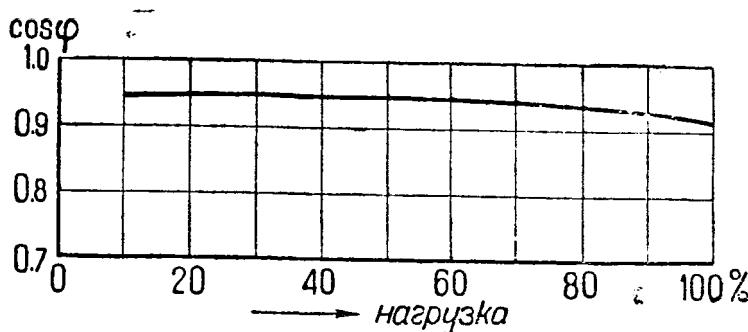


Рис. 9. Коэффициент мощности ртутного выпрямителя (вместе с трансформатором)

Это дает возможность ориентировочно определить годовую экономию в энергии, забираемой подстанцией на первичной сети при оборудовании ее ртутными выпрямителями сравнительно с тем, если бы она была оборудована вращающимися преобразователями.

Б) Коэффициент мощности ртутного выпрямителя без трансформатора равен 0,95, а с трансформатором для наиболее употребительных схем 0,94. На рис. 9 приведена кривая, показывающая изменение коэффициента мощности выпрямителя в зависимости от нагрузки. Как видно из кривой, величина коэффициента мощности почти не меняется с нагрузкой. Некоторое уменьшение его при увеличении нагрузки объясняется увеличением с нагрузкой расстояния в трансформаторе.

Для практики весьма интересным является вопрос о том, как влияет на общий коэффициент мощности сети, питающей приемники энергии, потребляющие реактивную мощность, при соединение к ней ртутного выпрямителя.

Вопросы эти были исследованы Krigger'ом⁹) аналитически, и результаты этого исследования сводятся к следующему: если сдвиг фаз между напряжением первичной сети и током, потребляемым индукционными приемниками энергии от этой сети (электродвигатели), будет больше 20° (т. е. $\cos \phi$ меньше 0,94) и если при этом мощность присоединяемого к сети ртутного выпрямителя (или ртутновыпрямительной установки) будет меньше $\frac{1}{6}$ всей мощности в первичной сети, то независимо от коэффициента мощности выпрямителя последний влияет на коэффициент мощности сети так, как повлияло бы присоединение к сети приемника, потребляющего только активный ток, иными словами, коэффициент мощности при этом улучшается. Величина этого тока равна произведению из величины выпрямленного тока на коэффициент искажения выпрямителя (0,96). Вывод этот относится ко всем выпрямителям независимо от числа фаз их и схемы соединения питающих их трансформаторов. Равным образом сказанное относится также и к тому случаю, когда приемники переменного тока потребляют из сети опережающий ток, т. е. когда $\cos \phi$ сети отрицательный.

Для большинства установок отношение мощности, потребляемой ртутным выпрямителем (или ртутновыпрямительной установкой), к мощности всей первичной сети в действительности не будет превышать $\frac{1}{6}$, и приведенные выше выводы Krigger'a будут, следовательно, справедливы почти для всех случаев, встречающихся на практике.

Из сказанного следует, что присоединение ртутного выпрямителя к сети переменного тока, хотя и может в некоторых случаях улучшить до известной степени коэффициент мощности этой сети, все же не может повлиять на него так благоприятно, как это возможно сделать с помощью вращающихся преобразователей. Ртутный выпрямитель не может отдавать в сеть реактивную мощность как одноякорный преобразователь, могущий работать с опережающим коэффициентом мощности, или как мотор-генератор, который обладает этой способностью еще в большей мере, чем одноякорный преобразователь.

В тех случаях, когда учитывается и оплачивается только активная мощность, коэффициент мощности для преобразовательной установки не имеет особого значения и при выборе типа преобразователя может не учитываться. Но в тех случаях, когда учитывается и оплачивается также и реакторная мощность, потребляемая преобразовательной установкой, или когда последняя помимо преобразования переменного тока в постоянный должна улучшить коэффициент мощности первичной сети, вырабатывая реактивную мощность, необходимо, выбирая тип преобразователя, при определении степени экономичности работы различных типов преобразователей учитывать также и вышеуказанные свойства их.

Касаясь последнего показателя экономичности в работе различных преобразователей — расход в по эксплуатации, заметим, что расходам на смазку, обтирку, наждачную бумагу, необходимым при эксплуатации вращающихся преобразователей при эксплуатации ртутных выпрямителей, противостоят расходы на охлаждение. Величина последних зависит от примененной в данном конкретном случае системы охлаждения, т. е. целиком

сит местных условий, и указать заранее величину этих расходов (процентуально от стоимости энергии) не представляется возможным. Необходимо отметить, что в тех случаях, где для охлаждения выпрямителей (непосредственного или косвенного) приходится пользоваться водопроводной водой и где последняя дорога, величина эксплоатационных расходов может иметь решающее значение при экономическом сравнении различных преобразователей.

При сравнении величины эксплоатационных расходов при различных преобразователях необходимо помимо перечисленных выше учесть также и расходы, связанные с амортизацией преобразователей. В этом отношении ртутный выпрямитель стоит на первом месте, так как, не имея движущихся частей (за исключением форвакумного насоса, работающего, впрочем, не больше 2—3 час. в сутки), он почти не изнашивается. Замена анодов или других частей выпрямителя при правильной эксплуатации и надлежащем охлаждении производится лишь в очень редких случаях.

13. Стоимость разных типов преобразователей. Первоначальная стоимость различных преобразователей играет, конечно, не последнюю роль при оценке экономичности того или иного типа преобразователя и часто является решающим фактором при выборе последнего. Поэтому весьма желательно было бы указать точные соотношения между стоимостями различных преобразователей. К сожалению, дать такие соотношения затруднительно, так как стоимость преобразователей зависит от многих частных условий, меняющихся с течением времени (в частности, от того, каким заводом изготавливается данный преобразователь).

Здесь мы можем лишь указать, что для равных мощностей и одинакового напряжения выпрямленного тока стоимость ртутного выпрямителя в среднем меньше таковой для одноякорного преобразователя примерно на 30%, а для мотор-генератора — на 40—50% (ориентировочно). При этом учитывается также и стоимость трансформаторов для выпрямителя или одноякорного преобразователя. Указанные соотношения получены, исходя из средней стоимости одного установленного киловатта для разных типов преобразователей для наиболее употребительных напряжений. Точные соотношения для отдельных конкретных случаев должны быть получены на основе предложений заводов, изготавлиющих преобразователи.

Что касается ртутных выпрямителей, то здесь стоимость одного установленного киловатта будет, как уже указывалось, тем меньше, чем выше применяемое напряжение выпрямленного тока. Стоимость выпрямителей союзного производства для напряжений 230, 460 и 600 В постоянного тока будет равна соответственно 90, 55 и 45 руб./кВт (ориентировочно), т. е. находится примерно в тех же соотношениях, что и соответственные стоимости выпрямителей фирмы BBC, приведенные на рис. 1.

При определении первоначальной стоимости всей установки для различных типов преобразователей необходимо также учесть разницу в стоимости строительной части подстанций, а также стоимости фундаментов и подъемных приспособлений, необходимых при установке вращающихся преобразователей и ненужных для ртутных выпрямителей. Последние зато нуждаются в установке системы охлаждения и печей для поддержания в помещении выпрямителей надлежащей температуры (не ниже 10—12° С) в зимнее время.

Поясним все сказанное выше сравнительным подсчетом для примерной установки.

Пусть дана установка для производства хлора, оборудованная ваннами Х-2" производительностью в 5 000 т хлора в год. В установке включены восемь серий ванн параллельно. Каждая серия состоит из 68 последовательно соединенных ванн. Нормальный ток на ванну составляет 1 000 А, напряжение 3,6 — 4 В. Таким образом суммарный ток будет равен 8 000 А при напряжении в $(3,6 - 4) \cdot 68 = 245 \div 270$ В.

Количество отдаваемой преобразователями за год энергии при 7 000 час. работы в год составит

$$8 000 \cdot 245 \cdot 7 000 \cdot 10^{-3} = 13 700 000 \text{ kWh.}$$

Для токоснабжения этой установки могут быть применены или два ртутных выпрямителя типа РВ-40 4 000 А, или два мотор-генератора на 1 000 кВт. При полной нагрузке ртутных выпрямителей к. п. д. их будет равен около 86%, к. п. д. мотор-генераторов при тех же условиях — 84,5%.

Годовая экономия в электроэнергии согласно вышесказанному определится:

$$13 700 000 \cdot (86 - 84,5) \cdot \frac{1 \cdot 10^{-2}}{0,86 \cdot 0,845} = 283 000 \text{ kWh},$$

что при стоимости электрической энергии 4 коп. kWh составит $283 000 \cdot 0,04 = 11 320$ руб.

в пользу ртутных выпрямителей.

Сравнивая ртутные выпрямители с одноякорными преобразователями, к. п. д. которых для данных условий выше, чем у ртутных выпрямителей (равен около 90%), получим обратное соотношение, т. е.

экономию на электроэнергию в пользу одноякорных преобразователей, именно:

$$13 700 000 (90 - 86) \cdot \frac{1 \cdot 10^{-2}}{0,86 \cdot 0,90} = 70 000 \text{ kWh},$$

что составляет

$$70 000 \cdot 0,04 = 28 000 \text{ руб.}$$

Полученные цифры экономии на электроэнергии для обоих случаев не являются, однако, показательными в отношении экономичности того или другого типа преобразователей, так как общая сумма годовых затрат на эксплуатацию определяется еще и отчислениями, обусловливающими величинами первоначальных затрат при различных типах преобразователей.

Величину первоначальных затрат определим, исходя из условий установки трех ртутных выпрямителей типа РВ-40 4 000 А (два в работе, один резервный) или соответственно трех мотор-генераторов по 1 000 кВт, или трех одноякорных преобразователей такой же мощности.

Стоимость трех ртутных выпрямителей типа РВ-40 будет равна (ориентировочно) $70 000 \cdot 3 = 210 000$ руб. (сюда входит также и стоимость питающих выпрямителей трансформаторов). Стоимость трех мотор-генераторов по 1 000 кВт будет равна приблизительно $120 000 \cdot 3 = 360 000$ руб. и трех одноякорных преобразователей — приблизительно $85 000 \cdot 3 = 255 000$ руб.

К последним двум цифрам необходимо прибавить еще стоимость фундамента, составляющую ориентировочно около 20% стоимости агрегата, т. е. для мотор-генераторов первоначальные затраты будут $360 000 + 360 000 \cdot 0,20 = 432 000$ руб.; для одноякорных преобразователей

$$255 000 + 255 000 \cdot 0,20 = 306 000 \text{ руб.}$$

Величина годовых отчислений (проценты на капитал, амортизация и ремонт) для вращающихся преобразователей составляет около 19% от стоимости первоначальных затрат, для ртутных выпрямителей около 17% (амортизационный срок ртутных выпрямителей больше, чем у вращающихся преобразователей, и расходы на ремонт меньше). Таким образом величина годовых отчислений получится

Для ртутных выпрямителей	$210 000 \cdot 0,17 = 35 000$ руб.
• мотор-генераторов	$432 000 \cdot 0,19 = 82 000$ •
• одноякорных преобразователей	$306 000 \cdot 0,19 = 58 000$ •

Прибавив к величине экономии на электроэнергии при первом варианте сравнения (ртутные выпрямители или мотор-генераторы) разницу в годовых отчислениях, получим общую экономию в годовых затратах;

$$11 320 + (82 000 - 35 000) = 58 320 \text{ руб.}$$

в пользу ртутных выпрямителей.

Для второго варианта сравнения (ртутные выпрямители или одноякорные преобразователи) экономия на электроэнергии в пользу преобразователей должна быть уменьшена на разницу в годовых отчислениях. Получим, таким образом,

$$28 000 - (58 000 - 35 000) = 5 000 \text{ руб.}$$

в пользу одноякорных преобразователей.

Необходимо отметить, что приведенный подсчет является сугубо ориентировочным, и здесь не учтен ряд обстоятельств, приняв во внимание которые, мы получили бы еще большую экономию в годовых затратах в пользу ртутных выпрямителей сравнительно с мотор-генераторами в первом варианте сравнения и свели бы на нет экономию в пользу одноякорных преобразователей — во втором. Так, например, подсчет не учитывает значительно больших затрат на здание для вращающихся преобразователей и на необходимые для них тяжелые краны. При ртутных выпрямителях возможно обойтись вовсе без кранов или, в крайнем случае, ограничиться легкой мостовой лебедкой.

С другой стороны, подсчет не учитывает затрат на систему водяного охлаждения для ртутных выпрямителей. Этим затратам, однако, в случае вращающихся преобразователей противостоят затраты на специальные приспособления для очистки воздуха для вентиляции машин. Такая очистка, как уже указывалось, может быть необходима в условиях электрохимического производства, где воздух, охлаждающий машины, может содержать пары или газы, вредно действующие на открытые части машин, как коллекторы и контактные кольца. Можно было бы, правда, обойтись и без такой очистки воздуха, но тогда пришлось бы мириться с необходимостью периодической остановки машин для чистки коллекторов и контактных колец. Такая вынужденная остановка работающей машины с точки зрения эксплуатационной нежелательна, а иногда и невозможна, и поэтому при сравнительных экономических подсчетах затраты на приспособления для очистки воздуха, вообще говоря, должны учитываться наравне с прочими.

В данном случае, к сожалению, учесть эти затраты, равно как и затраты на систему охлаждения для ртутных выпрямителей, не представляется возможным, так как величина их зависит от конст-

руководного исполнения воздухоочистки или системы водяного охлаждения в каждом отдельном конкретном случае. Не учитывая эти затраты, мы тем не менее не вносим существенных погрешностей в приведенный выше подсчет, так как разница в расходах по выполнению и эксплоатации воздухоочистных устройств и системы охлаждения выпрямителей во всяком случае не будет настолько значительной, чтобы ощутительно повлиять на результаты сравнения.

Действительно, необходимое для охлаждения (непосредственного) ртутных выпрямителей количество воды определяется в 1 л/А·ч. При жесткой воде и необходимости вследствие этого применения циркуляционной системы охлаждения расход воды увеличится примерно раза в два, т. е. до 2 л/А·ч. При напряжении выпрямленного тока в 245 В это составит около 8 л/ч на 1 кВ мощности выпрямителя; при 500 В около 4 л/ч на 1 кВ.

При охлаждении вращающихся преобразователей воздухом, охлаждаемым в свою очередь проточной водой, т. е. при системе воздушного охлаждения с замкнутым циклом, расход воды на 1 кВ составляет около $4 \div 6$ л/ч. При мотор-генераторах (для обеих машин) это составит по меньшей мере 8 л/ч на 1 кВ мощности постоянного тока, т. е. столько же, сколько и при ртутных выпрямителях в наихудших условиях (при 245 В).

Приведенный подсчет проделан для случая применения в установке напряжения выпрямленного тока в 245 В. Результаты этого подсчета достаточно убедительно подтверждают все сказанное выше об экономических преимуществах ртутных выпрямителей перед вращающимися преобразователями даже при сравнительно низком эксплуатационном напряжении (245 В). Повысив это напряжение, мы еще в большей степени увеличим экономический эффект от применения ртутных выпрямителей, как это показывает следующий подсчет:

При последовательном соединении вышеуказанной установки 136 ванн и параллельном соединении 4 серий суммарный ток будет

$$1000 \cdot 4 = 4000 \text{ A}$$

при напряжении в

$$(3,6 \div 4) \cdot 136 = 490 \div 540 \text{ V.}$$

Количество отдаваемой преобразователями за год энергии будет то же, т. е. 13 700 000 kWh.

Коэффициент полезного действия ртутных выпрямителей при вышеупомянутых напряжениях будет равен в среднем около 92%, коэффициент полезного действия мотор-генераторов — около 88%, а одноякорных преобразователей — около 92%.

Сравнивая ртутные выпрямители с мотор-генераторами, получим годовую экономию в электроэнергии в пользу первых:

$$13 700 000 (92 - 88) \frac{1 \cdot 10^{-2}}{0,92 \cdot 0,88} = 67 500 \text{ kWh},$$

что составляет

$$67 500 \cdot 0,04 = 27 000 \text{ руб./год.}$$

Одноякорные преобразователи в данном случае в отношении экономии электроэнергии равнозначны ртутным выпрямителям.

Величина первоначальных затрат определяется, исходя из условия установки двух ртутных выпрямителей типа РВ-40 (один резервный) или соответственно двух мотор-генераторов по 2 000 kW или двух одноякорных преобразователей той же мощности.

Стоимость двух ртутных выпрямителей будет равна (ориентировочно) $75 000 \cdot 2 = 150 000$ руб. Стоимость двух мотор-генераторов по 2 000 kW — ориентировочно $200 000 \cdot 2 = 400 000$ руб. и двух одноякорных преобразователей ориентировочно $120 000 \cdot 2 = 240 000$ руб.

Учитывая стоимость фундаментов, в последних двух случаях получим: для мотор-генераторов $400 000 + 400 000 \cdot 0,20 = 480 000$ руб., для одноякорных преобразователей $240 000 + 240 000 \cdot 0,20 = 288 000$ руб.

Величина годовых отчислений для ртутных выпрямителей $150 000 \cdot 0,17 = 25 500$ руб., для мотор-генераторов $480 000 \cdot 0,19 = 91 000$ руб. и для одноякорных преобразователей $288 000 \cdot 0,19 = 55 000$ руб.

Экономия в годовых затратах для случая сравнения выпрямителей с мотор-генераторами получается

$$270 000 + (91 000 - 25 500) = 92 500 \text{ руб.}$$

и для случая сравнения выпрямителей с одноякорными преобразователями

$$55 000 - 25 500 = 29 500 \text{ руб.}$$

в обоих случаях в пользу ртутных выпрямителей.

Заключение

Вопрос о целесообразности применения ртутных выпрямителей для токоснабжения электролиза рассмотрен нами как с точки зрения соответствия технических свойств этих преобразователей специфическим требованиям данного производства, так и с точки зрения эксплоатационных преимуществ их перед вращающимися преобразователями.

При этом сравнении мы за отсутствием в настоящее время опытных данных о работе выпрямителей в союзных электрохимических установках пользовались соответствующими указаниями, имеющимися в различной иностранной технической литературе. Далее, различные типы преобразователей сравнивались в отношении экономичности их в работе и с учетом величины первоначальных затрат. Сравнение это иллюстрировано соответствующими примерными подсчетами.

В результате проведенных технико-экономических сравнений и подсчетов приходим к следующим выводам:

1. В отношении величины первоначальных затрат и экономичности в работе ртутный выпрямитель имеет все преимущества перед вращающимися преобразователями, уступая лишь одноякорному преобразователю (только по экономичности в работе) при низких напряжениях при условии полной загруженности.

2. По надежности в эксплуатации и нечувствительности к изменениям в первичной сети и в режиме работы выпрямитель значительно превосходит одноякорный преобразователь, и в этом отношении сравнивать его можно только с мотор-генератором. Последний, однако, как и одноякорный преобразователь, уступает выпрямителю в отношении чувствительности к вредному воздействию газов и кислотных паров на коллектор и контактные кольца.

Возможность регулировать напряжение выпрямленного тока при мотор-генераторе в широких пределах без помощи каких-либо добавочных приспособлений, необходимых для этого в случае применения ртутного выпрямителя (также и одноякорного преобразователя), является его неоспоримым крупным достоинством. Однако значительная экономия в первоначальных затратах при ртутных выпрямителях и превосходство их над мотор-генераторами по экономичности в работе вполне окупает расходы на эти специальные регулировочные приспособления.

Уступают ртутные выпрямители мотор-генераторам только в тех случаях, где установка помимо преобразования переменного тока в постоянный должна еще вырабатывать и реактивный ток для улучшения коэффициента мощности первичной сети. Конечно, и в этих случаях окончательный выбор может быть произведен только на основании результатов соответствующего экономического сравнения.

ИЗ РАБОТ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИНСТИТУТОВ И ЛАБОРАТОРИЙ

Опыты с ртутным выпрямителем, управляемым посредством сеток

Инж. Н. Н. Петухов и инж. М. А. Асташев

Завод „Электросила“

Отмечая большую актуальность вопроса об управлении ртутными выпрямителями посредством сеток, особенно для использования их в электролизных производствах (алюминиевом, азотном и др.), редакция помещает статью Петухова и Асташева, посвященную описанию опытов завода „Электросила“ в этом направлении. В настоящий момент по предложению ВЭИ завод приступил уже к постройке опытной модели на 7 000 А.

Не будучи согласна с рядом положений и выводов, выдвигаемых авторами, как, например, обязательной зависимости сетки от температуры корпуса выпрямителя, о факторах, влияющих на изменение скорости деноионизации, о невозможности задержать уже возникшую дугу, о роли реактивности в цепи сетки на обратное зажигание и пр., редакция тем не менее считает излагаемый экспериментальный материал весьма ценным и рекомендует его вниманию читателей, поскольку он с исчерпывающей ясностью подтверждает полную возможность управления ртутными выпрямителями путем сеток в очень широких пределах.

Редакция

§ 1. Физические свойства сеток

В связи с потребностью промышленности в мощном ртутном выпрямителе с регулируемым напряжением на заводе „Электросила“

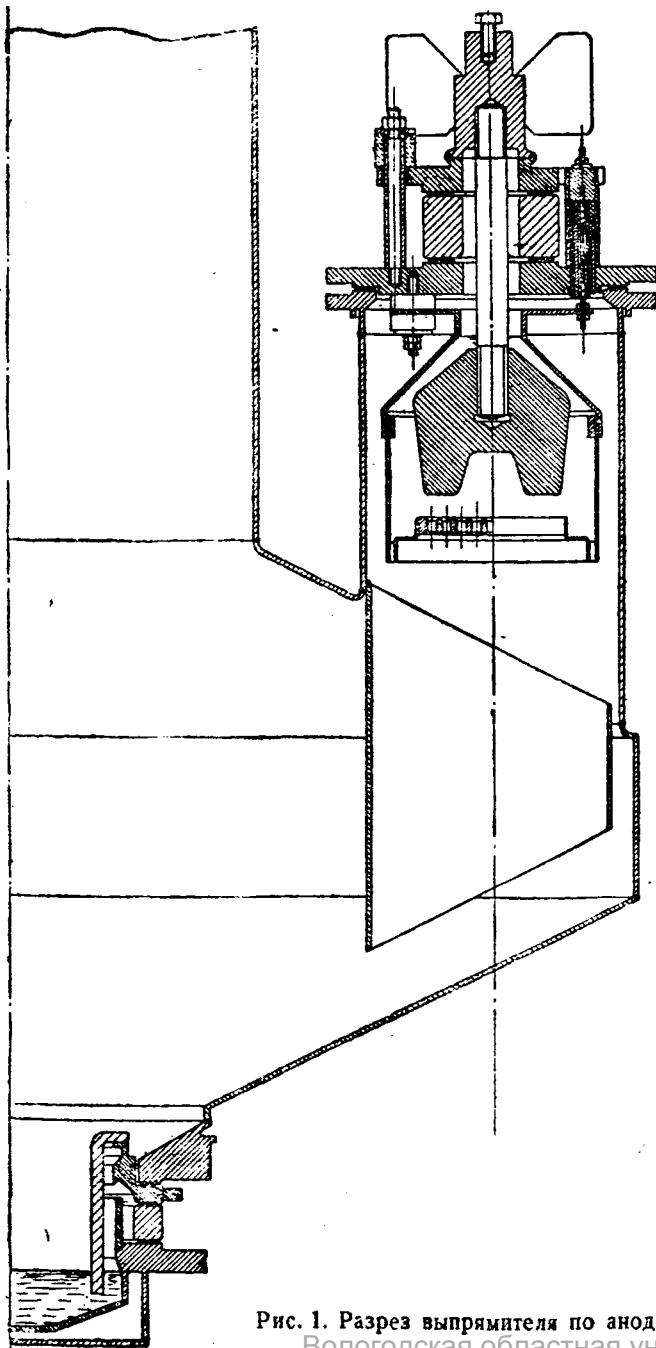


Рис. 1. Разрез выпрямителя по аноду

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

были проведены исследования, связанные с вопросом конструирования выпрямителя с управляемыми сетками.

Исследование было подвергнуто выпрямитель типа РВ-10 (максимальный выпрямленный ток $I_a = 1000$ А) при фазном напряжении трансформатора в 100 В.

Разрез этого выпрямителя по аноду приведен на рис. 1. Картинка действия сетки ртутного выпрямителя становится достаточно простой, если разбить рассмотрение физического процесса на два периода: период горения анода и период негорения или перио-

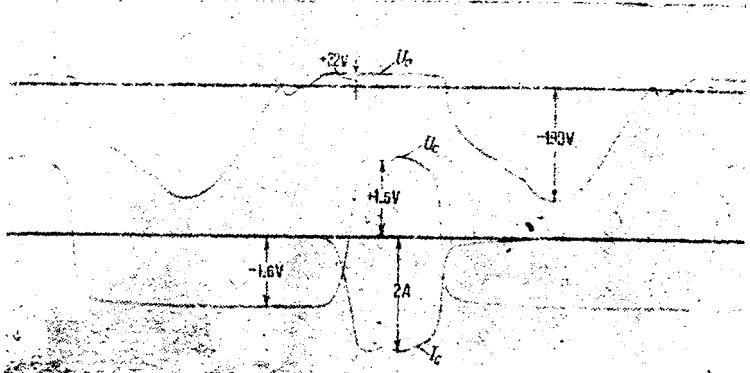


Рис. 2а. Осциллограммы тока и напряжения сетки при сопротивлении в цепи сетки $R_c = 12 \Omega$

предшествующий горению анода. Во время горения анода действие сетки совершенно уничтожается, ибо вследствие наличия большого количества положительных ионов сетка приобретает потенциал дуги, т. е. разность потенциалов U_g между сеткой и катодом становится равной падению напряжения на этом участке дуги. Следовательно, при горящем аноде сетка становится положительной по отношению к катоду независимо от того напряжения, которое ей сообщено внешней э. д. с.

На рис. 2а приведена осциллографическая картина тока и напряжения сетки; в цепи сетки в этом случае включено сопротивление $R_c = 12 \Omega$ и на

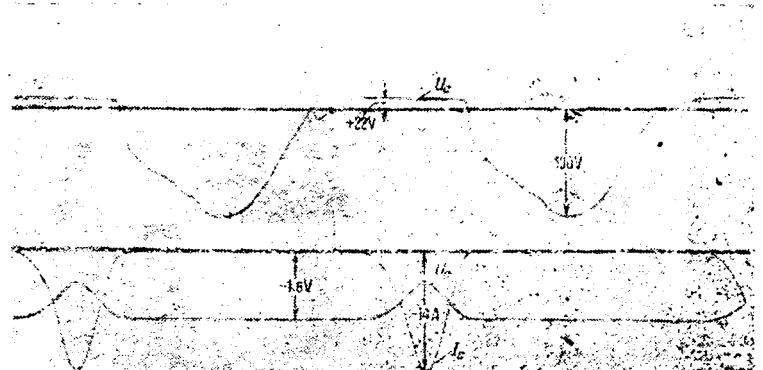


Рис. 2б. Осциллограмма тока и напряжения сетки при сопротивлении в цепи сетки R_c , равном внутреннему сопротивлению аккумуляторной батареи

www.booksite.ru

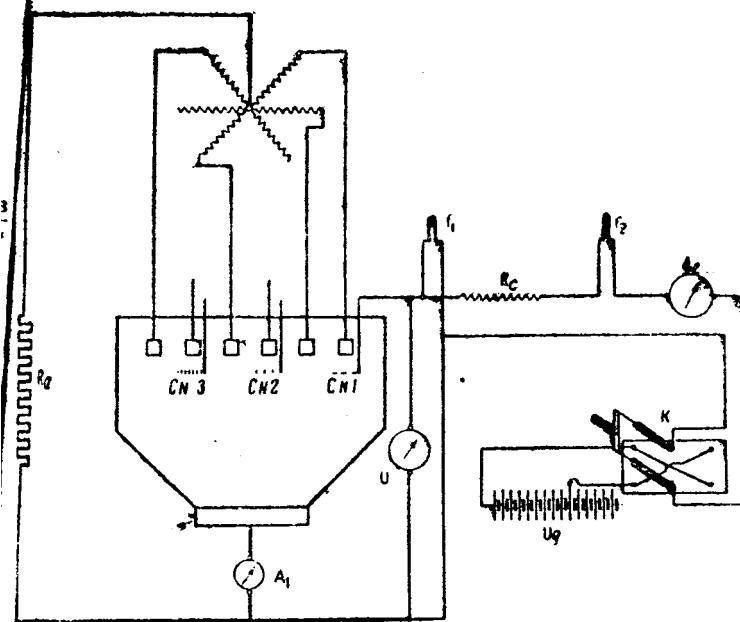


Рис. 3. Схема исследования свойств сеток. U_g — источник э. д. с.; $R_c = 100 \Omega$

сетку подано отрицательное напряжение от аккумуляторной батареи, э. д. с. которой $U_g = 16$ V. Как мы видим, в период горения анода напряжение на сетке становится равным падению напряжения в дуге (+17 V по отношению к катоду). Ток сетки при этом достигает 2 A.

Однако если уменьшить сопротивление в цепи сетки, то можно получить и в период горения отрицательное напряжение на сетке. На рис. 2б представлена осциллография тока и напряжения сетки при сопротивлении в цепи сетки, равном внутреннему сопротивлению аккумуляторной батареи. Батарея имеет э. д. с. $U_g = 16$ V.

Следовательно, при очень больших сеточных токах (порядка 15 A) можно заставить сетку оставаться отрицательной и в период горения анода. Только в этом случае получается картина, обычно приводимая в литературе: отрицательная сетка, окруженная облачком положительных ионов.

Из сказанного следует логическое заключение: задержать при помощи сетки уже горящую дугу невозможно, если, конечно, отказатьься от таких сеточных токов, мощность которых сравнима с мощностью анодной дуги.

Табл. 1, данные которой получены посредством осциллографических измерений, достаточно иллюстрирует все вышесказанное относительно периода горения. U_c — разность потенциалов между сеткой и катодом; U_g — напряжение аккумулятора, включенного в цепь сетки; I_c — сеточный ток, направление которого считается положительным, когда от катода на сетку идут электроны, и отрицательным — при таком же следовании положительных ионов внутри выпрямителя.

Таблица 1

U_g V	U_c V	I_c mA
+20	+16	+560
+18	+16,5	0
-16	+17,1	-367
-96	+18,4	-1 000

Схема опыта приведена на рис. 3. Сетка питалась от аккумулятора. В выпрямителе типа РВ-10 работали четыре анода; один анод был управляемый с одной из трех исследуемых сеток, остальные три анода были свободны от сеток. Сопротивление в цепи сетки $R_c = 100 \Omega$.

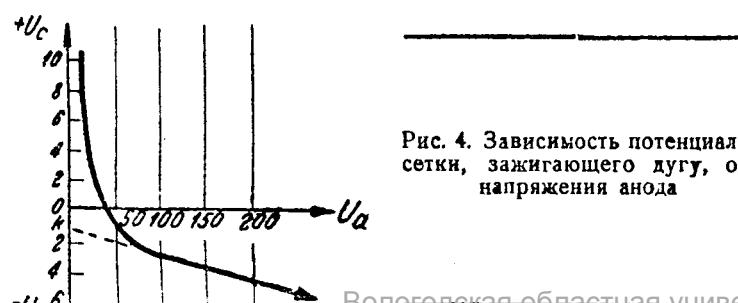


Рис. 4. Зависимость потенциала сетки, зажигающего дугу, от напряжения анода

Совершенно другая картина имеет место в период негорения анода (табл. 2). Мы видим, что в период негорения анода напряжение «сетка-катод» следует за напряжением источника э. д. с. и сетка способна стать отрицательной по отношению к катоду. Явления, происходящие в период негорения анода, аналогичны явлениям обыкновенной триодной лампы. Однако существует ряд отступлений от чистой картины триода.

Таблица 2

U_g V	U_c V	I_c mA
+96	+13,6	+69,3
+20	+12,0	+66,6
+16	+11,2	+28,1
+12	+10,4	0
+8	+6,7	-9,75
0	0	-10
-96	-96	-10

Одним из таких отступлений является наличие остаточных зарядов, существующих еще после прекращения горения анода в течение нескольких тысячных долей секунды. Но в момент, непосредственно предшествующий загоранию анода, мы имеем почти электронный разряд, так как в области сетки имеются только электроны.

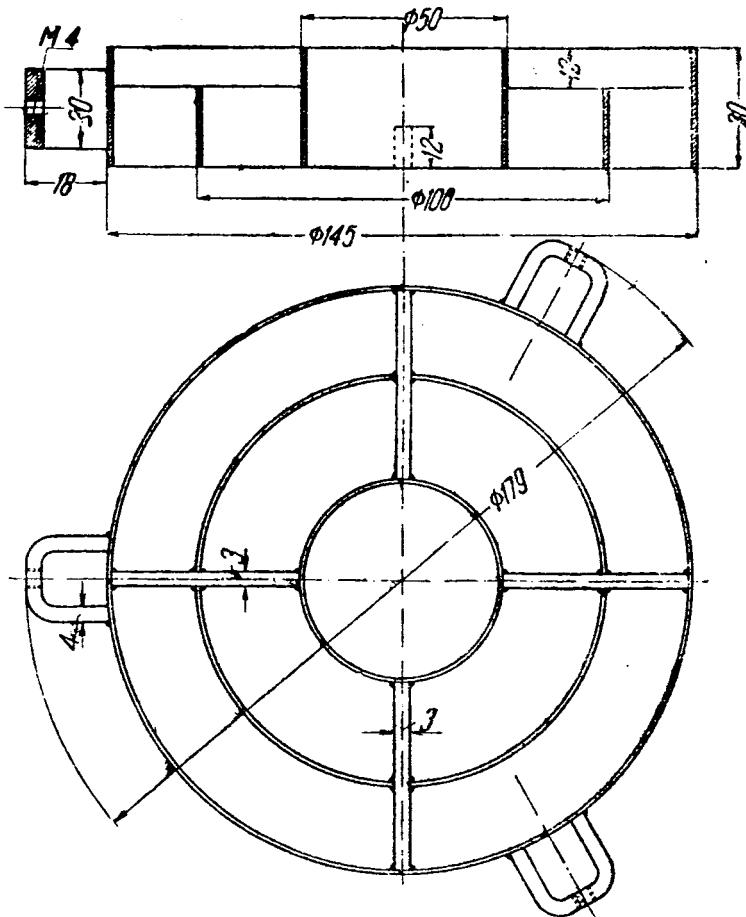


Рис. 5. Сетка, управляемая № 1

этому моменту применимы законы триодной лампы. Так, например, если измерять при различных напряжениях анода потенциал сетки, при котором загорается дуга, то получается кривая, характерная для триода (рис. 4).

Величину $D = \frac{\Delta U_c}{\Delta U_g}$ можно назвать проницаемостью сетки, и тогда зажигание анода произойдет при напряжении на сетке, равном

$$U_c = D U_a \sin \omega t + k,$$

где k есть постоянная величина для данной сетки, выраженная в вольтах, определяющаяся отрезком оси ординат, отсекаемым продолжением прямолинейной части кривой $U_c = f(U_a)$.

В опытах, описанных ниже, были испробованы три сетки: сетка № 1 (рис. 5), сетка № 2 (рис. 6) и сетка № 3 (рис. 7), имеющие различные проницаемости, что видно и непосредственно из конструкции сеток.

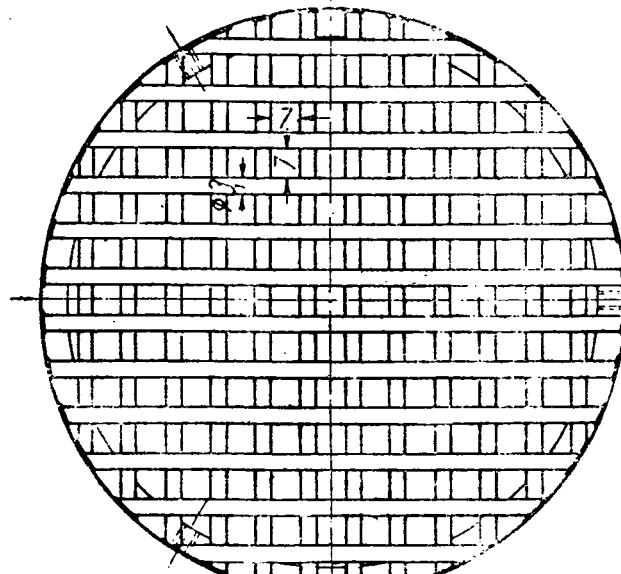
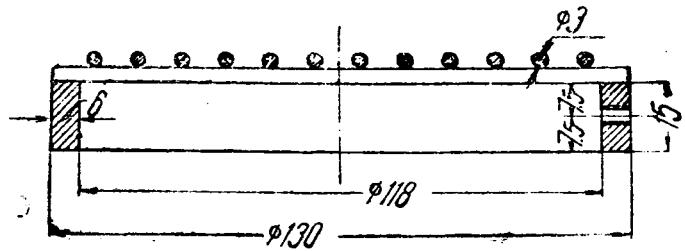


Рис. 6. Сетка, управляемая № 2

Первоначально источником э. д. с. для питания сеток применялся мотор-генератор. Осциллограммы тока и напряжения сеток при значениях U_c , близких к задерживающему, приведены на рис. 8, а, б и в. Броски отрицательного напряжения для сеток № 1 и 2

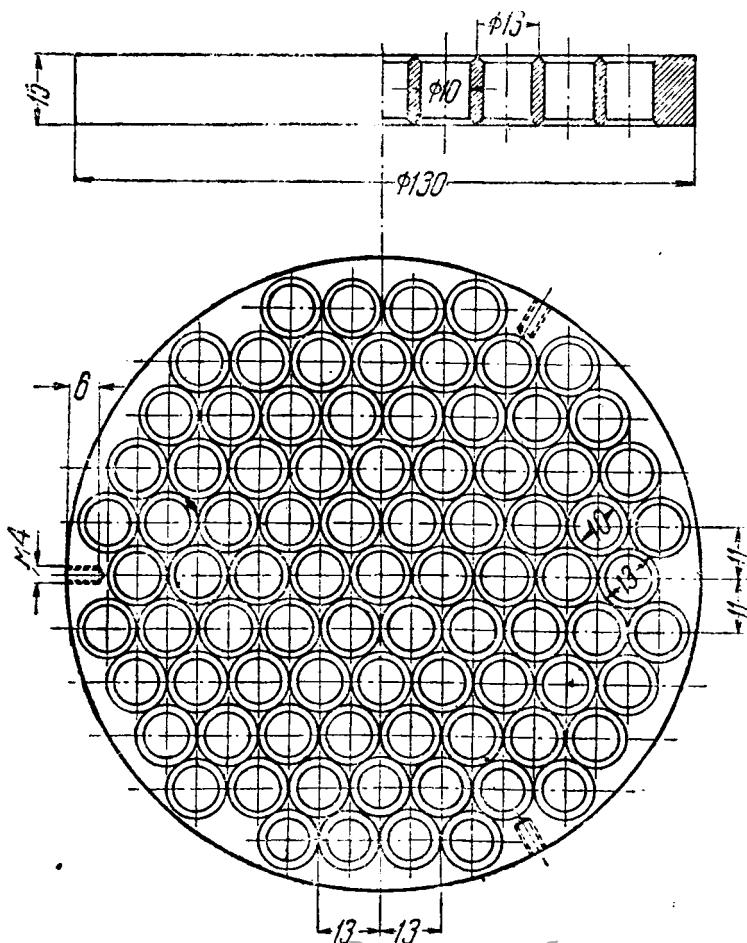


Рис. 7. Сетка, управляемая № 3

обусловлены экстротоком, который появляется в якоре мотор-генератора в момент прекращения тока анода. Для всех трех сеток период горения анода одинаково характерными являются положительный потенциал сетки и отрицательное значение сеточного тока, т. е. сеточный ток образуется из положительных ионов, идущих направлению катод-сетка.

Это явление, повидимому, обусловлено тем, что если потенциал сетки ниже потенциала дуги в том месте, где помещена сетка, под влиянием этой разности потенциалов положительные ионы будут в движение и, осаждаясь на сетке, заряжают ее до потенциала дуги. Если же сетка положительнее окружающего пространства то на сетку уже осадут не положительные ионы, а электроны, и этому сеточный ток перенесет знак на положительный (табл. 1).

Таким образом при любом (положительном или отрицательном) потенциале сетки на нее в период горения анода идут или электроны или ионы, стремящиеся сообщить сетке потенциал дуги. При

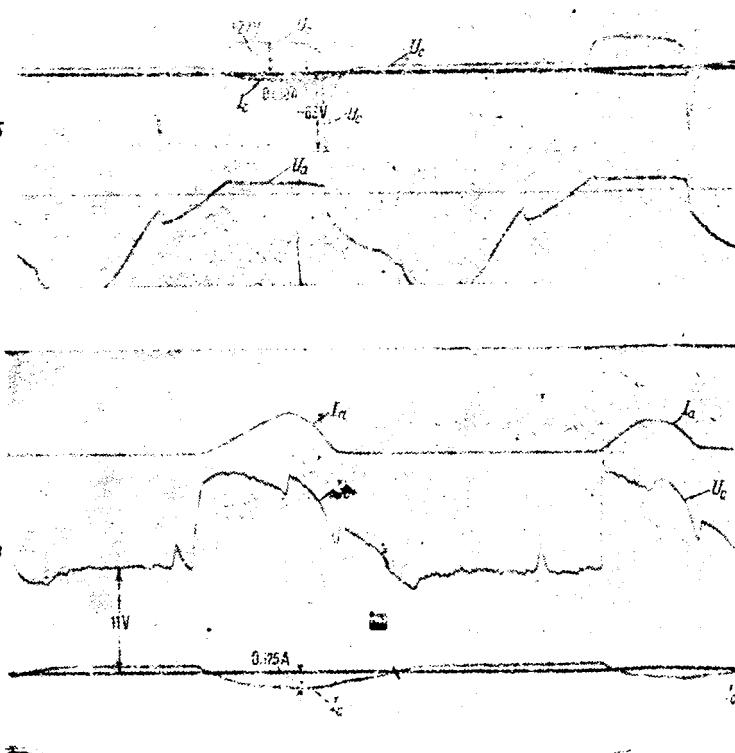
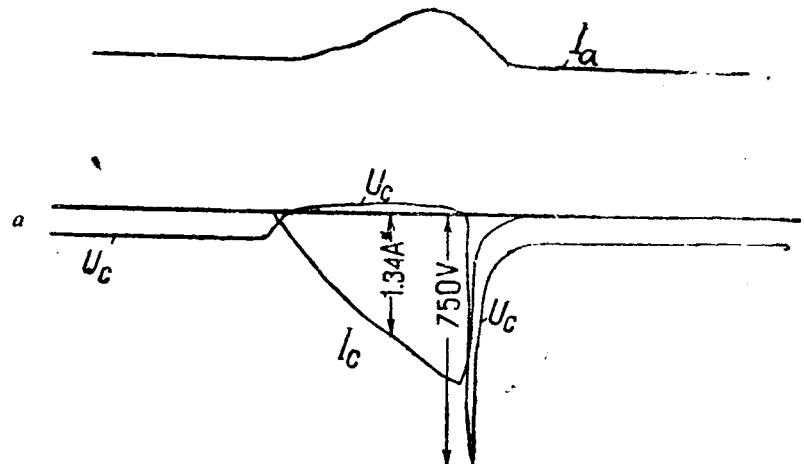


Рис. 8. Осциллограмма тока и напряжения сетки при значениях U_c , близких к задерживающему. Питание от мотор-генератора. а — сетка № 1; б — сетка № 2; в — сетка № 3

этом сеточный ток создает такое падение напряжения на сопротивление R_c , что сетка в обоих случаях принимает потенциал дуги. Однако если сделать сеточный ток очень большим (порядка 15 А), то в силу малой подвижности положительных ионов можно получить и в период горения отрицательный потенциал на сетке (рис. 2 б), окруженней лишь облаком положительных ионов.

Указанные выше перенапряжения на сетке заставили нас отказаться от питания сеток мотор-генератором и применять аккумуляторы в качестве источника постоянной э. д. с.

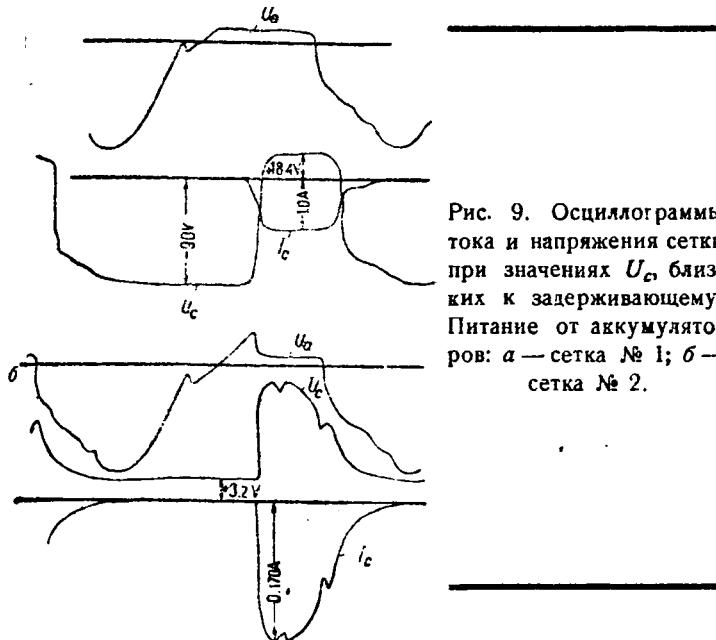


Рис. 9. Осциллографмы тока и напряжения сетки при значениях U_c , близких к задерживающему. Питание от аккумуляторов: а — сетка № 1; б — сетка № 2.

На рис. 9а и 9б приведены осциллографмы тока и напряжения сетки, близкого к задерживающему, при питании сетки от аккумуляторной батареи.

В этом случае для тех же сеток № 1 и 2 никаких перенапряжений не обнаружено. Необходимо подчеркнуть, что во всех схемах использования сеток следует применять источник э. д. с. с возможностью меньшей реактивностью, ибо возникающие перенапряжения на сетке легко могут повлечь за собой обратное зажигание выпрямителя или повреждение схемы сетки.

Обращаясь к работе сетки в ртутном выпрямителе, необходимо прежде всего отметить, что наиболее интересной характеристикой работы сетки является величина задерживающего потенциала, на которую влияет целый ряд причин; укажем те из них, которые нами были исследованы.

Схема опыта по определению зависимости задерживающего потенциала сетки от эффективного значения анодного напряжения изображена на рис. 10. Аноды 1, 3 и 5 выпрямителя присоединялись к силовому трансформатору $Tp\ 1$ с фазным напряжением 100 V. На анод 6, снабженный исследуемой сеткой, подводилось напряжение от трансформатора $Tp\ 2$ через ограничительное сопротивление R_a , которое выбиралось такой величины, чтобы ток в аноде 6 не превосходил 60 mA. Среднее значение тока каждого из анодов 1, 3 и 5 равнялось 255 A, что соответствует амплитуде 765 A.

Опыт производился следующим образом: при помощи потенциометра R_1 на исследуемый анод подавалось напряжение желаемой величины, которое определялось по прибору V_a и коэффициенту трансформации. После этого на сетку задавалось отрицательное напряжение, заведомо большее задерживающего потенциала. Постепенным уменьшением величины U_c посредством коммутатора K можно было подойти к зажиганию анода, что обнаруживалось посредством прибора mA , при этом отмечалось показание прибора V_c .

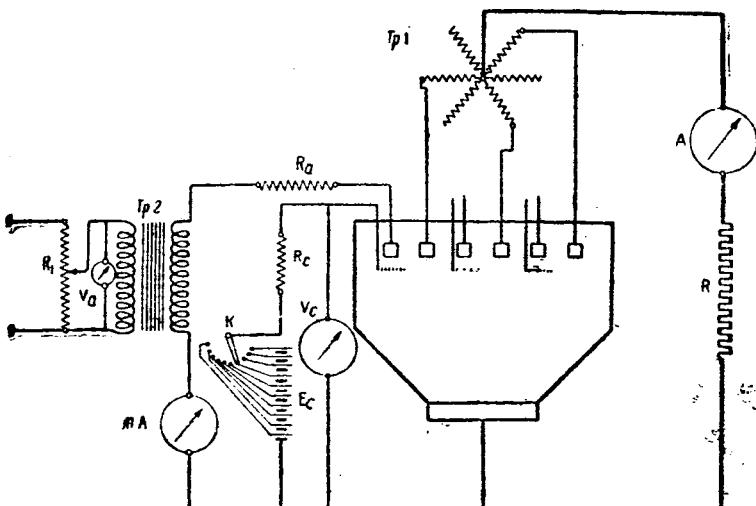


Рис. 10. Схема исследования зависимости задерживающего потенциала сетки от напряжения анода

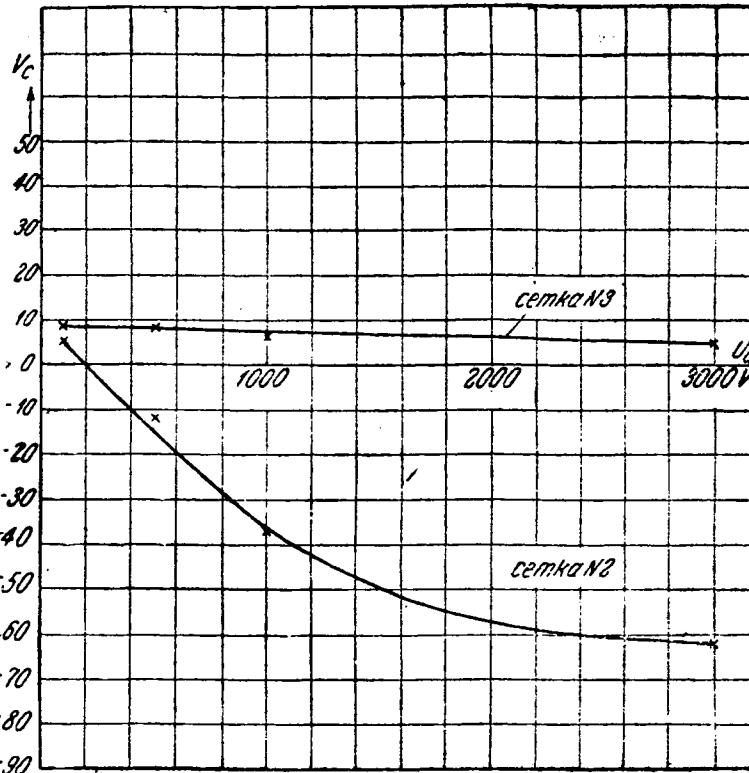


Рис. 11. Зависимость задерживающего потенциала сетки от напряжения анода

Полученные кривые для сеток № 2 и 3 приведены на рис. 11. Для сетки № 1 опыт не удавался, так как в пределах применяемых сеточных напряжений сетка не задерживала дугу. Далее была исследована зависимость задерживающего потенциала сетки от величины анодного тока при двух различных напряжениях на аноде. Кривые рис. 12а сняты при напряжении на аноде 100 V по схеме рис. 3.

Кривые рис. 12б сняты при напряжении на аноде 1000 V по схеме рис. 10; ток I_a в данном случае есть среднее значение за период тока одного из анодов 1, 3 или 5.

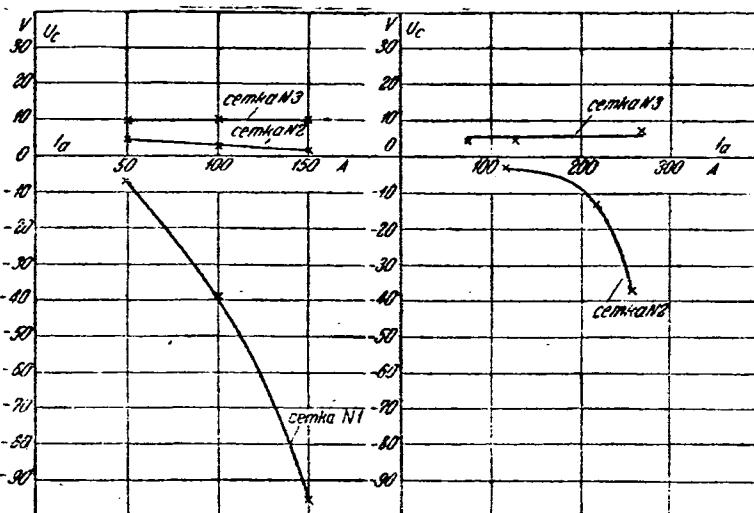


Рис. 12а. Зависимость задерживающего потенциала сетки от величины анодного тока при напряжении на аноде 100 V

Рис. 12б. Зависимость задерживающего потенциала сетки от величины анодного тока при напряжении 1000 V

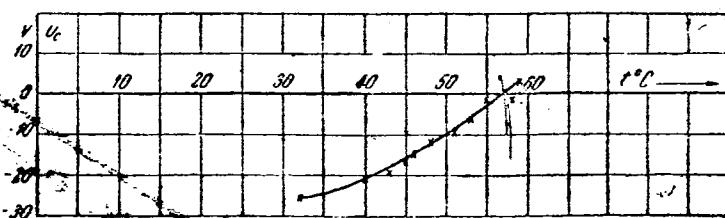


Рис. 13. Зависимость задерживающего потенциала сетки № 2 от температуры корпуса выпрямителя

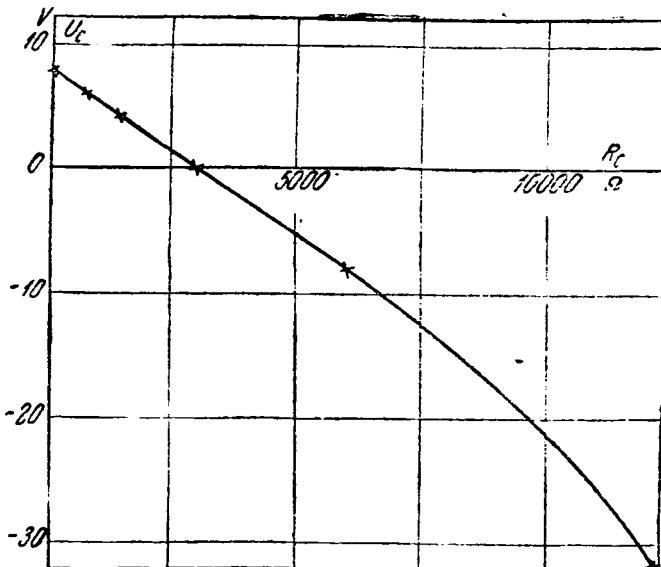


Рис. 14. Зависимость задерживающего потенциала сетки № 3 от сопротивления в цепи сетки

Из рис. 11 и 12 видно, что величина задерживающего потенциала сетки № 3 почти совсем не меняется с изменением анодного напряжения и анодного тока.

Это позволяет предполагать, что сетка № 3 пригодна и для высоких анодных напряжений и что описанные ниже опыты по регулированию напряжения и гашению коротких замыканий имеют то же значение, что и опыты при анодном и напряжении в несколько тысяч вольт.

Характер полученной зависимости объясняется тем, что чем больше ток и, следовательно, чем больше ионизация, тем больший по величине отрицательный потенциал на сетке требуется для того, чтобы задержать дугу. На рис. 13 приведена зависимость задерживающего потенциала сетки № 2 от температуры стенок выпрямителя. Уменьшение отрицательного задерживающего потенциала сетки при повышении температуры стенок выпрямителя можно объяснить затрудненным проникновением электронов к аноду при повышенной упругости ртутных паров. Из рис. 13 видно, что температура стенок выпрямителя, т. е. упругость ртутных паров, в очень сильной степени влияет на величину U_c , поэтому выпрямитель, снабженный сетками, необходимо держать при одной и той же температуре для надежности работы сеток или же иметь такое оборудование, которое дает возможность располагать достаточно большим сеточным напряжением. Наконец, на рис. 14 приведена еще одна исследованная зависимость. Кривая рис. 14 дает изменение задерживающего потенциала от сопротивления, включенного в цепь сетки. Кривая снята для сетки № 3 при 100 V на аноде.

В нашей практике был выпрямитель, все аноды которого были снабжены сетками № 3. Сетки питались от трансформатора, и со-

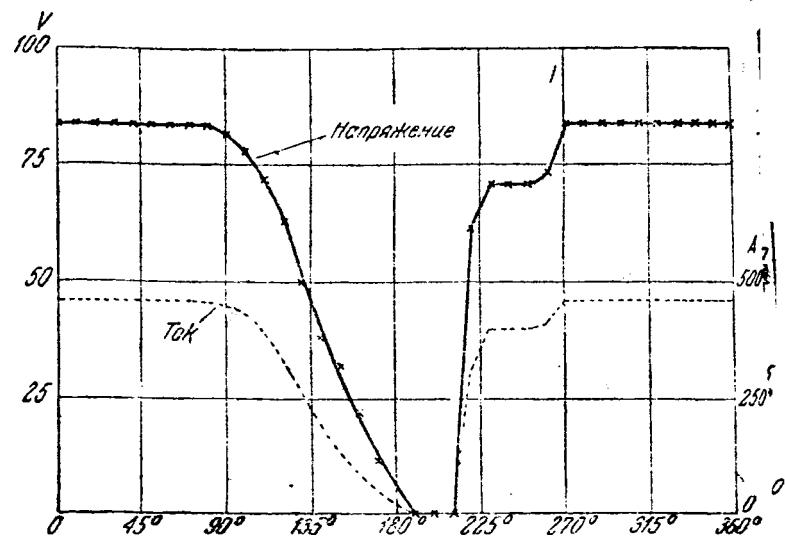
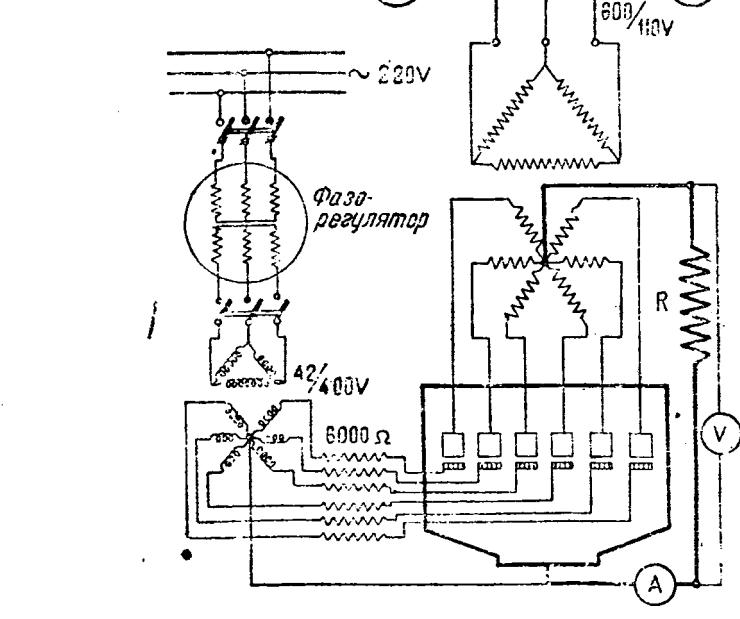
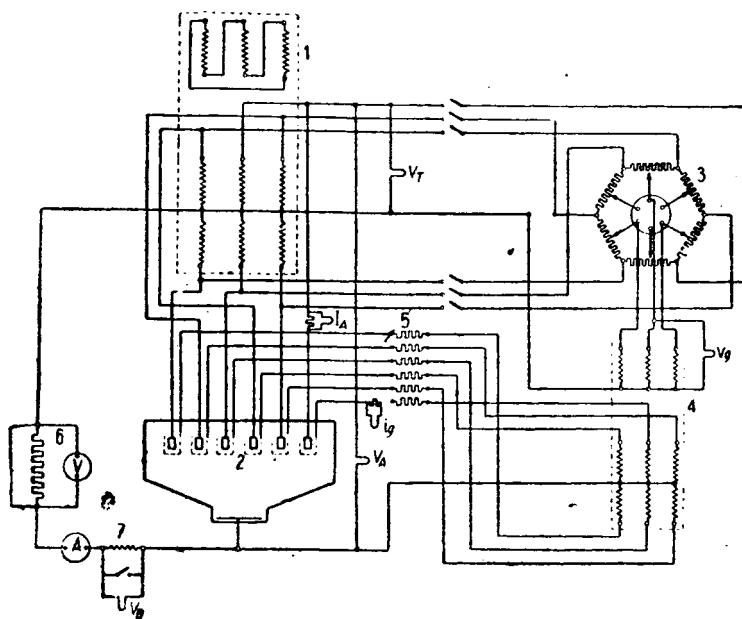


Рис. 16. Зависимость выпрямленного напряжения и тока от угла сдвига между напряжением сетки и анода при регулировании напряжения по схеме рис. 15

противление в каждой сетке было $R_c = 6000 \Omega$. Оказалось, что зажечь такой выпрямитель, особенно при неотренированных щеках анодах, представляло большую трудность; так, например, для зажигания нужно было повышать напряжение трансформатора сеток до 600 V, при этом часто наблюдались перенапряжения на главном трансформаторе, питающем выпрямитель, что, повидимому, обусловлено неустановившимся режимом работы выпрямителя и происходящим отсюда внезапным обрывом дуги. Кривая рис. 14 показала, что зажечь такой выпрямитель можно посредством источника э.д.с. в 25–30 V с малым сопротивлением (аккумуляторная батарея); при этом сопротивление R_c постепенно уменьшается до зажигания выпрямителя. Этот метод впоследствии вошел в нашу практику.

Прозведенные исследования показали, что: 1) наиболее постоянной работой обладает сетка № 3; 2) источник э.д.с. в цепи сетки должен быть мощным и обладать возможно меньшей реактивностью;



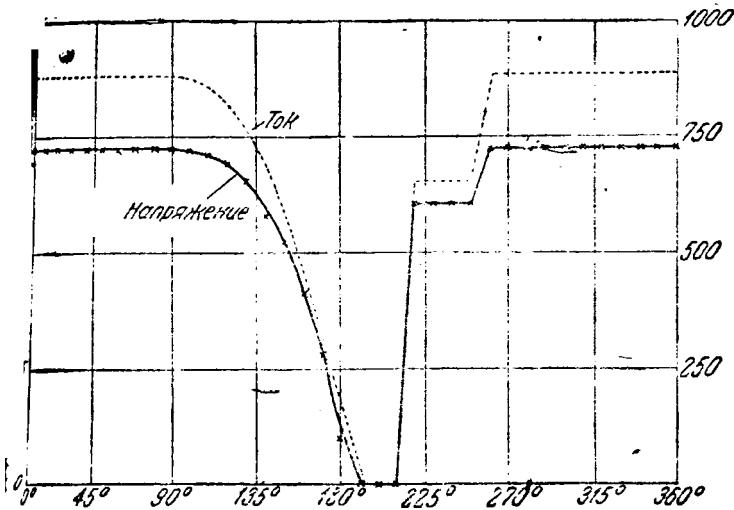


Рис. 18. Зависимость выпрямленного напряжения и тока от угла сдвига между напряжением сетки и анода при регулировании напряжения по схеме рис. 17

3) температура корпуса выпрямителя должна быть по возможности постоянной.

Сетка № 3, давшая наиболее благоприятный результат, была использована в описанных ниже опытах по регулированию напряжения выпрямителя и гашению дуги при коротком замыкании на стороне выпрямленного тока.

§ 2. Опыты по регулированию напряжения ртутного выпрямителя при помощи управляемых сеток

В конце 1932 г. на заводе «Электросила» впервые в СССР были произведены опыты по регулированию напряжения мощного металлического ртутного выпрямителя при помощи управляемых сеток. Были испробованы две схемы регулирования напряжения, сняты кривые регулирования, определено изменение сопротивления и сняты осцилограммы токов и напряжений в различные моменты регулирования. Опыты подтвердили теоретические расчеты и показали полную пригодность схемы регулирования, предложенной инж. В. К. Крапивиным. Опыты велись на модернизированном выпрямителе типа РВ-10 на 1000 А выпрямленного тока, снабженном управляемыми сетками № 1 и 3 (рис. 5 и 7).

Схемы регулирования напряжения

К моменту начала опытов по регулированию напряжения ртутного выпрямителя посредством управляемых сеток было известно три основных метода, различающихся формой напряжения, подаваемого на сетки.

1. Регулирование напряжения путем подачи на все сетки одного и того же постоянного напряжения (обычно отрицательного по отношению к катоду). В этом случае величина выпрямленного напряжения зависит от величины напряжения, подаваемого на сетки.

2. Регулирование напряжения путем подачи на сетки переменного напряжения синусоидального или несинусоидального той же частоты, что и напряжение питающего трансформатора, причем напряжения отдельных сеток сдвинуты между собой на те же углы, что и напряжения соответствующих анодов. В этом случае величи-

на выпрямленного напряжения зависит от угла относительного сдвига между напряжением сетки и напряжением анода.

3. Одновременное применение первого и второго методов 1).

Наиболее совершенным и вместе с тем сравнительно простым является второй метод. Поэтому было решено начать опыты по второму методу.

В литературе были описаны две основных разновидности этого метода:

а) переменное напряжение подавалось на сетки от сети, питавшей выпрямитель, через индукционный фазорегулятор и специальные трансформаторы;

б) переменное напряжение, подаваемое на сетки, получалось путем синхронной коммутации постоянного напряжения.

Инж. Крапивиным был предложен новый метод регулирования напряжения посредством реостатного фазорегулятора, схема которого представлена на рис. 15.

Сообразуясь с имеющимся оборудованием и с возможностью быстрого изготовления недостающего оборудования, было решено произвести опыты регулирования напряжения сперва с реостатным фазорегулятором, а потом с индукционным.

Регулирование выпрямленного напряжения посредством реостатного фазорегулятора

Опыты велись по схеме, изображенной на рис. 15. Указанный в схеме реостатный фазорегулятор был изготовлен из реостановой проволоки диаметром 0,7 мм с сопротивлением каждой его фазы около 30Ω . Сеточные сопротивления по 6000Ω каждое изготовлены из константановой проволоки диаметром 0,1 мм. Напряжение, подаваемое на сетки, было 200 V. Сетки были типа № 1 (рис. 5). Силовой трансформатор, питавший выпрямитель, был мощностью 200 kVA, напряжение короткого замыкания $e_k = 13\%$, схема соединений — треугольник-шестифазная звезда, первичное напряжение — 500 V, вторичное фазное — 100 V. Трансформатор был присоединен к заводской сети. Нагрузкой служил реостат из проволочных спиралей, охлаждаемых водой.

На рис. 16 приведена зависимость выпрямленного напряжения от угла сдвига между напряжением сетки и анода. Угол сдвига определялся по положению ползунков реостатного фазорегулятора.

Регулирование выпрямленного напряжения посредством индукционного фазорегулятора

Схема включения изображена на рис. 17. В качестве индукционного фазорегулятора был использован заторможенный трехфазный асинхронный мотор. На сетки подавалось напряжение 400 V. В остальном условия опыта были такие же, как в случае реостатного фазорегулятора.

На рис. 18 приведена полученная кривая регулирования напряжения. Из сопоставления рис. 16 и 18 видно, что оба исследованных метода равнозначны.

Исследование посредством осциллографа

Был снят ряд осциллограмм при регулировании напряжения реостатным фазорегулятором по схеме, изображенной на рис. 15. Эти осциллограммы показали, что вторичное напряжение силового трансформатора при более или менее значительной нагрузке сильно искажено, и при питании фазорегулятора от вторичной обмотки силового трансформатора напряжение, подаваемое на сетки, тоже сильно искажено. Искажения происходят вследствие большой реактивности (13%) силового трансформатора.

Чтобы устранить искажения напряжения, подаваемого на сетки, схема включений, изображенная на рис. 15, была изменена таким

¹ Все эти три метода подробно разобраны в статье H. Klemm regt und E. Zübske, A. f. F., 1932, B. XXVI, N. 2 S. 67—74.

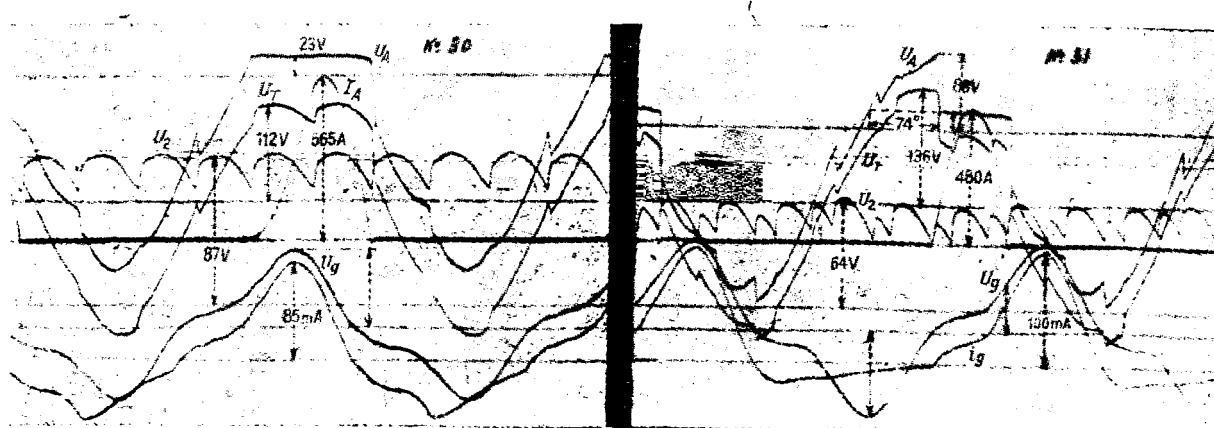


Рис. 19. Осциллограмма при 100% напряжения

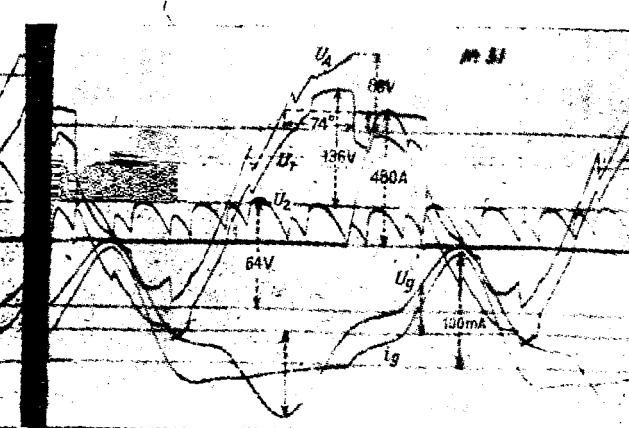


Рис. 20. Осциллограмма при 70% напряжения

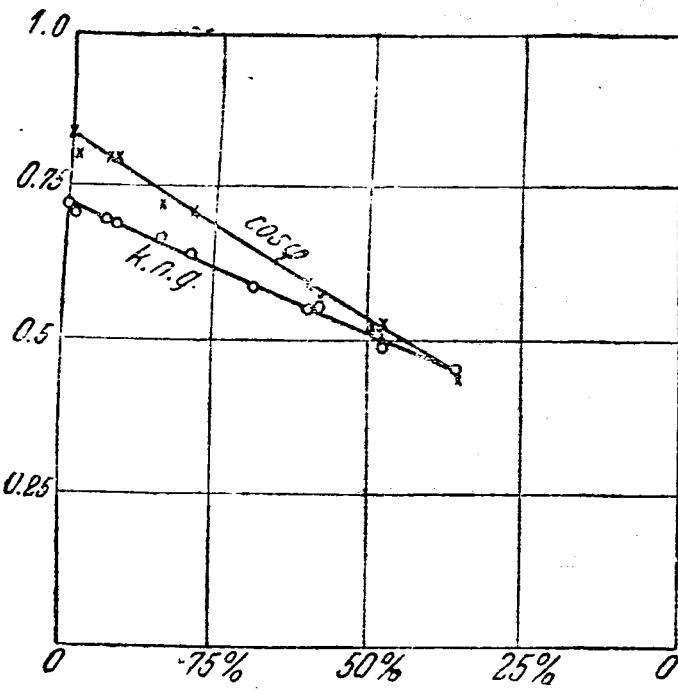


Рис. 21. cos φ и к. п. д. при регулировании

образом, что напряжение на фазорегулятор подавалось не от анодов выпрямителя, а от сети 220 В через специальный трансформатор, преобразовавший трехфазный ток в шестифазный. На рис. 19 и 20 изображены две осциллограммы, снятые по этой измененной схеме.

Осциллограмма № 30, изображенная на рис. 19, снята при максимальном выпрямленном напряжении, т. е. при таком сдвиге сеточного напряжения по отношению к анодному, при котором не происходило задержки зажигания анода. Среднее выпрямленное напряжение при этом было 85 В, средний выпрямленный ток — 570 А.

Осциллограмма № 31, изображенная на рис. 20, снята при задержке зажигания анода на 74° . Измеренное среднее выпрямленное напряжение было 60 В, средний ток — 395 А.

Следует отметить, что на этих осциллограммах U_g — это первичное напряжение сеточного трансформатора, как это ясно из схемы включения, изображенной на рис. 15. Во время снятия этих осциллограмм выпрямитель имел железные аноды и сетки типа № 3.

Интересно отметить, что отрицательный ток сетки (так положительных ионов), как это показывают приведенные осциллограммы, спадает медленно, т. е. дейонизация в районе анода при большом токе происходит в промежутке времени порядка 0,01 сек. Для увеличения скорости дейонизации следует подводить к сетке большую мощность.

Ряд других осциллограмм, приводить которые за недостатком места не будем, показал, что с увеличением регулирования увеличивается пульсация выпрямленного напряжения, как это и должно быть согласно теории выпрямителя с управляемыми сетками.

Коэффициент полезного действия и $\cos \varphi$ ртутного выпрямителя с управляемыми сетками

Коэффициент полезного действия и $\cos \varphi$ ртутного выпрямителя при регулировании выпрямленного напряжения управляемыми сетками были определены по схеме, изображенной на рис. 17.

За исключением нагрузочного реостата все элементы схемы были те же, что и при снятии кривых регулирования напряжения. Вместо проволочного реостата для нагрузки служил водяной реостат. На сетки подавалось напряжение 400 В.

Результаты опытов приведены в виде кривых на рис. 21. Так как опыты велись при низком выпрямленном напряжении (меньше 100 В), то потеря мощности в дуге сильно сказывалась на к. п. д. и $\cos \varphi$. Тем не менее общий характер кривых правильный.

Описанные опыты по регулированию напряжения выпрямителя носят лабораторный характер и подлежат проверке в эксплуатации: тем не менее они позволяют сделать заключение о полной технической возможности регулирования выпрямленного напряжения

ртутного выпрямителя при помощи управляемых сеток по исследованным методам.

Следует отметить, что иногда во время опытов, особенно, когда температура корпуса выпрямителя была ниже 25° С, в цепи выпрямителя появлялись значительные перенапряжения.

Гашение короткого замыкания на стороне выпрямленного тока

В заключение приводим описание опыта по гашению короткого замыкания. Схема опыта приведена на рис. 22.

Фазное напряжение трансформатора равнялось 100 В.

Порядок опыта был следующий: посредством реостата R_1 выпрямителю давалась небольшая нагрузка около 200 А. Затем при помощи быстродействующего выключателя P_1 сопротивление R_1 шунтирувалось очень малым сопротивлением R_2 , ограничивающим ток короткого замыкания, вследствие чего выпрямленный ток увеличивался с 200 до 2 500 А (250% нагрузки). Одновременно с тем как контакт a включал сопротивление R_2 , контакт b замыкал цепь катушки реле P_2 , которое имело выдержку 0,1 сек. В течение 0,1 сек. через

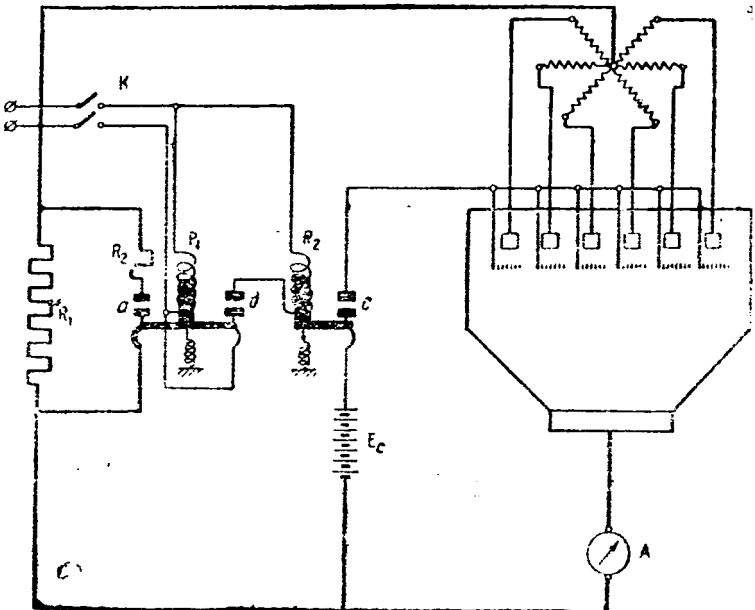


Рис. 22. Схема гашения короткого замыкания

выпрямитель протекал ток в 2 500 А, после чего работало реле P_2 и посредством контакта c на сетки подавалось от аккумуляторной батареи — 16 в по отношению к катоду. При этом дуга гасла, а автоматический масляный выключатель не выключался.

Резюме

Описанные выше опыты, произведенные на заводе «Электросила» в 1932 г., позволяют сделать следующие выводы:

1. Регулирование напряжения и гашение коротких замыканий мощного ртутного выпрямителя при помощи управляемых сеток технически возможны.

2. Управляемые сетки должны быть густыми, как например, изображенная на рис. 7 сетка № 3.

3. Источник э. д. с. в цепи сетки, особенно в случае гашения коротких замыканий, должен быть мощным и обладать возможно меньшей самоиндукцией.

4. Температура корпуса выпрямителя должна быть не ниже 25° С и по возможности постоянной.

5. Изоляцию питающей схемы выпрямителя и схемы сеток следует рассчитывать на повышенное напряжение вследствие возможных перенапряжений.

6. При регулировании напряжения посредством управляемых сеток $\cos \varphi$ при уменьшении напряжения уменьшается пропорционально напряжению, к. п. д. тоже уменьшается, а пульсация напряжения увеличивается.

В заключение авторы выражают благодарность В. К. Крапивину за ряд ценных указаний при постановке опытов.

О снятии импульсных характеристик без катодного осциллографа

Инж. В. А. Карасев

Москва, ВЭИ

Вопросы „координации изоляции“ линии и аппаратов занимают немалое место в высоковольтной технике.

Как известно, основным вопросом координации изоляции является выяснение того, какой из двух (или нескольких) параллельно включенных изоляционных промежутков (в общем смысле этого слова) при падении волны откроет путь искре и тем самым предохранит остальные от разряда. Пропустит искру тот, „запаздывание“ которого наименьшее. Таким образом каждый изоляционный промежуток можно характеризовать его временем запаздывания при определенных условиях.

Заметим, что часто ведут счет запаздывания от начала фронта. Но этим ставят его величину в сильную зависимость от длины фронта. Правильней считать его от момента достижения импульсом „разрядного напряжения при постоянном токе“ (от „точки ионизации“), поскольку область более низких напряжений мы можем считать как не активную.

Величина запаздывания меняется с амплитудой падающей волны. Эту величину принято выражать в функции от фактической амплитуды напряжения на объекте при разряде. Это целесообразно с той стороны, что процессы в изоляционном промежутке находятся в ближайшей функциональной зависимости именно от изменения во времени напряжения, приложенного непосредственно к промежутку. „Фактическая амплитуда“ при „срезах“ волны на фронте менее амплитуды волны.

Кривые, дающие „фактическую амплитуду E_{act} “ в функции „запаздывания τ “, часто называют „импульсными характеристиками“ (примерный вид подобных кривых представлен на рис. 1). Иногда по оси ординат откладывают не E_{act} , а коэффициент импульса $\frac{E_{act}}{E_0}$, где E_0 — „разрядное напряжение при постоянном токе“.

Имея импульсные характеристики двух объектов, поставленных параллельно, можем определить, который из них перекроется (или пробьется) при падении данной волны. Если кривые не пересекаются, то всегда перекроется тот, кривая которого расположена ближе к началу координат. Если кривые пересекаются, то при напряжениях E_{act} , высших, чем ордината точки пересечения, будет перекрываться лишь один из объектов, при низших — лишь другой. Точка пересечения будет соответствовать „порогу одновременности перекрытия“. Если импульсные характеристики сняты правильно, то в этой точке будем иметь по 50% перекрытий каждого из объектов.

Описанный метод можно характеризовать так: мы анализируем явление, возникающее при воздействии импульсов на параллельные промежутки, разлагая его на независимые друг от друга элементы (характеристики каждого промежутка). Затем производим синтез этих элементов в произвольных комбинациях. При этом, вообще говоря, изящном, но все же кружном образе действий мы заменяем простой опыт непосредственного параллельного включения более сложными измерениями очень коротких промежутков времени запаздывания (микросекунды и доли микросекунды).

Измерения запаздывания производятся с помощью катодного осциллографа. Катодный осциллограф — сложный и требующий умелого ухода прибор, которым располагают лишь крупные лаборатории. Работа

с ним требует специального квалифицированного персонала, требует также определенного качества и отбора ряда эксплуатационных материалов (замазки, влагопоглотители, фотоматериалы и др.). Самый прибор состоит из двух частей: вакуумной камеры с насосами и прочими принадлежностями техники высокого вакуума и аппаратуры, составляющей внешнюю схему включения (система синхронизации, временный контур, градуировочный генератор колебаний, делители напряжения и др.). „Схема включения“ должна быть приспособлена к данным объектам и к данным условиям испытания и часто оказывается весьма сложной.

При непринятии должных мер и неудовлетворительной схеме включения измерения с помощью осциллографа могут сопровождаться недопустимыми ошибками. Первое время после внедрения прибора не уделялось достаточного внимания этой стороне, что приводило к большему разнобоя в измерениях. И по настоящий день нет еще общепринятой в своих деталях методики измерений, и правильная методика обычно вырабатывается ценой длительной скрупулезной работы отдельных лабораторий для собственного использования.

Можно назвать следующие источники ошибок при измерении малых отрезков времени с помощью катодного осциллографа.

1. Изменение постоянной луча („вольто-миллиметров“ отклонения) в зависимости от изменения вакуума и напряжения на катоде. Между моментом снятия явления и снятия градуировочной кривой протекает некоторый промежуток времени, в течение которого и вакуум и напряжение могут изменяться.

2. Искажение снимаемой кривой напряжения в потенциометре и подводке. Нередко при крупных объектах подводка достигает десятков метров. Собственные колебания в схеме, скругление крутых изменений напряжения могут внести искажения, не только в направлении оси напряжения, но и оси времени.

3. Несовпадение „точек стояния“ луча¹) при снятии явления и при снятии градуировки. „Точки стояния“

1) То есть положений луча до и после разряда (или заряда) временной емкости.

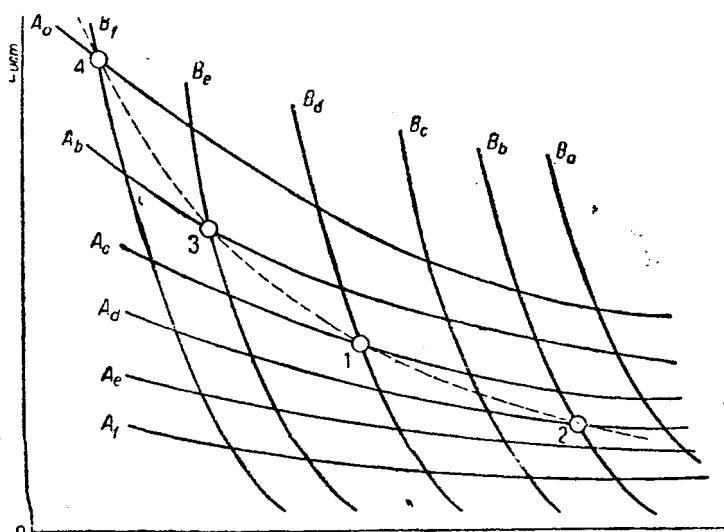


Рис. 1

при съемке часто выводятся за снимок во избежание вуалирования, и ошибка может остаться незамеченной.

4. Собственные колебания в контуре времени. Внешние электромагнитные влияния на контур времени. Эти возмущения при записи явления и при записи градуировки могут не иметь повторяемости.

5. При работе без градуировочной кривой или в случае если последняя не вышла на снимке,— ошибки от изменяемости констант цепи времени или от неточного их знания.

6. При срезе на фронте не только время, но также и E_{act} может быть определено точно лишь из осциллограммы. При крутых фронтах и больших превышениях амплитуды волны над „минимальным перекрывающим напряжением“ такое определение является нелегким. Часто взброс на осциллограмме получается размытым, и измерение его высоты сопряжено с ошибкой. Кроме того, приходится вводить передаточное число потенциометра. При быстрых изменениях напряжения возможно непостоянство этого числа²⁾.

Сюда нужно добавить серию возможных ошибок от незамеченных дефектов в сложной схеме, от изменения питающих различные части схемы напряжений и т. д. Подкомиссия „перенапряжений в изоляции“ АИЕЕ рекомендует указывать возможную ошибку при импульсных измерениях и выражает надежду, что с принятием „всех мер аккуратности“ эта ошибка не превысит... 20%³⁾.

Для устранения возможности ошибок требуется наличие тщательно продуманной и изученной схемы, солидной экранировки, необходим ряд контрольных опытов. Положение „точек стояния“ должно иметь строгую повторяемость. Не всякий катодный осциллограф из имеющихся в эксплоатации отвечает всем предъявляемым требованиям (постоянство константы луча, отсутствие пропусков записи „градуировки“ и т. д.). Катодный осциллограф в случае нового объекта и новых условий испытания не всегда является прибором, немедленно готовым к действию⁴⁾.

Разумеется, с принятием всех должных мер точные определения и запаздывания и коэффициента импульса с помощью катодного осциллографа всегда возможны. Больше того, при больших запаздываниях последний даст точность выше требуемой. При удовлетворительно работающем приборе получается очень большая скорость записи и тонкий след на экране. С другой стороны, достаточно, например, вспомнить, что фарфоровая изоляция дает значительный разброс при импульсных измерениях, что имеется влияние запыления, всевозможных вариаций форм реальных волн и т. д.

Можно резюмировать так. При недостаточно тщательной работе катодный осциллограф дает неопределенную ошибку. При исключении искажающих влияний и при четкой записи для области низких коэффициентов импульса он дает даже избыточную точность. Он мало приспособлен для испытаний, в той или иной степени массово-доступных по своему характеру и нуждающихся в нормировании.

Является мысль, нельзя ли получить ответ на основной вопрос координации изоляции, не прибегая к „осциллографометрии“ в отношении каждого объекта,

2) Например, встречаем в литературе: „...Мы калибуем осциллограф независимо и, кроме того, непосредственно измеряем напряжение шаровым разрядником. Результаты часто не сходятся“. (Fielder and Mc Auley „Tr. AIEE“, 1930, Oct., стр. 1502).

3) В измерениях напряжения и запаздывания при коротких волнах (см. Montsinger and Daup „Tr. AIEE“ 1932, Dec., стр. 928).

4) О предосторожностях, необходимых при снятии импульсных характеристик, см. также Стекольников и Каравеев, К вопросу выбора стандартных волн для импульсных испытаний „Электричество“ № 15, 1933.

но все же получая для него те независимые параметры, которые позволяют предсказать его поведение в всевозможных комбинациях с другими объектами. Другими словами, можно ли получить импульсную характеристику без катодного осциллографа?⁵⁾.

Автор предлагает метод, дающий такую возможность. Этот метод излагается ниже.

Вопросы координации изоляции, тесно связанные с вопросами импульсной крепости аппаратов, по своей сущности могут быть разрешены до конца только нормативным путем. Поэтому упрощение методов измерения является актуальной задачей. С другой стороны, такие вопросы в особенной степени требуют коллективной работы, и мы считаем целесообразным привести сущность метода еще в процессе его детализации.

Предположим, что дана некоторая стандартная волна. Амплитуда волны может изменяться, но длины фронта и хвоста приблизительно сохраняются.

Далее, даны разрядные промежутки A и B , подобранные так, что импульсные характеристики одного много круче, чем другого. Для этого может быть использована разная степень неравномерности поля (например, иглы—шары), или разная среда (например, воздух и масло) и т. д. Разрядники A и B должны быть приняты как стандартные. Для этих стандартных промежутков с возможной точностью сняты осциллографом импульсные характеристики и притом для разных расстояний между электродами. Все импульсные характеристики нанесены в виде сетки, схематически изображенной на рис. 1.

Здесь кривая A_c —импульсная характеристика разрядника A при расстоянии между его электродами, равном b ; кривая B_d —разрядника B при расстоянии d между его электродами и т. д.

Для конкретности можно себе представить, что сетка предназначена для 110-kV аппаратуры и, следовательно, составлена для таких разрядников и пробивных расстояний, что захватывает область примерно от 800 до 1500 kV.

Ставим параллельно испытуемый разрядный промежуток X и стандартный A . Начинаем бросать нашу стандартную волну, сохраняя ее амплитуду все время равной величине E_1 . Меняем разрядное расстояние между электродами A . Пусть порог одновременности пробоя найден при расстоянии c . Это значит, что при данной волне и при расстоянии c между электродами A оба искровых промежутка (A и X) обладают одним и тем же запаздыванием τ при одном и том же E_{act} . Ни та ни другая величина неизвестна, но точка, определяемая ими, должна лежать на кривой A_c (рис. 1).

Теперь ставим параллельно X и B . Напряжение стандартной волны сохраняем равным той же величине E_1 ; волна остается совершенно такой же, как и в предыдущем опыте. Пусть порог одновременности пробоя найден при расстоянии d между электродами B . Следовательно, точка должна лежать на B_d .

Таким образом точка должна совпасть с пересечением A_c и B_d . Действительно, в первом опыте

$$(E_{act})_A = (E'_{act})_X; \tau_A = \tau_X.$$

Во втором опыте

$$(E_{act})_B = (E'_{act})_X; \tau_A = \tau'_X.$$

Но волна в обоих опытах совершенно одинакова. Запаздывание же и фактическая амплитуда среза

5) Peek, излагая результаты своих попыток установить упрощающие закономерности в явлении запаздывания, замечает, что следует учитывать нужды маленьких лабораторий, не имеющих катодного осциллографа (Tr. A. I. F. E., 1930, oct., vol. 49, стр. 1511). Это совершенно правильно, так как вопросы „конкретной координации“ могут встать перед такими лабораториями.

однозначно определяются при заданной кривой волны. Поэтому

$$(E_{ucm})_X = (E'_{ucm})_X; \quad \tau_X = \tau'_X.$$

Отсюда

$$(E_{ucm})_A = (E_{ucm})_B; \quad \tau_A = \tau_B,$$

а это возможно лишь для точки пересечения.

Обозначим точку пересечения кривых A_c и B_d цифрой 1. Это — одна из точек импульсной характеристики объекта X для данной стандартной волны.

Меняя напряжение волны и повторяя весь опыт. При новом напряжении E_2 волны для некоторых разрядных расстояний, скажем, для расстояния d электродов A и расстояния b электродов B , будет, аналогично прежнему, справедливо условие

$$(E_{ucm})'_A = (E_{ucm})'_B; \quad \tau'_A = \tau'_B.$$

Новые значения $(E_{ucm})'_A$ и τ'_A тем сильнее будут соответственно отличаться от прежних значений $(E_{ucm})_A$ и τ_A , чем более разница между E_1 и E_2 .

Таким образом мы получим другую точку 2 искомой характеристики, взяв ее на пересечении кривых A_d и B_b . Соответственно меняя напряжение волны, находим и всю импульсную характеристику 4-3-1-2 объекта X (рис. 1).

В частности, характеристика может совпасть с одной из кривых сетки — это в том случае, если для всех амплитуд падающей волны порог будет наблюдаться, при одинаковом разрядном расстоянии одного из стандартных разрядников. Если найденное разрядное расстояние попадает между ступенями, по которым построена сетка, точка найдется интерполяцией. Для получения каждой точки необходима лишь двухкратная операция присоединения стандартного разрядника, нескольких импульсных ударов с раздвижением электродов и отсчета. Напряжений E_1 , E_2 и т. д., вообще говоря, измерять не нужно.

Если один из разрядников (например, A) — измерительные шары, то в случае если срез происходит задом на хвосте, наш опыт будет протекать следующим образом: измеряем амплитуду волны E (т. е. находим порог одновременности пробоя измерительных шаров и зажигающих промежутков ударного контура), затем бросаем волну на параллельно включенные разрядник B и объект X . Положим, порог получился при расстоянии b разрядника B . Следовательно, точка, определяющая запаздывание, должна лежать на кривой B_b . Но при срезе на хвосте напряжение E_{ucm} равно амплитуде волны E . Следовательно, искомая точка лежит на пересечении кривой B и горизонтальной прямой, имеющей ординату E .

Если принять, что шары (разрядник A) имеют достаточно большой диаметр и не обладают запаздыванием даже в случае большего превышения амплитуды волны над номинальным разрядным напряжением шаров, то для срезов на фронте можно обойтись без второго эталонного разрядника (разрядника B). Для этого, однако, нужно было бы точно знать течение кривой фронта. Действительно, пусть при раздвижении шаров на пробивное напряжение E'' мы получили точку одновременности пробоя этих шаров и объекта X . Очевидно, что $E'' = E_{ucm}$. Следовательно, по кривой фронта определяется и запаздывание τ'' (рис. 2). Наоборот, если в этом опыте заменить объект X разрядником B , импульсная характеристика которого хорошо известна вплоть до области малых запаздываний, то можно по-

строить кривую фронта. Если полученная, таким образом, кривая фронта совпадает с той, которая соответствует взятой импульсной характеристике разрядника B , то найденное очертание фронта можно считать достоверным. Если имеем несколько импульсных характеристик разрядника B для разных фронтов, то можно достичь этой достоверности путем пробных построений. Мы вернемся ниже в более общей постановке к вопросу о проверке формы волны.

Основное в разработке метода — подбор стандартных электродов и тщательное, прецизионное снятие «сетки». Помимо всего прочего стандартные разрядни-

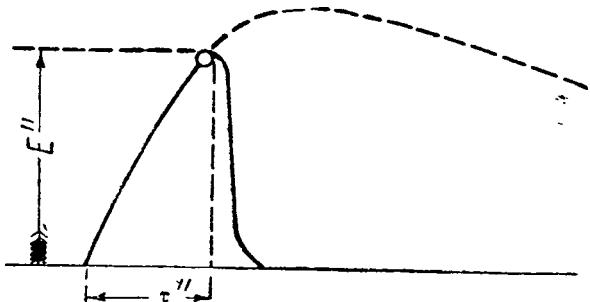


Рис. 2

ки должны быть легко выполнимыми. Можно использовать и один разрядник с регулируемой крутизной импульсной характеристики (например, типа промежутков, исследованных Austin), если при этом обеспечивается диапазон изменения крутизны, достаточный для наших целей⁶). Сомневаться в правильности даваемых методом результатов нет оснований, поскольку с точки зрения практической принцип параллельного включения является высшим критерием.

Были проверены пересекающиеся импульсные характеристики, снятые катодным осциллографом. Опыты показали, что если при съемке осциллографом не принять достаточных мер, то в эти характеристики может вкрадаться ошибка, и точка пересечения не будет соответствовать порогу одновременности перекрытия.

Само нахождение порога одновременности пробоя не представляет никаких затруднений. С изменением пробивного расстояния одного из параллельных промежутков находим такое положение, при котором из N разрядов $\frac{N}{2}$ перекрывает один, а $\frac{N}{2}$ — другой разрядник. Если имеются пропуски, когда ни один из разрядников не перекрывается, то в число N эти пропуски не включаются.

Если импульсные характеристики параллельных промежутков пересекаются под весьма малым углом, то

⁶) При исследовании жидкой и твердой изоляции можем встретиться с большими запаздываниями. Для получения больших запаздываний в стандартном воздушном промежутке (масляный в качестве стандартного неудобен по многим причинам) можно применить включение сопротивления (или индуктивности) последовательно с промежутком. При этом важно сохранение достаточной крутизны спадания импульсной характеристики стандартного промежутка также и в области больших запаздываний. В нашем устройстве ионизационный ток будет ограничиваться сопротивлением, что обуславливает большую величину запаздывания. С повышением же напряжения запаздывание будет достаточно быстро уменьшаться (сопротивление должно быть соизмеримым с сопротивлением прохождению ионизационного тока через междуэлектродное пространство). При данном сопротивлении, для данной формы напряжения, данного разрядного расстояния и для взятых электродов импульсная характеристика определяется однозначно. Разброс не должен быть большим, чем при тех же электродах без сопротивления.

Между ударным контуром и объектом обычно ставится демпфирующее сопротивление, и разряд в «промежутке с сопротивлением» достаточно сильно снижает напряжение на параллельно включенном испытуемом объекте. «Порог одновременности» выявится достаточно четко.

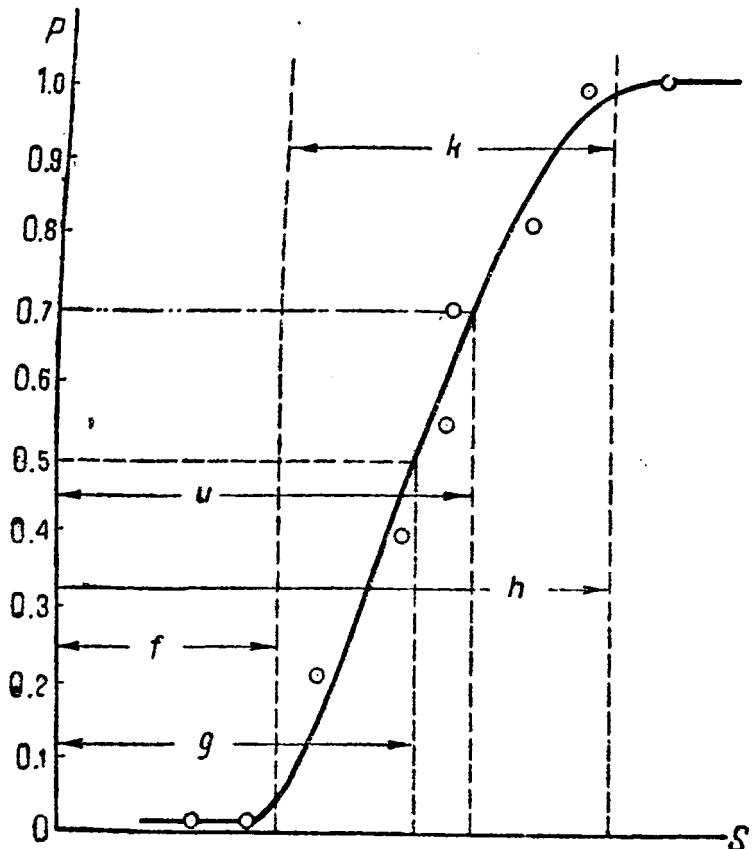


Рис. 3

может наблюдаться зона одновременного проскакивания двух искр. Порог здесь может быть определен как середина зоны (характеризуемая наибольшим числом одновременных проскакиваний из данного числа разрядов).

Метод может оказать большие услуги в отношении объектов, обладающих большим разбросом (например, масло при некоторых формах электродов).

Предположим, что в этом случае опыт производится „пачками“, скажем по 10 ударов на каждое взятое разрядное расстояние S_A стандартного промежутка A . В каждой пачке из N произошедших разрядов M дают разряд в объекте, параллельно приключенном к

разряднику A . Введем обозначение $P = \frac{m}{N}$ и отложим точки в координатах рис. 3. Тогда среднему порогу одновременности пробоя будет соответствовать разрядное расстояние g_A (на рис. 3 обозначения даны без индексов).

Степень разброса будет характеризоваться отношением $\frac{k}{g}$ (рис. 3).

То же проделываем для второго стандартного разрядника B и находим аналогичное среднее разрядное расстояние g'_B . Пересечение кривых на сетке дает точку G , соответствующую „средней“ одновременности пробоя (рис. 4). Разрядные расстояния f и h (рис. 3) соответствуют вероятностям пробоя, равным нулю и единице. Границы $\alpha\beta\gamma\delta$ (рис. 4) соответствуют пределам разброса. Наносим зоны $\alpha\beta\gamma\delta$ с точками G для различ-

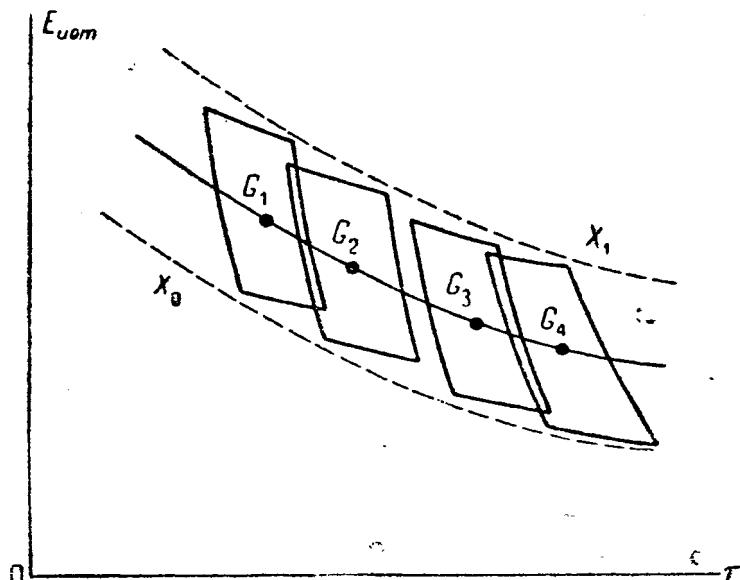


Рис. 5

ных амплитуд волн. Получаем и среднюю импульсную характеристику $G_1G_2G_3G_4$ (рис. 5) и границы разброса (пунктирные кривые X_0 и X_1).

Нетрудно видеть, что границы можно получить и проще: верхнюю границу — как геометрическое место точек пересечения кривых A_h и B_h' , нижнюю — как геометрическое место точек пересечения A_f и B_f' (f и h — см. рис. 3). Таким же точно образом можно получить зависимость $E_{уст} = f(t)$, соответствующую промежуточной вероятности пробоя (t , т. е. не 0, не 0,5 и не 1, а например, вероятности 0,7). Для этого нужно найти геометрическое место пересечений характеристик A_u и B_u (величина u показана на рис. 3).

Полученная кривая (назовем ее $X_{0,7}$; будем для конкретности считать, что она относится к масляному промежутку) имеет следующий смысл. Положим, что импульсная характеристика некоторого промежутка Y , обладающего разбросом относительно малым (например, гирлянда изолаторов), пересекается с кривой $X_{0,7}$. Для точки пересечения вероятность пробоя объекта X (масла) при параллельном включении с промежутком Y равна 0,7. Если проведем характеристики $X_0, X_{0,1}, X_{0,2}, \dots, X_1$, то получим ряд точек пересечения с кривой Y . Предположим, получили пересечения кривой Y лишь с четырьмя кривыми: $X_0, X_{0,1}, X_{0,2}$ и $X_{0,3}$. Тогда средняя вероятность пробоя масла при параллельном включении с промежутком Y в условиях эксплуатации равна среднему арифметическому $0+0,1+0,2+0,3$.

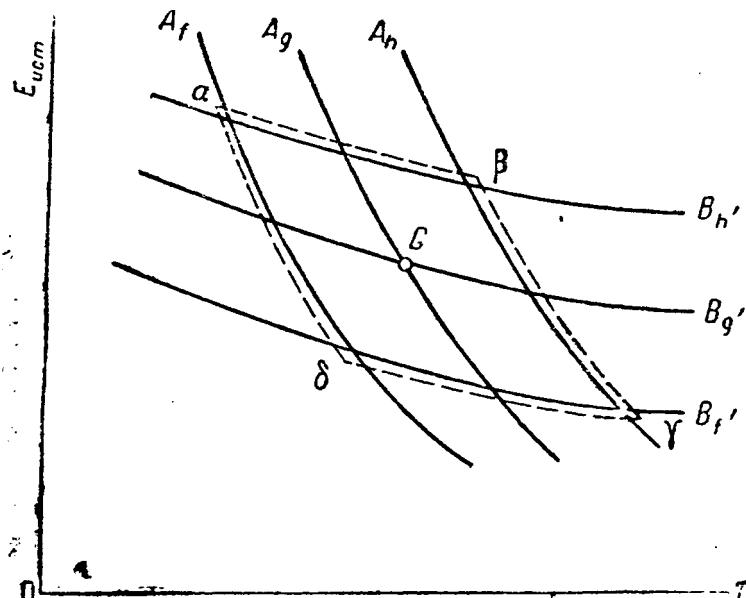


Рис. 3. Вологодская областная универсальная научная библиотека

Здесь мы приняли равную вероятность больших и малых коэффициентов импульса (больших и малых амплитуд волн), но можно было бы внести соответствующие корректизы.

Если мы хотим применять импульсные характеристики технически, то обобщения неизбежны и неизбежно применение статистического метода.

В таком случае тем больше ценность результатов, чем больше число точек. С точки зрения статистической результаты, полученные на основе описанного опыта, эквиваленты результатам, полученным на основе такого числа осциллограмм, которое лишь вдвое меньше всего числа разрядов, воспроизведенных при данном опыте. Это действительно так, если исходить из законов больших чисел.

Ясно, что при малой распространенности у нас осциллографов и при большой их загрузке такое массовое снятие осциллограмм весьма затруднительно. Между тем исследование указанных закономерностей весьма важно, поскольку на них базируется практика (например, высоковольтное трансформаторостроение, где координация изоляции основывается на импульсных характеристиках масляной изоляции⁷⁾). С точки зрения затраты времени и стоимости эксперимента производство подобных опытов с помощью осциллографа окажется менее выгодным, и лучше использовать последний лишь для контроля.

Для снятия импульсных характеристик дорогих объектов, приходящих в негодность при разряде (пробой сложных изоляционных конструкций), изложенный метод практически неприменим, поскольку всякая экономия в числе объектов весьма существенна. Но в принципе и здесь затруднений нет. Проиллюстрируем, как здесь может быть найден порог одновременности пробоя. При работе „пачками“ с постепенным увеличением пробивного расстояния стандартного промежутка мы доходим до момента, когда при расстояниях $S_1 < S_2 < S_3$ и т. д. получаем:

при расстоянии S_1	— нет пробоя объекта (объект — X)				
” ” S_2 —	(” X)				
” ” S_3 — пробой на 5-м ударе (” X)					
” ” S_4 — ” 2-м ” (” Y)					
” ” S_5 — ” 1-м ” (” Z_1)					
” ” S_6 — ” 1-м ” (” Z_2)					

Порог одновременности лежит между S_2 и S_5 . Развеется, подобной идеальной таблицы не получится, но, увеличив число точек, мы всегда могли бы получить средний порог одновременности. Подобные исследования обычной твердой изоляции представляют большой интерес.

Остановимся теперь на вопросе воспроизведения стандартной волны. Известно, что одинаковые по схеме и константам ударные контуры могут генерировать разные по форме волны вследствие отклонений от математических зависимостей, вытекающих из схемы контура, абстрагированной от конструктивного выполнения. „Колебания на фронте“, требующие демпфирования контура, зависят от длины и расположения соединительных проводов, от конструкции конденсаторов. Величины сопротивлений, включенных в схему, могут при высоких напряжениях отличаться от своих nominalных значений. Сопротивления могут быть не чисто омическими. Разумеется, можно с той или иной степенью детализации стандартизовать и схему и конструкцию ударного контура. Но развивая сказанное выше, можно дать также и способ проверки ударного

контура на пригодность его для пользования данной „сеткой“, соответствующей данной стандартной волне, причем даже если нет катодного осциллографа.

Предположим, что на сетке (рис. 1) для всех или части точек пересечения указаны те амплитуды волн, при которых каждая точка была получена (для области срезов на хвосте амплитуда волны просто равна ординате точки пересечения). Производя „опыт параллельного включения“ обоих стандартных промежутков A и B , определяя пороги одновременности пробоя при разных комбинациях разрядных расстояний и замеряя при этом разрядником соответствующие амплитуды волн, можем составить табличку, изображенную на рис. 6. В клетках проставляются амплитуды волны. Данные таблички сверяются с данными сетки. Может и не потребоваться заполнения всех клеток, а окажется достаточным получение двух-трех кривых, соответствующих двум-трем строкам, столбцам или диагоналям таблички.

Рис. 6

$\begin{matrix} A \\ \diagdown \\ B \end{matrix}$	a	b	c	d
$\begin{matrix} \diagup \\ a \end{matrix}$				
b				
c				
d				

Общие конфигурации волн, полученных от одинаковых по схеме контуров, не могут сильно различаться. Предположим, что помимо сетки, справедливой для самой неискаженной стандартной волны, имеем в своем распоряжении серию сеток, охватывающую те типичные искажения стандартной волны, которые могут встретиться при ее воспроизведении (например, отклонения в ее параметрах, колебания на фронте, „пик“ на амплитуде, типичные иные нарушения формы). Выбирая сетку, данные которой подходят к данным полученной нами таблички, мы можем с требуемой практикой точностью судить о виде и параметрах нашей волны⁸⁾.

Таким образом, подыскав подходящую сетку (сверкой с табличкой рис. 6), мы можем получить совершенно правильную импульсную характеристику объекта X для волны, соответствующей этой сетке, — сетке, которую нам пришлось использовать. Вопрос о переводе характеристики, относящейся к одной форме волны, в характеристику, относящуюся к другой форме, — вне рамок нашей статьи. Заметим, что внесением корректировок в ударный контур можно ликвидировать отклонения таблички от данных той сетки, которая соответствует желаемой форме волны. Методом улавливаются лишь те искажения волны, которые существенны для импульсных характеристик, и это может

⁷⁾ См. статьи Vogel u. Moninger, Lloyd and Clem, „Trans. AIEE, 1933“, June.
 Болгарская областная универсальная научная библиотека
 www.booksite.ru

⁸⁾ Мы исходим из условия, что длина фронта волны, даваемой ударным контуром, не сильно меняется с повышением амплитуды. Иначе импульсная характеристика, снятая любым способом, неверна, так как на разных своих концах соответствует разным формам волны. Обычно меняют амплитуду простым раздвижением зажимающих шаров, и указанное условие в пределах требуемой точности большей частью выполняется. При очень крутых фронтах нужна, однако, некоторая осторожность в этом отношении. Помимо контроля крутизны фронта осциллографом, мы с успехом применили Steilheitsmesser Биннера (см. Binder, Wanderwellenvorgänge auf experimenteller Grundlage, 1928).

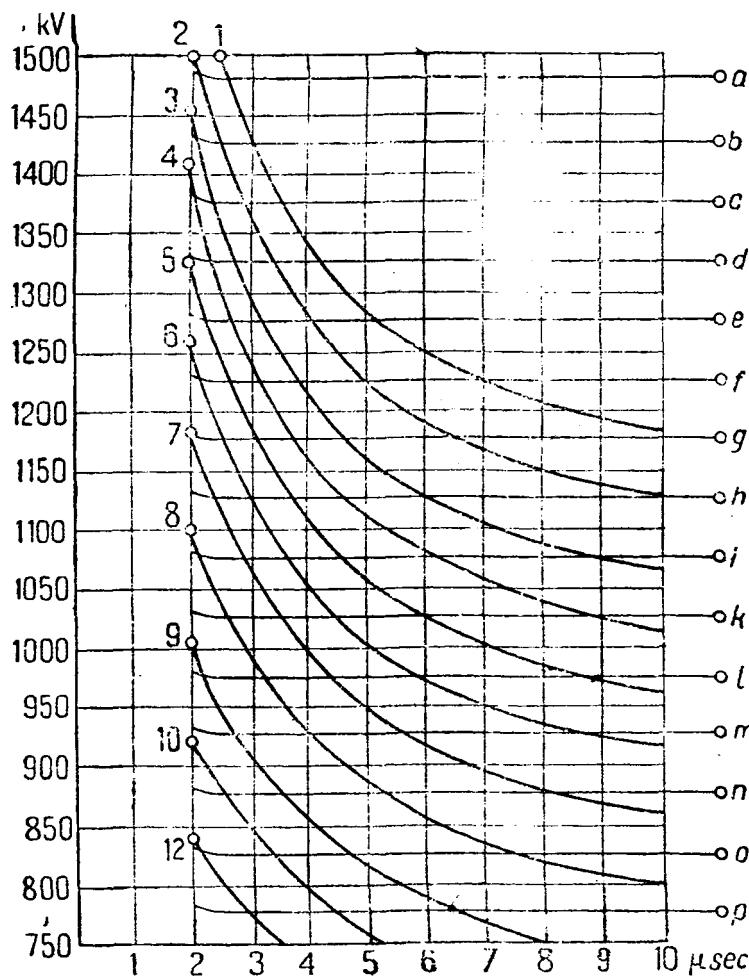


Рис. 7

удержать от излишней строгости по отношению к „чистоте“ формы волны.

Разумеется, может быть несколько стандартных волн со своими сериями „сеток“. Число сеток в серии может быть малым: импульсные характеристики относительно медленно изменяются с изменением формы волны, а возможные отклонения от стандартной волны

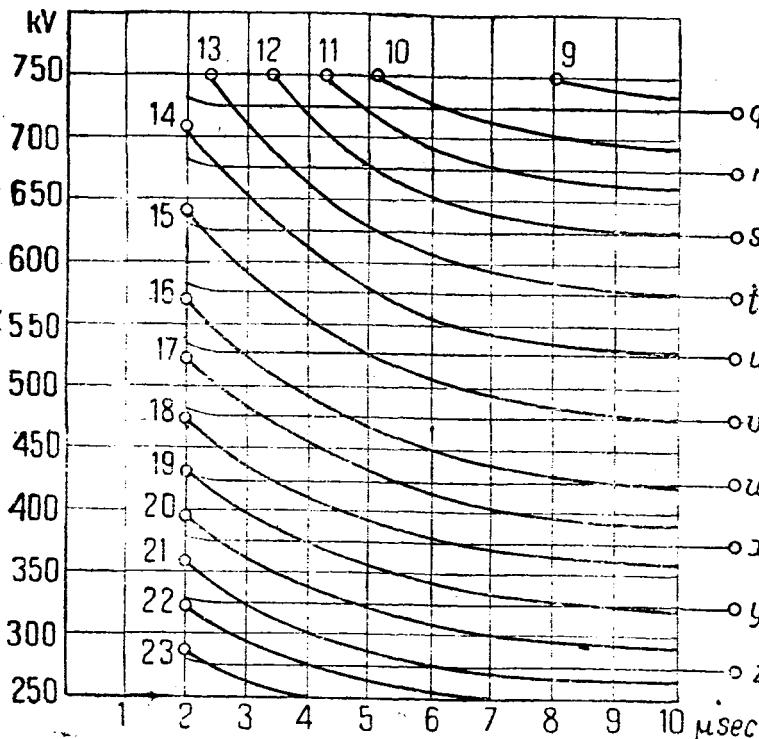


Рис. 8

елики. Требования же практики ограничены определенной точностью.

При снятии импульсных характеристик катодным осциллографом получение точек, соответствующих малым запаздываниям, сопряжено с трудностями. „Пик“ снимка часто получается размытым, необходимо, чтобы хорошо прочертились линии фронта и спада. Между тем, скорости записи чрезвычайно большие (например, расстояние в 30÷50 mm должно быть пройдено в течение примерно 0,1 μ sec и меньше). Искажения в

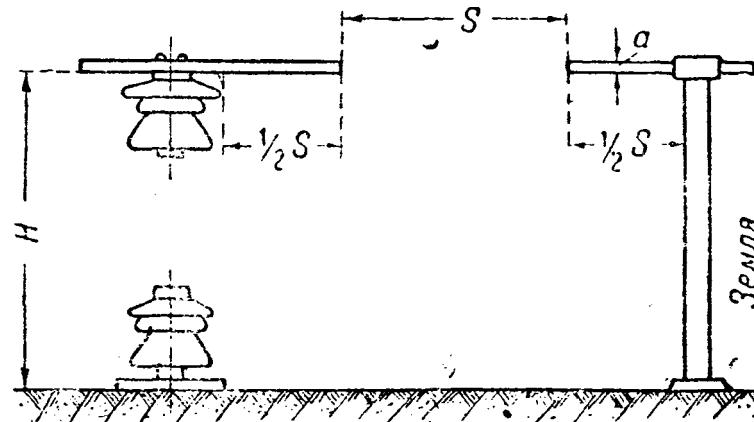


Рис. 9

Приложение Данные к рис. 7, 8 и 9

Волна + 1,5/40 μ sec.

С т е р ж и ⁹⁾			Ш а р ы ¹⁰⁾ (один шар заземлен)			
Кривая	Пробивное расстояние S	Высота от земли ¹¹⁾ H	Сторона сечения a	Кривая	Пробивное расстояние S'	Диаметр D
	mm	mm	mm		mm	mm
1	1 880			<i>a</i>	940	
2	1 790	2 250		<i>b</i>	860	
3	1 700			<i>c</i>	790	
				<i>d</i>	730	
4	1 630					
5	1 520	1 750		<i>e</i>	680	1 000
6	1 410			<i>f</i>	635	
				<i>g</i>	590	
				<i>h</i>	550	
7	1 310					
8	1 220			<i>i</i>	510	
9	1 130	1 500	20	<i>k</i>	475	
10	1 065			<i>l</i>	440	
				<i>m</i>	410	
11	1 015					
12	970			<i>n</i>	380	
13	890	1 000		<i>o</i>	350	
14	800			<i>p</i>	320	
15	720			<i>q</i>	420	
16	635			<i>r</i>	361	
17	580			<i>s</i>	313	
				<i>t</i>	272	
18	520	750				
19	475			<i>u</i>	235	
				<i>v</i>	205	
20	430			<i>w</i>	175	
21	390					
				<i>x</i>	145	
22	350	500	12	<i>y</i>	122	
				<i>z</i>	102	
23	310	400				

⁹⁾ 25° C, 760 mm Hg; относительная влажность 65%.

¹⁰⁾ 20° C, 760 mm Hg; нормы VDE.

¹¹⁾ Не меньше, чем указанная высота.

потенциометре и подводке бывают наибольшими именно при прохождении фронта, а при „срезе“ на этом последнем влияют на результат (величину запаздывания) даже небольшие искажения этого рода. Получение надежных точек в области малых запаздываний („срезов“ на фронте) требует довольно длительной, соответственно обставленной, работы с использованием контрольных методов (например, петли Биндера, схем с емкостями и кенотронами). Все это может быть проделано для стандартных сеток, и тем самым проведение импульсных характеристик через область у начала координат, область, обычно пустующую, делается доступным в условиях даже полевых.

На рис. 7 и 8 приведены „сетки“, которые могут быть использованы для измерения запаздывания (см. также рис. 9 и приложение). Использованы данные для стандартных американских защитных промежутков¹²⁾.

Данные относятся к стандартной волне 1,5/40 положительной полярности и к абсолютной влажности 15 g/m^3 (что при 25°C и 760 mm Hg соответствует относительной влажности 65%). Напряжение повышается с ростом влажности незначительно (на $0,55\%$, при приросте влажности в 1 g/m^3 — данные для точки минимального импульсного перекрытия). Электроды представляют собой стержни квадратного сечения (рис. 9); концы обрезаны перпендикулярно оси и не закруглены.

В качестве другого — эталонного промежутка взят шаровой разрядник. За импульсные пробивные напря-

жения „шаров“ принятые их номинальные (при 50 Hz), а импульсные характеристики проведены горизонтально.

Отсчет запаздывания производится от начала фронта.

Ход опыта для области срезов на хвосте описан выше. Что касается области срезов на фронте, то нет достоверных данных как для защитных промежутков, так и для шаров. Поэтому кривые начаты от абсциссы $2 \mu\text{sec}$.

Приведенные сетки нельзя еще назвать прецизионными, и они могут служить лишь для не особенно точных измерений. Надеемся, что представится возможность провести экспериментальные работы, которые позволили бы получить прецизионные сетки для всей области запаздываний и для разных волн¹³⁾.

Указанный метод, разумеется, не предлагается в порядке „конкуренции“ с точными измерениями катодным осциллографом. Разработка его частично может явиться „побочным продуктом“ при изучении закономерностей запаздывания (например, данные для выработки стандартных электродов, элементы сеток). Он дает способ контрольных измерений. Расширяет возможность получения опытного материала, в больших количествах нужного для текущих проблем, за пределы немногих лабораторий, в совершенстве владеющих техникой катодного осциллографа. Позволяет производить массовые измерения. Может оказать ценные услуги низовым лабораториям в вопросах „конкретной координации“. Наконец, может оказаться полезным при выработке норм по „координации“.

12) По материалам, опубликованным Vogel, а также Montsinger, Lloyd and Clem (ibid.), нами применена интерполяция.

13) О стандартных волнах см. Стекольников и Каравес, К вопросу выбора стандартных волн для импульсных испытаний „Электричество“ № 15, 1933.

Метод моделей в применении к исследованию вентиляции электрических машин

Инж. Н. П. Савин
Москва, ВЭИ

Современный уровень электромашиностроения характеризуется высоким освоением существующих типов электрических машин как в смысле изучения основных физических процессов, сопровождающих работу машин, так и в отношении конструктивного оформления их.

К сожалению, этого нельзя сказать в отношении охлаждения или вентиляции электрических машин. Несмотря даже на то, что в тесно связанной с ней области нагрева машин имеются многочисленные теоретические и экспериментальные работы, область вентиляции в применении к электрическим машинам является сильно отстающей в смысле экспериментальной и теоретической разработки вопросов.

Это положение одинаково справедливо и для нашей электромашиностроительной промышленности и в отношении заграничных фирм за исключением очень немногих GFC, Westinghouse. В большинстве же случаев вопросы охлаждения электрических машин разрешаются интуитивным путем, не прибегая к предварительным лабораторным изысканиям. В результате конструктивное выполнение вентиляции иногда ведет к таким существенным недостаткам, которые обусловливают собой недостаточную надежность машин в эксплуатации¹⁾.

В наших условиях, когда наши заводы в отношении техники производства электрических машин не только

встали на уровень заграничных фирм, но и по многим типам машин уже добились более высоких показателей (например, асинхронные двигатели), проблема вентиляции приобретает чрезвычайно большое значение, открывая перспективы дальнейшего совершенства в деле наиболее полного использования активных материалов машины.

Целесообразность конструктивного выполнения машины с точки зрения нагрева и охлаждения требует в первую очередь экспериментального изучения вентиляции на конкретном типе электрических машин для получения необходимых опытных коэффициентов. На основе данных испытания может быть разработан затем метод расчета вентиляции.

Разрешение этой задачи, разумеется, требует всестороннего исследования вентиляции. Последнее необходимо также и для того, чтобы иметь возможность провести подробный тепловой расчет с учетом изменения скоростей потоков воздуха на отдельных участках машины.

Из применяемых типов электрических машин пока только в отношении турбогенераторов наши заводы (например, «Электросила») практикуют расчет вентиляции. Однако метод расчета, применяемый заводом «Электросила», обладает рядом существенных недостатков. Он не дает полной картины распределения скоростей по отдельным участкам вентиляционной системы турбогенератора и, что наиболее существенно, является крайне неточным, так как в основу расчета кладутся коэффициенты и формулы не соответствующие

1) См. техническое сообщение ВЭИ: Савин и Звеногордский, Исследование вентиляции турбогенератора 3500 кВт, 1500 об/мин, установленного на Штергрэс.

действительной картине гидродинамических явлений в работающей машине²⁾.

Всестороннее исследование вентиляции, необходимость которого является достаточно обоснованной, в действительных условиях на работающем турбогенера-

²⁾ Потери напора на отдельных участках машины по этому методу подсчитываются для всех участков по одной и той же формуле Карно-Бордо, справедливой только для частного случая, а именно при явлениях удара в результате внезапного перехода от малого сечения к большому.

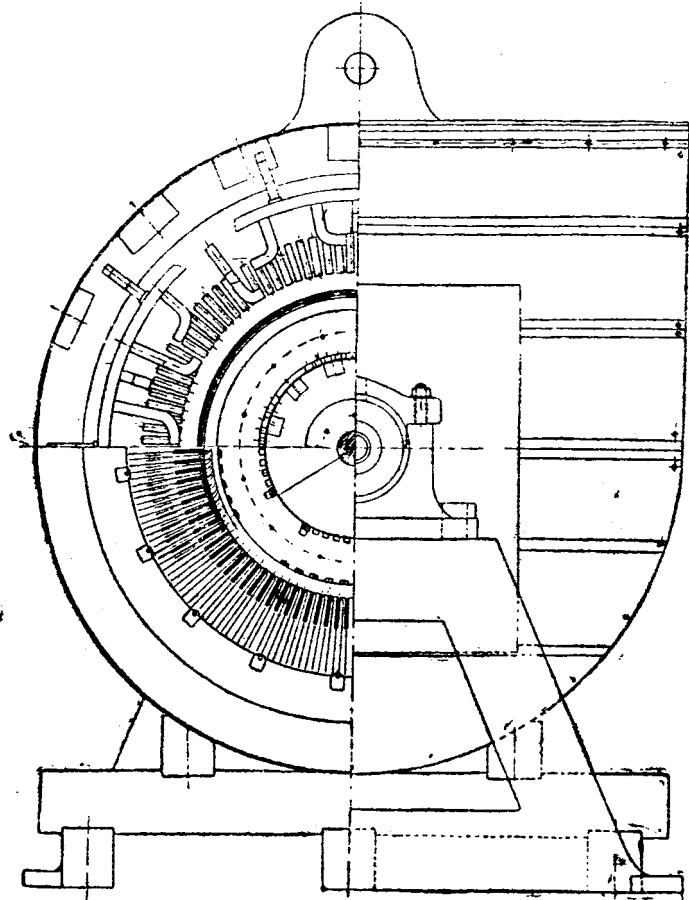


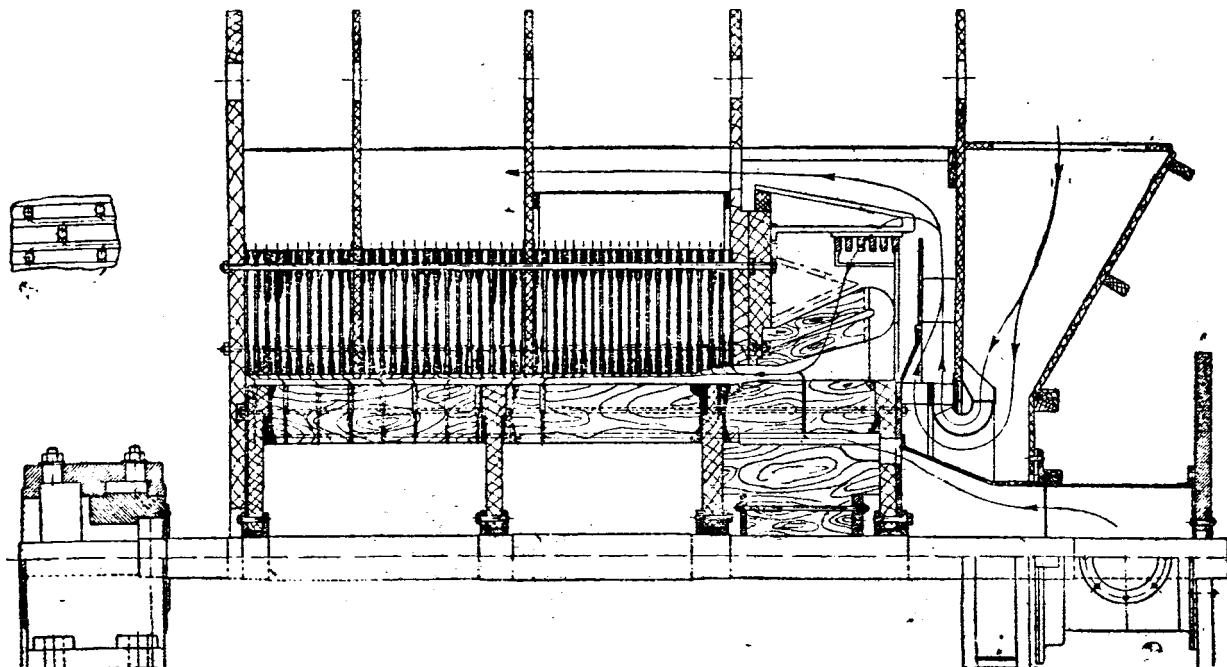
Рис. 1а. Поперечный разрез модели турбогенератора 50 МВт при 1500 об/мин

торе представляется невозможным. Причину этого прежде всего следует искать в тех ограниченных возможностях техники экспериментирования, которыми в настоящее время располагает исследователь вентиляции. Такое положение в значительной мере объясняется также и тем, что электротехники мало занимались вопросами вентиляции и методики ее исследования.

В самом деле, основными приборами при исследовании вентиляции в настоящее время являются трубы Пито, позволяющие измерять статический и динамический напоры в месте замера, цилиндрические насадки, помочь им которых, кроме того, можно определить направление потока в месте замера, и, наконец, трубочки, устанавливаемые «заподлицо» с поверхностью, омыываемой воздухом, и служащие для замера статических давлений. Сюда же относится анемометр, служащий для замера скоростей воздуха при протекании последнего через большие сечения.

При проведении испытаний в условиях эксплоатации явилась бы необходимость сверления во многих местах машины для установки указанных измерительных трубочек, что во многих случаях является невыполнимым. Поэтому, естественно, возникает вопрос о проведении подробных испытаний вентиляции на деревянной модели. Деревянная модель позволяет осуществить наиболее просто и полно препарировку, т. е. установку измерительных трубочек в различных местах модели для получения полной картины гидродинамических явлений не только со стороны их качественной оценки. С помощью модели можно получить и количественную оценку этих явлений в действительной машине, прототипом которой является модель. Кроме удобства препарировок к работам с моделью часто прибегают тогда, когда проектируемый объект имеет громоздкие размеры и когда, следовательно, предварительное изучение этого объекта потребовало бы больших расходов на его изготовление и проведение опытов. В практике проектирования, например, вентиляторов такой метод моделей позволяющих судить о рабочих свойствах действительного вентилятора, имеет очень большое распространение.

Для такого перехода от модели к натуре достаточно воспользоваться законами подобия, которые находят широкое применение при изучении вопросов вентиляции.



Вологодская областная научная библиотека
www.booksite.ru

Сущность законов подобия заключается в установлении степени пропорциональности основных величин, характеризующих работу той или иной вентиляционной системы в зависимости от изменения линейных размеров этой системы и от изменения числа оборотов при ее работе.

На основании законов подобия при изменении линейных размеров и числа оборотов системы скорость потока воздуха (v m/sec) изменяется пропорционально первой степени размеров и первой степени числа оборотов; напор, который развивает система (H mm H₂O), — второй степени размеров и второй степени числа оборотов; расход воздуха, проходящего через систему (Q m³/sec), — третьей степени размеров и первой степени числа оборотов и, наконец, мощность, потребляемая системой (P kW), — пятой степени размеров и третьей степени числа оборотов.

При переходе к модели необходимо соблюдать не только геометрическое подобие модели натуре, но также и условия так называемого гидродинамического подобия, выражаемого числом Reynolds'a³): $R = \frac{vd}{\nu}$,

где N — скорость потока воздуха в m/sec, b — какая-нибудь характерная для рассматриваемого случая линейная величина, например, диаметр в м, ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости или газа в m²/sec.

При соблюдении одного и того же значения числа Reynolds'a как на модели, так и в действительных условиях картина потока во всех частях остается подобной, безразлично, будут ли в одном случае, например, в опытах с моделью применять жидкость, а в другом случае — в условиях действительного выполнения — газ.

Нужно отметить, что при высоких числах Reynolds'a и при наличии воздухопровода, обладающего большой шероховатостью, коэффициент сопротивления по опытам Schiller (4) является величиной приблизительно постоянной.

При исследовании сложной вентиляционной системы целесообразно применять такую модель, которая воспроизводит установку в целом, и лишь после получения общей картины явлений для большего уточнения полученных результатов использовать модели, отражающие отдельные части системы.

При таком комбинированном подходе к разрешению задач исследования следует ожидать достаточно надежных результатов.

Отдельные модели приобретают также особую ценность при переходе к активному воздействию на конструктивное оформление вентиляционной системы машины, вытекающему из общей оценки тех количественных соотношений, которые получаются в результате исследования модели в целом.

Для большей уверенности в том, что найденные опытным путем коэффициенты, которые в дальнейшем могут быть положены в основу расчета вентиляционной системы, соответствуют действительности, целесообразно провести испытание вентиляции машины в действительных условиях в объеме, который позволяет современная техника экспериментирования вентиляции, и сопоставить эти результаты с теми, которые получены при работе с моделью.

В основу производства турбогенераторов на заводах «Электросила» и ХТГЗ положена так называемая американская серия по типу генераторов фирмы GEC. Этот тип генераторов имеет замкнутую многоструйную (в зависимости от мощности машины — двухструйную, трехструйную и т. д.) радиальную систему вентиляции. Эта система вентиляции является наиболее совершенной из существующих систем, поскольку она обеспечи-

вает наиболее целесообразное распределение охлаждающего воздуха по отдельным участкам машины и поступление всего количества воздуха в воздушный зазор машины. Этим путем достигается более интенсивное охлаждение ротора.

Турбогенератор мощностью 50 MW, 1500 об/мин, модель которого положена нами в основу исследования, имеет трехструйную систему вентиляции (рис. 1).

Вентиляция генератора осуществляется двумя центробежными вентиляторами, укрепленными к центрирующим кольцам капи по обеим сторонам машины, и системой радиальных каналов, просверленных в узких зубцах ротора, работающих как элементарные центробежные вентиляторы.

Путь воздушного потока для одной половины машины состоит из следующих участков:

Воздух из камеры охлаждителей поступает в камеру низкого давления (перед вентилятором) и затем нагнетается вентилятором в камеру лобовых соединений (камеру высокого давления), проходя при этом через диффузор. Постановкой диффузора стремится увеличить полезный статический напор, развиваемый вентилятором путем преобразования скоростного напора закручивания от тангенциальной составляющей абсолютной скорости на выходе вентилятора, являющегося при отсутствии диффузора потерянным, в полезный статический напор. Чтобы получить больший эффект от установки диффузора, последний снабжают рядом направляющих лопаток, придавая им удобную в аэrodинамическом отношении форму.

На пути воздуха к вентилятору часть воздуха из камеры низкого давления попадает на лопатки вентилятора (внешний ряд лопаток) через особое направляющее приспособление, так называемый дефлектор. Дефлектор имеет своим назначением выровнять поток воздуха при входе на лопатки и обеспечить меньшие потери при входе.

Остальная часть воздуха распределяется между внутренним рядом лопаток вентилятора и вентиляционной системой ротора.

Из камеры лобовых соединений воздух разветвляется по двум параллельным путям: часть воздуха поступает в камеру впуска (камера холодного воздуха), проходя при этом через канал, расположенный в верхней части корпуса и соединяющий камеру лобовых соединений с выпускной камерой посредством ряда окон; другая часть воздуха, омывая лобовые соединения статорной обмотки, попадает в воздушный зазор машины. При течении по воздушному зазору эта часть воздуха отводится в радиальные каналы статора и поступает в камеру выпуска (камера горячего воздуха); таким образом, по мере удаления от точки входа воздуха в воздушный зазор количество воздуха в воздушном зазоре постепенно уменьшается.

Воздух, поступивший в камеру холодного воздуха, распределяется по радиальным каналам статора и попадает в воздушный зазор. Эта часть воздуха в воздушном зазоре разветвляется: одна часть течет в направлении камеры выпуска, граничащей с камерой лобовых соединений, другая часть течет в направлении камеры выпуска, расположенной в середине машины. Очевидно, что в точке разветвления потоков скорость воздуха в воздушном зазоре является минимальной (точка баланса).

При течении в указанном направлении количество воздуха в воздушном зазоре (а следовательно, и скорость) постепенно увеличивается за счет притока воздуха из радиальных каналов выпускной камеры и достигает максимального значения в точках, лежащих на границах между камерой впуска и камерами выпуска. При дальнейшем течении в зоне выпускных камер количество воздуха в воздушном зазоре постепенно

³ См. Pfeiderer, Die Kreiselpumpe.

⁴ См. Pfeiderer, Die Kreiselpumpe.

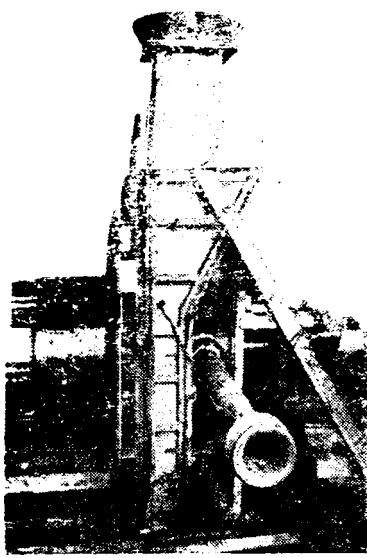


Рис. 2. Большая и малая трубы с коллекторами для замера статорного и роторного расходов воздуха на модели турбогенератора

уменьшается за счет ответвления воздуха в радиальные каналы статора, откуда он поступает в камеры горячего воздуха, а затем в камеру охладителей, после чего начинается новый цикл движения воздуха.

Следовательно, для рассматриваемой системы вентиляции по воздушному зазору имеется семь характерных точек: четыре точки, в которых скорость воздуха максимальная (точки раздела), и три точки, соответствующие минимальной скорости воздуха (точки баланса).

Часть общего расхода генератора, проходящая через вентиляционную систему статора, составляет так называемый статорный расход; другая часть, забираемая системой ротора, образует роторный расход.

Воздух, поступающий в ротор через «окна» под центрирующим кольцом кассеты, профрезованные на прилегающей к центральной бочке части ротора, поступает затем в канал, образуемый лобовыми соединениями обмотки возбуждения и телом ротора. При течении по этому каналу часть воздуха, омывая лобовые соединения обмотки возбуждения, проходит по каналам между витками катушек и выбрасывается затем через отверстия, просверленные в кассете, в камеру лобовых соединений статорной обмотки; другая незначительная часть воздуха через отверстия, образующиеся между центральной бочкой и кассетой в зоне широких зубцов ротора, поступает в воздушный зазор. Оставшаяся часть воздуха поступает в подпазовые каналы, откуда попадает в радиальные каналы, просверленные в узких зубцах ротора, и выбрасывается затем в воздушный зазор машины, где смешивается с воздухом, поступающим в зазор через радиальные каналы статора.

Деревянная модель генератора взята в половинном масштабе в сравнении с действительным генератором и в основном полностью воспроизводит конструкцию действительного генератора. При этом в основу исследования берется половина генератора, поскольку другая половина является примерно симметричной по отношению к первой. Некоторая несимметричность имеет место благодаря наличию шинных соединений на стороне возбудителя, а также благодаря некоторому различию в условиях входа воздуха в ротор и на внутренний ряд лопаток вентилятора со стороны турбины и со стороны возбудителя. Однако влияние этой несимметричности можно установить, воспроизведя из модели для половины генератора условия, аналогичные действительному генератору.

С целью разделения общего расхода модели генератора на статорный и роторный расходы и определения величины этих расходов поступление воздуха в ротор происходит изолированно от статорной системы. Для

этого служит разделительный конус, выполненный из алюминия, который одним основанием крепится к наружному диску, имитирующему центрирующее кольцо кассеты, а на внутренней и внешней поверхностях у конца другого основания предусмотрено лабиринтное уплотнение. В этой части разделительный конус входит в связь с камерой для роторного воздуха с одной стороны и камерой низкого давления с другой стороны. Такая система предохраняет от засасывания воздуха центробежным вентилятором и ротором из окружающего пространства.

Камера для роторного воздуха снабжена патрубком, последний помостью фланца соединен с трубой диаметром 100 мм, через которую воздух из окружающего пространства поступает в ротор.

Воздух, проходящий через вентиляционную систему статора, прежде чем поступить в камеру низкого давления проходит также по трубе диаметром 300 мм.

Как большая, так и малая труба снабжена так называемым коллектором, который обеспечивает плавный вход воздуха в трубу и устраниет явление сжатия потока воздуха после входа в трубу. Непосредственно за коллекторами устанавливаются измерительные трубочки, служащие для определения расхода, проходящего соответственно через статор и ротор (рис. 2).

Пакеты статорного железа на модели набраны из отдельных листов фанеры. Крайние пакеты со стороны камеры лобовых соединений образуют ступенчатую форму воздушного зазора. Между пакетами в радиальных вентиляционных каналах установлены распорки («ветряницы»), имеющие внизу у основания зубцов переход от радиального направления к изогнутому.

Канавки рассеяния в пазах статора, так же как и на действительном генераторе, заполнены клиньями, которые на участках, приходящихся против вентиляционных каналов, имеют срез.

Форма загиба ветряниц и среза клиньев находится в соответствии с направлением вращения ротора и направлением потока на входной и выходных сторонах: на стороне камеры впуска загиб ветряниц и срез клиньев направлены по вращению ротора; на стороне камеры выпуска — навстречу вращению ротора. Принятая здесь форма ветряниц и клиньев служит для уменьшения потерь напора.

Активная часть обмотки статора на модели имитирована фанерной набивкой в вентиляционных каналах соответственно форме стержней. Тело статора по длине стянуто болтами, расположенным у внешней и внутренней расточек статора. Лобовые соединения статорной обмотки имеют такую же форму, как и на действи-

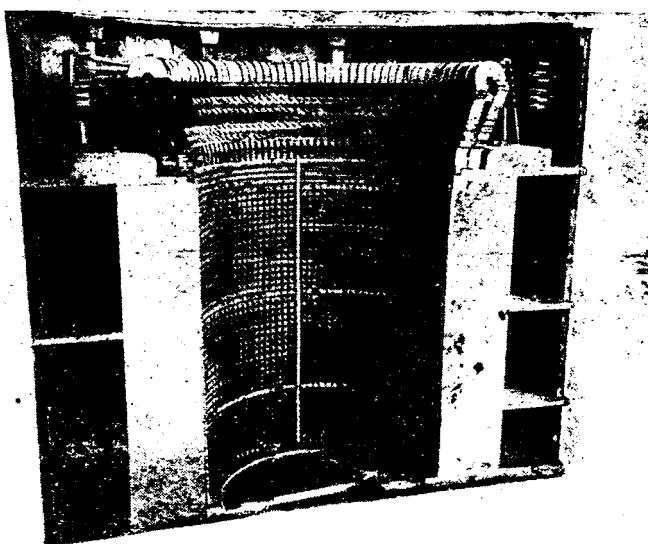


Рис. 3. Разрез статора модели турбогенератора

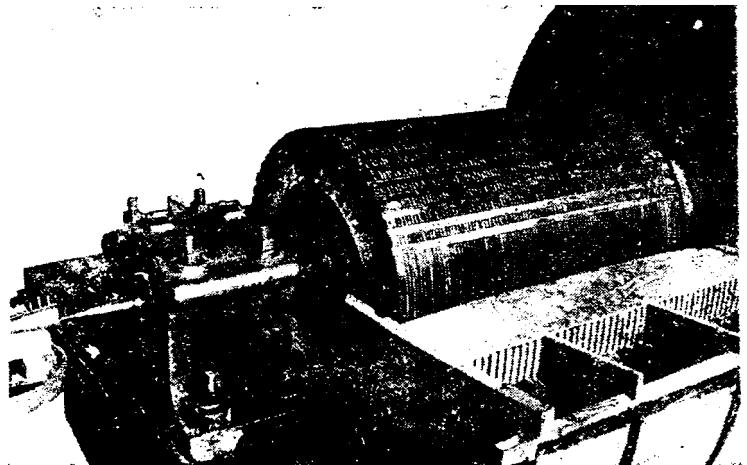


Рис. 4. Ротор модели турбогенератора 50 МВт 1500 об/мин

тельном генераторе. Расстояние между отдельными стержнями в нижнем и верхнем слоях обмотки, образующие на действительном генераторе каналы, по которым проходит омывающий обмотку охлаждающий воздух, на модели воспроизведены путем сверления и развертки соответствующих отверстий в лобовых соединениях. Также сообразно натуре воспроизведены кронштейны и шинные соединения на стороне возбудителя (рис. 3).

Для удобства экспериментирования статор выполнен разъемным.

Центробежный вентилятор выполнен из фанеры с точным соблюдением геометрического подобия. Дефлектор сделан из жести. Конусная часть диффузора выполнена из листового железа, направляющие лопатки и плоская часть диффузора — из фанеры.

Ротор набран из отдельных склеенных между собой и спрессованных листов фанеры (рис. 4). Тело ротора разбито на три части, имея промежуточные опорные диски, связанные с втулками на валу ротора. В аксиальном направлении тело ротора затянуто болтами. Центральная бочка ротора, несущая активную часть обмотки, сделана рифленой путем проточки кольцевых канавок по окружности ротора. В лобовых соединениях обмотки возбуждения предусмотрены радиальные каналы, составляющие одно целое с отверстиями в каппе; эти каналы воспроизводят пространства, образующиеся в натуре между витками катушек. Между телом ротора и нижней поверхностью лобовых соединений роторной обмотки на модели образуется зазор сообразно действительному генератору. Между торцом центральной бочки и каппой в зоне широких зубов предусмотрены отверстия для выпуска воздуха из-под каппы в воздушный зазор машины.

С целью более однородного выполнения радиальных каналов ротора последние изготавливались отдельно и затем вставлялись в отверстия, просверленные в узких зубцах ротора. Выпуск воздуха из подпазовых каналов

в радиальные каналы осуществлен так же, как и в натуре.

Для получения картины распределения скоростей и количества охлаждающего воздуха по каналам ротора последние снабжены измерительными трубочками, общим числом 64, служащими для замера статического и полного давлений в каналах и на поверхности ротора.

Точно так же «препарирован» и статор. В различных местах статора, корпуса и диффузора (170 точек) установлены измерительные трубочки. Кроме того, на модели предусмотрена возможность введения в воздушный зазор машины цилиндрического насадка через радиальные каналы со стороны спинки статорного железа для измерения скоростей и направления потока в различных местах воздушного зазора.

Изготовленная таким образом и препарированная модель турбогенератора позволяет решить многие вопросы, связанные с вентиляцией машины. К числу таких вопросов могут быть отнесены следующие:

1. Исследование вентиляции ротора.
2. Исследование центробежного вентилятора; влияние диффузора и дефлектора на работу вентилятора; наивыгоднейшее положение и форма направляющих лопаток в диффузоре.
3. Распределение скоростей и количества охлаждающего воздуха по радиальным каналам статора.
4. Величина коэффициентов потерь напора на отдельных участках машины.
5. Распределение скоростей и давлений по воздушному зазору машины, а также направление потока в различных местах воздушного зазора.

6. Определение величины потери напора между камерой лобовых соединений и камерой выпуска; вытекающие отсюда вопросы конструктивного изменения формы канала, соединяющего эти камеры.

7. Расчет трехструйной системы вентиляции турбогенератора на основе данных исследования.

Нужно заметить, что вентиляция турбогенератора является наиболее сложной в сравнении с вентиляцией других типов электрических машин. Последние представляют поэтому большие удобства как в смысле непосредственного экспериментирования, так и в смысле изготовления моделей. К сожалению, в отношении вентиляции даже этих типов электрических машин сделано очень мало. Достаточно, например, сказать, что применяющиеся здесь вентиляторы зачастую совсем не рассчитываются, в результате чего не может быть предусмотрено рациональное выполнение формы лопатки, числа лопаток, ширины вентилятора и т. д. в соответствии с режимом работы вентилятора. Случайный же выбор вентилятора часто ведет к неэкономичной его работе. Между тем, продуманное выполнение вентиляции может дать чрезвычайно большой эффект. Примером этого может служить хотя бы сдвоенная система вентиляции, примененная на заводе «Электросила» в асинхронных двигателях серии АШ, в результате чего мощность машины значительно увеличилась в сравнении с двигателем серии И.

К вопросу о влиянии числа полюсов асинхронного двигателя на коэффициент мощности его

Инж. Ф. А. Дементьев
Ленинград

Явление понижения коэффициента мощности асинхронного двигателя с уменьшением синхронной скорости вращения его (при постоянстве частоты) представляет безусловный интерес как с теоретической стороны, так и по практической своей значимости. Между тем, чаще всего это явление не рассматривается вовсе или же в объяснениях его ограничиваются указаниями причин скорее конструктивного, чем физического порядка, причин, хотя и влияющих на $\cos \varphi$, но имеющих второстепенное значение и не определяющих сущности явления¹⁾.

Ниже следующее имеет целью показать, что изменение коэффициента мощности асинхронного двигателя с изменением синхронной скорости вращения определяется в основном тем, что, тогда как активная мощность двигателя при постоянстве электрического и магнитного использования изменяется приблизительно прямо пропорционально скорости вращения, реактивная его мощность постоянна (рис. 1).

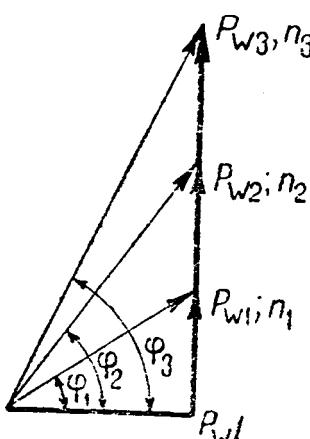
I

Ампервитки намагничивания, необходимые для проведения магнитного потока через междужелезное пространство, составляют обычно около $\frac{3}{4}$ от полных ампервитков намагничивания асинхронных машин. Реактивная мощность, соответствующая полным ампервиткам намагничивания, также составляет до $\frac{3}{4}$ полной реактивной мощности асинхронных двигателей при номинальной нагрузке. Таким образом составляющая полной реактивной мощности, необходимая для создания и поддержания магнитного потока в объеме междужелезного пространства машины, составляет в большинстве случаев около 50% от полной реактивной мощности двигателя под нагрузкой и представляет определяющую коэффициент мощности величину.

Рассмотрим изменение коэффициента мощности асинхронного двигателя с изменением синхронной скорости вращения, считаясь только с этой составляющей реактивной мощности, т. е. пренебрегая составляющей, обусловливаемой рассеянием статора и ротора, и считая проводимость железа равной бесконечности.

Для этого проще всего сопоставить два исполнения одной и той же машины на разные числа полюсов при сохранении постоянства электрического и магнитного использования машины, т. е. при постоянстве AS и B_l ²⁾. Существенно отметить сохранение постоянства следующих размеров активного железа: диаметра расточки статора и внешнего диаметра ротора, следовательно, и междужелезного пространства, длины статора и ротора.

Рис. 1. Соотношение активной и реактивной мощности при исполнении асинхронной машины на скорости $n_1 < n_2 < n_3$ при неизменном использовании и некоторых допущениях



1) Единственное исключение до последнего времени, сколько известно автору, составляла книга Vidmar, „Wirkungsweise Elektromagnetischer Maschinen“. Русский перевод М. Видмар, „Теория и работа электрических машин“, ГНТИ 1931. См. приложение № 2.

2) Предположением бесконечной проводимости железа исключается из рассмотрения не имеющий в данном случае принципиального характера вопрос о проведении потока через спинку.

Предположим для простоты в обоих исполнениях один и тот же короткозамкнутый ротор. Таким образом различие исполнений скажется только на статорной обмотке. Обозначим число пар полюсов и синхронные скорости вращения в обоих исполнениях соответственно через p_1 , p_2 , n_1 и n_2 и положим, что

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{p_2}{p_1} = k.$$

II

Активные мощности в обоих исполнениях P_{w1} и P_{w2} с известным допущением (определенным в приложении 1) относятся между собою, как k (рис. 1):

$$\frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{p_2}{p_1} = k. \quad (1)$$

Действительно,

$$\frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \frac{M_1 \omega_1}{M_2 \omega_2} = \frac{M_1 n_1}{M_2 n_2}.$$

А моменты вращения M_1 и M_2 в приближении при $AS = \text{const}$ и $B_l = \text{const}$ можно считать равными друг другу ($M_1 = M_2$).

Покажем теперь, что при двух основных модификациях исполнения статорной обмотки на разные числа полюсов реактивная мощность намагничивания при условии $B_l = \text{const}$ сохраняется постоянной.

1. Число витков на фазу в обоих исполнениях на разные числа полюсов W_{ph1} и W_{ph2} относятся друг к другу, как

$$\frac{W_{ph1}}{W_{ph2}} = \frac{1}{k}.$$

Из дальнейшего будет видно, что при этом питание двигателя в обоих исполнениях для сохранения постоянства B_l должно производиться от одного значения напряжения.

При последовательном соединении витков в фазе получим, что число витков на полюс W_{p1} и W_{p2} должны быть равны друг другу, так как $W_{ph1} = p_1 W_{p1}$ и $W_{ph2} = p_2 W_{p2}$.

Тогда фазовые напряжения

$$E_{ph1} = c W_{ph1} \Phi_1 = c W_{p1} p_1 \Phi_1$$

и

$$E_{ph2} = c W_{ph2} \Phi_2 = c W_{p2} p_2 \Phi_2$$

равны друг другу:

$$E_{ph1} = E_{ph2}, \quad (2)$$

так как

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{B_l \tau_1 l}{B_l \tau_2 l} = \frac{p_2}{p_1}$$

и

$$\frac{E_{ph1}}{E_{ph2}} = \frac{W_{p1}}{W_{p2}} = 1.$$

Здесь с индексами 1 и 2, относящимися к различным исполнениям, приведены: Φ — поток (на один полюс), τ — полюсное деление, l — длина активного железа двигателя.

Ампервитки намагничивания на полюс $(AW)_{p1}$ и $(AW)_{p2}$ равны друг другу при $B_l = \text{const}$.

$$(AW)_{p1} = I_{ph1} W_{p1} = (AW)_{p2} = I_{ph2} W_{p2},$$

где I_{ph1} и I_{ph2} — токи намагничивания.

Таким образом при последовательном соединении витков в фазе токи намагничивания в обоих исполнениях равны друг другу:

$$I_{ul1} = I_{ul2}. \quad (3)$$

Полные же ампервитки намагничивания $(AW)_{ph1}$ и $(AW)_{ph2}$ на всю машину относятся друг другу как $\frac{1}{k}$.

$$\frac{(AW)_{ph1}}{(AW)_{ph2}} = \frac{\rho_1 (AW)_{pl}}{\rho_2 (AW)_{pl}} = \frac{1}{k}.$$

Из равенства (2) и (3) непосредственно следует постоянство реактивных мощностей намагничивания в обоих исполнениях асинхронного двигателя при постоянстве индукции в зазоре B_l

$$mE_{ph1} I_{ul1} = mE_{ph2} I_{ul2}. \quad (4)$$

Таким образом, в то время как активные мощности двигателя при исполнении его на разные числа полюсов с постоянством AS и B_l изменяются приблизительно прямо пропорционально асинхронной скорости, реактивная мощность намагничивания сохраняется неизменной. Предполагая потребление двигателем только указанной реактивной мощности, получим наглядное графическое изображение изменения коэффициента мощности асинхронного двигателя при изменении синхронной скорости вращения, приведенное на рис. 1.

2. Числа витков на фазу в обоих исполнениях равны друг другу:

$$W_{ph1} = W_{ph2}.$$

При последовательном соединении витков в фазе и числах витков на полюс W_{p1} и W_{p2}

$$W_{ph1} = \rho_1 W_{p1} \text{ и } W_{ph2} = \rho_2 W_{p2}$$

и

$$\frac{W_{p1}}{W_{p2}} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = k.$$

Тогда фазовые напряжения E_{ph1} и E_{ph2} по предыдущему

$$\frac{E_{ph1}}{E_{ph2}} = \frac{W_{p1}}{W_{p2}} = k$$

и

$$E_{ph1} = k E_{ph2}. \quad (2')$$

При равенстве ампервитков намагничивания на полюс, при последовательном соединении витков в фазах, токи намагничивания в обоих исполнениях I_{ul1} и I_{ul2} относятся как

$$\frac{I_{ul1}}{I_{ul2}} = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{k}$$

и

$$I_{ul1} = \frac{1}{k} I_{ul2}. \quad (3')$$

Полные же ампервитки немагничивания на всю машину при $W_{ph1} = W_{ph2}$ относятся как

$$\frac{(AW)_{ph1}}{(AW)_{ph2}} = \frac{1}{k}.$$

Из равенства (2') и (3') непосредственно следует постоянство реактивных мощностей намагничивания в обоих исполнениях, и для этого случая

$$mE_{ph1} I_{ul1} = mE_{ph2} I_{ul2}. \quad (4')$$

Тот же результат получается, если при изменении числа полюсов сохранять постоянство числа витков на полюс ($W_{p1} = W_{p2}$) и постоянство числа последовательно соединенных витков в фазе W_{ph1} и W_{ph2} путем перехода на соответственное число параллельных групп в фазе. При $B = \text{const}$ намагничивающие ампервитки и токи на полюс будут сохраняться постоянными, и полные фазовые намагничивающие токи в обоих исполнениях будут прямо пропорциональны изменению числа полюсов; э. д. с. силы, однако, будут изменяться прямо пропорционально полюсному делению, т. е. обратно пропорционально числу полюсов. Поэтому намагничи-

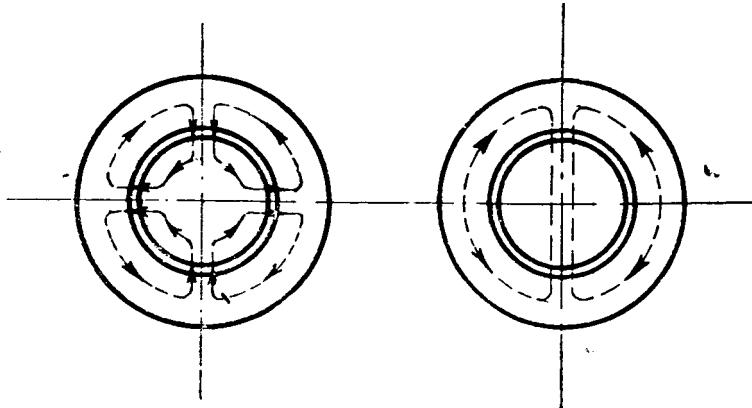


Рис. 2. Магнитные потоки асинхронной машины при исполнении на разные числа полюсов

вающая мощность в обоих исполнениях попрежнему будет постоянна. Очевидно, что и при любом исполнении обмоток также будет сохраняться постоянство намагничивающей мощности при постоянстве B_l .

III

Впервые заинтересовавшись зависимостью $cos\phi$ от скорости вращения при расчетах асинхронных двигателей, автор, исходя из легко подмечаемого возрастания с числом полюсов числа пересечений магнитным потоком воздушного зазора (рис. 2), еще несколько лет тому назад объяснил себе эту зависимость вышеуказанным образом. Постоянство электрической мощности намагничивания устанавливалось, таким образом, обычными методами расчета. Попутно при этом устанавливались соотношения между ампервитками намагничивания, токами и пр.

Однако общее доказательство постоянства электрической намагничивающей мощности получается более простым и быстрым, если исходить непосредственно из энергии магнитного поля в воздушном зазоре³⁾.

Действительно, энергия магнитного поля A в объеме междужелезного пространства Q , образуемого зазором размера δ при длине активного железа l в предположении идеально синусоидального распределения поля B_x вдоль по окружности: $(B_x = B_{max} \sin \frac{\pi}{\tau} x)$:

$$A = \int_0^{2\pi} \frac{B_x^2}{8\pi} l \delta dx = \frac{l \delta}{8\pi} B_{max}^2 \int_0^{2\pi} \sin^2 \frac{\pi}{\tau} x dx = \\ = \frac{\rho \tau l \delta}{8\pi} B_{max}^2 = \frac{Q}{16\pi} B_{max}^2.$$

Таким образом энергия A не зависит от числа полюсов и при постоянстве объема междужелезного пространства зависит только от максимальной индукции. Постоянство же энергии магнитного поля непосредственно определяет постоянство соответствующей реактивной электрической мощности.

Приложение 1

Пропорциональность между активными мощностями и скоростью вращения является несколько условной. Правильнее говорить о пропорциональности между скоростью и полной мощностью в киловольтамперах, это следует хотя бы из постоянства машины постоянной при постоянстве AS и B_l ,

$$\frac{D^2 ln}{P_{[kVA]}} = \frac{9 \cdot 10^{11}}{AS \cdot B_l}.$$

³⁾ Указание на это, равно как ряд других ценных замечаний, были безусловно сделаны инж. В. Т. Касьяновым, за что автор выражает ему свою искреннюю признательность.

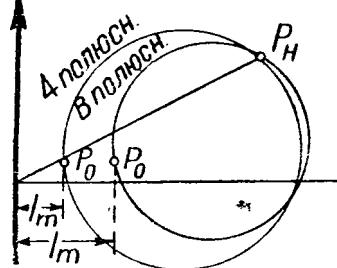


Рис. 3. Упрощенные круговые диаграммы асинхронной машины при исполнении на разные числа полюсов по Видмару

Пропорциональность между активными мощностями и скоростью вращения

$$\frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \frac{n_1}{n_2}$$

возможна при $M = \text{const}$.

Постоянство M при $B_t = \text{const}$ обозначает постоянство вторичных роторных ампервитков, так как

$$M = c m_{\text{ром}} I_{\text{ром}} W_{ph \text{ ром}} p \Phi = \\ = c m_{\text{ром}} I_{\text{ром}} W_{ph \text{ ром}} \alpha_l \frac{\pi D}{2} l B_t.$$

Постоянство вторичных ампервитков ротора при заданном постоянстве первичных ампервитков статора AS возможно лишь при постоянстве реактивных ампервитков статора.

Как показано выше, намагничивающие ампервитки (но не мощность) при исполнении машины на разные числа полюсов и принятых допущениях не сохраняют постоянства. Поэтому не может быть сохранено и постоянство активной составляющей AS , а следовательно, и пропорциональность

$$\frac{P_{w1}}{P_{w2}} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Однако допущением пропорциональности мы не делаем какой-либо принципиальной и существенной ошибки.

Приложение 2

Простейший путь физического представления сущности рассматриваемого явления в увеличении с числом полюсов числа пересечений воздушного зазора магнитным потоком (рис. 2) и соответствующем возрастании намагничивающего тока, не будучи доведенным логически до конца, может привести к неправильному представлению об изменении с числом полюсов всей намагничивающей мощности (при $B_t = \text{const}$).

В этом отношении несколько страдает, правда, исключительно упрощенное объяснение М. Видмара (стр. 128—129, § 58 цитированной книги в русском переводе). Указывая на разные намагничивающие токи в исполнениях на разные числа полюсов, М. Видмар не поясняет того, что это получается только в определенном частном случае (т. е. когда $W_{ph1} = W_{ph2}$; см. выше). Отсутствие указания на то, что круговые диаграммы (рис. 3, соответствующий рис. 128 книги Видмара) даны для двух различных напряжений (т. е.; что при четырехполюсном исполнении напряжение вдвое больше, чем при восьмиполюсном, $E_4 = 2E_8$), может привести к ложному заключению об изменении полной намагничивающей мощности с числом полюсов. Между тем, именно из этих диаграмм при учете разности напряжений легко устанавливается постоянство намагничивающей мощности.

Кроме того, на тех же диаграммах рис. 128 в книге Видмара можно отметить неточность, допущенную при изображении постоянства тока короткого замыкания в обоих исполнениях.

Действительно, постоянство $I_{k4} = I_{k8}$ возможно тогда, если $X_{k4} = 2X_{k8}$, так как

$$I_{k4} = \frac{E_4}{X_{k4}} = I_{k8} = \frac{E_8}{X_{k8}} = \frac{E_4}{2X_{k8}}.$$

При постоянстве последовательно соединенных фаз витков это возможно только в том случае, если реактивные сопротивления практически полностью определяются только сцеплениями потоков рассеяния лобовых частей. Ибо тогда с известным приближением, реактивное сопротивление будет меняться пропорционально длине полюсной дуги, т. е. обратно пропорционально числу полюсов.

На самом деле проводимость лобовых частей совсем не так значительна по сравнению с проводимостью пазов и между головками в машинах нормальной быстроходности, и в особенности с американской обмоткой. Скорее можно не считаться с изменением суммарной проводимости при изменении числа полюсов, т. е. считать $X_{k4} = X_{k8}$ (при $W_{hp1} = W_{hp2}$). А тогда утверждение постоянства тока короткого замыкания (на рис. 128) является неправильным.

Эти недостатки объяснения тем досаднее, что несколькими строками ниже, переходя к объяснению к. п. д., Видмар как раз указывает, что изменение активных мощностей обратно пропорционально числу полюсов, от чего остается один шаг до общего объяснения изменения $\cos \phi$ с числом полюсов.

Приложение 3

Весьма показательным для определения влияния на коэффициент мощности двигателей тока холостого хода (т. е. практически намагничивающего тока) является за-

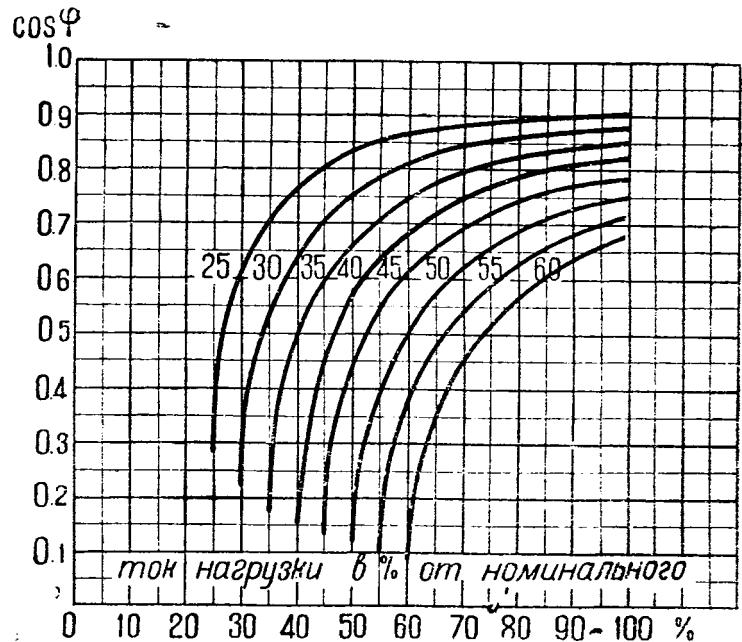


Рис. 4. Кривые для упрощенного определения $\cos \phi$ — асинхронных двигателей при разных нагрузках для различных значений тока холостого хода (в процентах от тока полной нагрузки)

имствуюемый из проспекта фирмы Maxlevy (о synasyn'ах) график рис. 4. Здесь даны кривые зависимости коэффициента мощности от полного тока для двигателей с восемью различными значениями тока холостого хода (от 25 до 60% полного тока номинальной нагрузки машины).

⁴⁾ Здесь индексами 4 и 8 обозначены токи сопротивления и напряжения, соответствующие четырех- и восьмиполюсному исполнению машины.

ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Применение принципов теории вероятностей к электрическому расчету тяговых сетей¹⁾

Инж. В. Е. Розенфельд
Москва, МЭИ

Электрический расчет тяговых сетей представляет собой значительно большие трудности, чем расчет сетей промышленных или осветительных, благодаря не-прерывному изменению как величины, так и месторасположения нагрузок. Эти нагрузки, являющиеся токами, потребляемыми движущимися по линии поездами электрической железной дороги, изменяются по весьма сложному, не поддающемуся непосредственно математическому выражению, закону, зависящему от характеристик подвижного состава, профиля пути, эксплуатационного графика движения и ряда других факторов.

Вследствие этого при проектировании тяговой сети приходится либо производить все расчеты для целого ряда моментов при различных месторасположениях и нагрузках движущихся по принятому на данной дороге графику поездов и строить кривые изменения интересующих нас величин в зависимости от времени, либо же, задавшись каким-нибудь законом изменения нагрузок во времени и пространстве, определить эти же величины аналитически.

Однако нагрузки тяговых сетей настолько зависят от целого ряда в той или иной степени случайных факторов, предусмотреть которые заранее практически не представляется возможным, что как тот, так и другой метод, основанный на принятии вполне определенного режима работы дороги (графика движения в первом случае и закона изменения нагрузок — во втором), в большинстве случаев не может дать достаточно надежных результатов, в особенности на дорогах, не имеющих точно выполняемого графика движения.

Поэтому во многих случаях было бы более правильно исходить из того положения, что в характере изменения нагрузок тяговой сети отсутствует какая бы то ни было закономерность, и применить методы теории вероятностей для определения интересующих нас величин нагрузок, падений напряжения и потерь энергии.

Идея применения теории вероятностей к расчету тяговых сетей возникла уже сравнительно давно и нашла себе отражение в работах проф. Вульфа и инж. Зильберталя и Костромитина, в которых разбирались преимущественно вопросы определения максимальных значений нагрузок и падений напряжения и затрагивался частично вопрос о потерях мощности в различных элементах тяговой сети.

Настоящая работа представляет собой попытку определения наиболее важных для проектирования тяговых сетей средних величин падений напряжения и потерь мощности, пользуясь методом теории вероятностей и исходя из предположения абсолютно беспорядочного движения, при котором в любой момент каждый поезд может находиться в любом пункте рассматриваемого участка сети и потреблять любой ток в пределах потребляемых поездами данного типа токов. При таких условиях средними значениями рассматриваемых нами величин являются, очевидно, их математи-

ческие ожидания (которые мы будем иногда в дальнейшем сокращенно обозначать через МО).

При этом для упрощения задачи мы, однако, примем, что по рассматриваемому нами участку сети движутся однотипные поезда с одинаковыми электрическими нагрузками. Это допущение может быть вполне оправдано при не слишком сильно разнившихся весах работающих на данной линии поездов и при не очень тяжелом профиле, когда средние нагрузки поездов различных направлений мало отличаются друг от друга. Необходимо отметить, что в случае применения рекуперативного торможения, при котором токи поездов разных направлений отличаются не только по величине, но и по знаку, принятое нами упрощение совершенно недопустимо, и поэтому все полученные нами результаты будут неприменимы для расчета сетей электрических железных дорог с рекуперацией энергии на затяжных крутых уклонах.

Кроме того, нам придется принять в дальнейшем каждое положение поезда на линии равновероятным. Строго говоря, такое предположение верно лишь при равномерной скорости движения поездов; при переменной же скорости месторасположение поезда в каком-либо пункте тем вероятнее, чем меньше скорость при прохождении этого пункта. Однако учитывая, что за время движения поезда под током за исключением кратковременного периода пуска скорость меняется сравнительно мало и что скорость за время хода без тока не влияет непосредственно на результаты расчета сети, следует признать, что выводы, основанные на допущении равновероятности всех положений поездов, должны дать вполне достаточную для практических целей степень точности.

Исходя из этих предпосылок, в дальнейшем выводятся формулы, позволяющие непосредственно определить среднее значение падений напряжения и потерь энергии (которые мы в дальнейшем будем обозначать буквой C с различными индексами) для различных условий. Кроме того, будут выведены формулы для определения коэффициентов (обозначаемых нами далее буквой c), представляющих собой отношение интересующих нас при расчете сети величин, найденных на основе принципов теории вероятностей, к тем же величинам, определенным методом равномерно распределенной нагрузки. Так как этот метод основан на предположении равномерного распределения по линии средней арифметической нагрузки тяговой сети, то коэффициенты c будут, очевидно, характеризовать увеличение потерь и падений напряжения вследствие неравномерности тяговой нагрузки.

На основании всего вышеизложенного мы получаем следующую схему для расчета сети электрической железной дороги.

На участке линии, для которого производится расчет сети, находится одновременно некоторое количество n одинаковых поездов, которые распределены по участку любым образом (причем все положения поездов равновероятны) и каждый из которых может потреблять любой возможный для данного типа поездов ток. Вероятность t_i , того, что какой-либо поезд потребляет некоторый ток I_i , равна отношению времeni

1) Настоящая работа представляет собой расширенную и дополненную часть аспирантской диссертации, защищенной автором весной 1930 г. в Московском энергетическом институте.

нахождения поезда под этим током ко всему времени движения. При этом сумма произведений всех возможных значений токов одного поезда на соответствующие им вероятности или, другими словами, математическое ожидание величины тока будет, очевидно, равно среднему арифметическому току одного поезда (который мы обозначим через I), т. е.

$$\sum I_i f_i = I. \quad (1)$$

Точно также сумма произведений квадратов токов на соответствующие вероятности, представляющая собой математическое ожидание квадрата тока, должна быть равна квадрату среднего квадратичного тока одного поезда (I_s), т. е.

$$\sum I_i^2 f_i = I_s^2. \quad (2)$$

Задаваясь различными месторасположениями и нагрузками всех находящихся на линии поездов, мы можем вычислить соответствующие значения интересующих нас величин падений напряжения и потерь мощности и вероятности этих значений. Умножив мгновенные значения этих величин на их вероятности и суммируя все эти произведения, мы должны получить искомые математические ожидания рассматриваемых нами факторов. Коэффициенты f определяются как отношение полученных математических ожиданий к величинам, найденным методом равномерно распределенной нагрузки.

Рассмотрим теперь, с какими величинами нам придется иметь дело при проектировании сети электрической железной дороги.

Необходимость электрического расчета тяговых сетей вытекает из того, что от допущенного падения напряжения в различных элементах сети зависят следующие основные технические и экономические факторы:

- 1) скорость движения поездов;
- 2) величина блуждающих токов, ответвляющихся из рельсов в землю;
- 3) стоимость потерянной в сети энергии.

Скорость движения поездов зависит, главным образом, от среднего напряжения, подведенного к тяговым двигателям. Имеющие место в тяговых сетях кратковременные колебания напряжения сравнительно мало отражаются на средней скорости благодаря значительной инерции движущихся на линии поездов. Поэтому при расчете сети с точки зрения скорости необходимо определить среднее падение напряжения до токоприемника движущегося поезда, причем это падение напряжения должно быть определено, очевидно, лишь за период включения тяговых двигателей.

Кроме падения напряжения до токоприемника за время езды с включенными двигателями нас может интересовать также это же падение напряжения за все время работы поезда, так как оно определяет среднее напряжение, при котором работает часть электрооборудования подвижного состава, постоянно находящаяся под напряжением.

Величина блуждающих токов при прочих равных условиях зависит от максимального падения напряжения в рельсовой сети.

Имеющиеся нормы в отношении блуждающих токов ограничивают среднюю суточную величину падения напряжения в рельсовой сети, и следовательно, целью расчета сети с точки зрения блуждающих токов является определение среднего падения напряжения до точек токораздела на линиях, питаемых с нескольких сторон, и до конца линий при одностороннем питании.

Наконец, для подсчета стоимости потерянной энергии необходимо определить среднюю величину теряемой мощности или приведенную среднюю квадратичную нагрузку.

Таким образом электрический расчет тяговой сети производится для определения следующих величин:

- 1) среднего падения напряжения до токоприемника поезда за время движения под током;
- 2) среднего падения напряжения до токоприемника поезда за все время его работы;
- 3) среднего значения максимального падения напряжения в рельсовой сети;
- 4) средней потери мощности.

При определении этих четырех величин нами будут рассмотрены следующие наиболее характерные случаи:

- 1) питательные или отсасывающие фидеры с сосредоточенными на их концах нагрузками;
- 2) линии с односторонним питанием;
- 3) линии с двусторонним питанием.

Ниже дается методология вывода формул для определения падений напряжения и потерь для всех перечисленных случаев, причем окончательные результаты, полученные на основании этих выводов, сведены в табл. 1.

1. Среднее падение напряжения в отсасывающих или питательных фидерах

Рассмотрим фидер, служащий для питания какого-либо участка электрической железной дороги, на котором находится одновременно n поездов, потребляющих любой ток I_j каждый.

Падение напряжения в фидере при каком-либо расположении и нагрузках поездов будет равно

$$ZL \sum_{i=1}^{i=n} I_{ji},$$

где Z —полное сопротивление единицы длины фидера или участка линии ($\Omega \cdot \text{km}$); L —длина фидера или участка линии (km).

Среднее падение напряжения (C_1), очевидно, равно математическому ожиданию приведенной выше величины падения напряжения, т. е.

$$C_1 = MO \left(ZL \sum_{i=1}^{i=n} I_{ji} \right).$$

Так как МО суммы равно сумме математических ожиданий слагаемых, то

$$MO \left(ZL \sum_{i=1}^{i=n} I_{ji} \right) = ZL \sum_{i=1}^{i=n} [MO(I_{ji})].$$

Подставляя значение МО (I_{ji}) из формулы (1), получаем

$$C_1 = ZL \sum_{i=1}^{i=n} [MO(I_{ji})] = ZL \sum_{i=1}^{i=n} I = ZLI_n. \quad (3)$$

Падение напряжения в фидере при средней равномерно распределенной нагрузке также будет равно

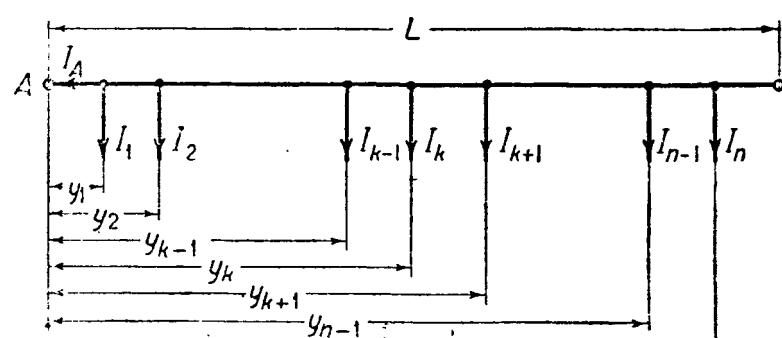


Рис. 1

ZLIn и, следовательно, отношение (c_1) действительного падения напряжения (или, вернее, математического ожидания его) к найденному методом средней равномерно распределенной нагрузки будет равно единице, т. е.

$$c_1 = 1. \quad (4)$$

2. Потеря мощности в питательном или обратном фидере²⁾

Рассмотрим ту же схему, что в предыдущем случае. Мгновенное значение потери мощности равно

$$RL \left(\sum_{i=1}^{i=n} I_{ji} \right)^2,$$

где R —ваттное сопротивление единицы длины фидера или участка линии ($\Omega/\text{км}$).

Средняя потеря мощности (C_2) равна математическому ожиданию приведенной в предыдущей формуле величины, т. е.

$$C_2 = MO \left[RL \left(\sum_{i=1}^{i=n} I_{ji} \right)^2 \right].$$

Согласно выводам из теоремы Бернулли МО квадрата суммы равно МО суммы в квадрате плюс сумма квадратичных отклонений, т. е.

$$\begin{aligned} MO \left[RL \left(\sum_{i=1}^{i=n} I_{ji} \right)^2 \right] &= \\ &= RL \left[\left(MO \sum_{i=1}^{i=n} I_{ji} \right)^2 + \sum_{i=1}^{i=n} (P_s - P) \right]. \end{aligned}$$

Обозначив величину $(I_s^2 - I^2)I^2$ через β и подставив значение МО суммы из формулы (3), получим

$$\begin{aligned} C_2 &= RL \left[MO \left(\sum_{i=1}^{i=n} I_{ji} \right)^2 \right] = \\ &= RL \left[\left(\sum_{i=1}^{i=n} I \right)^2 + \beta \sum_{i=1}^{i=n} P \right] = RLP(n^2 + \beta n). \quad (5) \end{aligned}$$

Потери при равномерно распределенной нагрузке равны $RLPn^2$ и, следовательно, отношение полученного нами математического ожидания к этой величине будет равно

$$c_2 = RLP(n^2 + \beta n) : RLPn^2 = 1 + \frac{\beta}{n}. \quad (6)$$

3. Среднее максимальное падение напряжения при одностороннем питании

Рассмотрим изображенный на рис. 1 участок линии длиной L km, питаемый с одного конца (A). Пусть на этом участке одновременно находятся n поездов, расположенных на участке любым образом и потребляющих любой ток I_i , каждый.

Обозначим расстояние каждого i -го поезда от пункта A через y_i и примем какое-либо определенное расположение поездов на участке, при котором

$$0 \leq y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_{k-1} \leq y_k \leq y_{k+1} \leq \dots \leq y_{n-1} \leq y_n \leq L.$$

При этом мгновенное значение падения напряжения до конца участка будет равно

$$\begin{aligned} ZL[(y_n - y_{n-1})I_{jn} + (y_{n-1} - y_{n-2})(I_{jn} + I_{j(n-1)}) + \\ + (y_{n-2} - y_{n-3})(I_{jn} + I_{j(n-1)} + I_{j(n-2)}) + \dots] \end{aligned}$$

2) Принципы приводимого здесь вывода даны инж. Зильберталем в работе „Колебание нагрузки на тяговых подстанциях и их влияние на расчет распределительной сети“ (Бюллетень Киевского отделения ВТАБ, № 12) и инж. Коштомитиным в статье „Применение теории вероятностей по выбору мощностей тяговых подстанций“. „Электричество“ № 2, 1927.

Математическое ожидание падения напряжения при заданном расположении поездов согласно выведенной для первого случая зависимости, по которой

$$\sum_{i=1}^{i=n} I_{ji} = In, \text{ будет равно}$$

$$\begin{aligned} ZL[(y_n - y_{n-1})I + (y_{n-1} - y_{n-2})2I + \\ + (y_{n-2} - y_{n-3})3I + \dots + y_n nI] = ZLI \sum_{i=1}^{i=n} y_i, \end{aligned}$$

т. е. мы имеем такое же падение напряжения, какое получили бы в случае, если бы каждый поезд потреблял все время одинаковый ток I , равный среднему арифметическому току каждого поезда. Это положение будет верно не только для рассматриваемого нами случая, но и для всех случаев определения среднего падения напряжения, так как во все формулы для определения падения напряжения токи поездов входят в первой степени. Поэтому в дальнейшем при определении математического ожидания падения напряжения (но не потерять мощности) мы будем принимать, что каждый поезд потребляет постоянный одинаковый для всех поездов ток, равный среднему арифметическому току одного поезда. При этом, мы, правда, не учтываем того, что средние токи в отдельных частях нашего участка неодинаковы, но учет этого обстоятельства настолько усложнил бы расчет, что сделал бы невозможным аналитическое решение рассматриваемой нами задачи.

Вероятность принятого нами расположения поездов в определенных пунктах на расстояниях y_1, y_2, \dots, y_n от пункта A согласно теореме о произведении вероятностей будет равна

$$\frac{dy_1 dy_2 \dots dy_n}{L^n}.$$

Так как падение напряжения, равное $ZLI \sum_{i=1}^{i=n} y_i$, зависит только от расположения, но не от порядка поездов, то такое же падение напряжения мы будем иметь при любой перестановке поездов. Возможное количество перестановок из n поездов, как известно, равно $n!$ и, следовательно, вероятность полученного нами падения напряжения будет равна

$$n! \frac{dy_1 dy_2 \dots dy_n}{L^n}$$

и математическое ожидание падения напряжения (C_3) определяется из выражения:

$$C_3 = \int \int \int \dots \int ZL \left(\sum_{i=1}^{i=n} y_i \right) n! \frac{dy_1 dy_2 \dots dy_n}{L^n}$$

или

$$C_3 = \frac{ZIn!}{L^n} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_{k+1}} dy_k \dots \int_0^{y_2} dy_1 \sum_{i=1}^{i=n} y_i.$$

Взятые нами в этом выражении пределы интегрирования вытекают из принятого нами распределения поездов.

Рассмотрим интеграл

$$\int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_2} dy_1 (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n).$$

Произведя первое интегрирование, получим под знаком интеграла следующее выражение:

$$\frac{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2}{2} + y_1 y_2 + \dots + y_n y_1.$$

Подставляя пределы $y_1 = y_2$ и $y_1 = 0$, получим

$$\frac{y_2^2}{2} + y_2^2 + y_3 y_2 + y_4 y_2 + \dots + y_n y_2.$$

Второе интегрирование даст выражение

$$\frac{y_2^3}{2 \cdot 3} + \frac{y_2^3}{1 \cdot 3} + \frac{y_3 y_2^2}{1 \cdot 2} + \frac{y_4 y_2^2}{1 \cdot 2} + \dots + \frac{y_n y_2^2}{1 \cdot 2}.$$

Подставляя пределы $y_2 = y_3$ и $y_2 = 0$, получим

$$\frac{y_3^3}{2 \cdot 3} + \frac{y_3^3}{1 \cdot 3} + \frac{y_3^3}{1 \cdot 2} + \frac{y_4 y_3^2}{1 \cdot 2} + \dots + \frac{y_n y_3^2}{1 \cdot 2}.$$

Произведя последовательно n интегрирований и имея в виду, что пределом для y_n являются L и 0, получим следующие n членов:

$$\begin{aligned} & \frac{L^{n+1}}{(n+1)!} + \frac{L^{n+1} \cdot 2}{(n+1)!} + \frac{L^{n+1} \cdot 3}{(n+1)!} + \dots + \frac{L^{n+1} \cdot n}{(n+1)!} = \\ & = \frac{L^{n+1}}{(n+1)!} \sum_{i=1}^{i=n} i = \frac{L^{n+1}}{2(n-1)!}. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставляя полученное значение интеграла в выражение для математического ожидания падения напряжения получим:

$$C_3 = \frac{ZI n!}{L^n} \cdot \frac{L^{n+1}}{2(n-1)!} = \frac{ZLIn}{2}. \quad (8)$$

Падение напряжения до конца линии при средней арифметической равномерно распределенной нагрузке будет равно $ZLIn/2$, и следовательно, отношение полученного нами математического ожидания к этой величине будет равно единице, т. е.

$$c_3 = 1. \quad (9)$$

4. Среднее падение напряжения до токоприемника движущегося поезда за все время его работы при одностороннем питании

Рассмотрим ту же схему, что и в предыдущем случае, т. е. участок, питаемый с одного конца, на котором находится n расположенных в любом пункте участка поездов, потребляющих ток I_j каждый.

Примем, как и в прошлом случае, какое-либо определенное расположение поездов, характеризуемое неравенством

$$0 \leq y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_{k-1} \leq y_k \leq y_{k+1} \leq \dots \leq y_{n-1} y_n \leq L.$$

Определим падение напряжение до k -го поезда, находящегося на расстоянии y_k от пункта A . При этом слева от рассматриваемого поезда будет находиться $k-1$ поезд, а справа — $n-k$ поездов.

Мгновенное падение напряжения до поезда k будет равно

$$ZI \left[\sum_{i=1}^{i=k} y_i + (n-k) y_k \right].$$

Вероятность такого падения напряжения, как и в предыдущем случае, будет равна

$$\frac{dy_1 dy_2 \dots dy_k \dots dy_n}{L^n}.$$

Рассматриваемый поезд может быть первым, вторым, $n-m$ и т. д., следовательно, k может меняться от 1 до n , причем вероятность каждого значения будет равна очевидно $1/n$.

Таким образом математическое ожидание падения напряжения до токоприемника за все время движения (C_4) определится следующим образом:

$$C_4 = \frac{ZI n!}{n L^n} \sum_{k=1}^{k=n} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_1} dy_1 \left[\sum_{i=1}^{i=k} y_i + (n-k) y_k \right].$$

Вологодская областная универсальная научная библиотека

Рассмотрим сначала первый интеграл:

$$\int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_1} dy_1 (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_k).$$

Произведя сначала последовательно k интегрирований и подставив пределы $y_k = y_{k+1}$ и $y_k = 0$, получим, как и в предыдущем случае, выражение

$$\frac{y_{k+1}^{k+1} k(k+1)}{2(k+1)!}.$$

Дальнейшее интегрирование дает следующие члены:

$$\frac{k(k+1)}{2(k+1)!} \cdot \frac{y_{k+2}^{k+2}}{k+2}; \quad \frac{k(k+1)}{2(k+1)!} \cdot \frac{y_{k+3}^{k+3}}{(k+2)(k+3)} \text{ и т. д.}$$

После n -го интегрирования, подставив пределы $y_n = L$ и $y_n = 0$, получим следующее значение всего интеграла:

$$\frac{k(k+1)}{2(n+1)!} L^{n+1}.$$

Рассмотрим теперь второй интеграл:

$$\int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_{k+1}} dy_k \dots \int_0^{y_2} dy_1 (n-k) y_k.$$

Произведя первые $k-1$ интегрирования и подставив пределы $y_{k-1} = y_k$ и $y_{k-1} = 0$, получим под интегралом

$$\frac{(n-k) y_k \cdot y_k^{k-1}}{(k-1)!} = \frac{(n-k) k \cdot y_k^k}{k!}.$$

Дальнейшее интегрирование будет каждый раз увеличивать на единицу степень при y_k и величину факториала.

Произведя все n интегрирований и подставив пределы, получим следующую величину второго интеграла

$$\frac{(n-k) k}{(n+1)!} L^{n+1}.$$

Подставляя полученные значения интегралов в формулу для математического ожидания, получим

$$\begin{aligned} C_4 &= \frac{ZI(n-1)!}{L^n} \sum_{k=1}^{k=n} \left[\frac{k(k+1)}{2(n+1)!} L^{n+1} + \frac{(n-k) k}{(n+1)!} L^{n+1} \right] = \\ &= \frac{ZLI}{2n(n+1)!} \sum_{k=1}^{k=n} [(2n+1)k - k^2] = ZLI \frac{2n+1}{6} \end{aligned} \quad (10)$$

При равномерно распределенной нагрузке среднее падение напряжения до токоприемника равно $ZLI/3$ максимального, т. е. $ZLI/3$.

Следовательно, искомый коэффициент c_4 для данного случая будет равен

$$c_4 = ZLI \frac{2n+1}{6} : ZLI \cdot \frac{1}{3} = 1 + \frac{1}{2n}. \quad (11)$$

5. Среднее падение напряжения до токоприемника за время движения под током при одностороннем питании

Для определения падения напряжения до токоприемника за время движений под током необходимо установить, чем это падение будет отличаться от падения напряжения за все время работы поезда.

Совершенно ясно, что МО токов всех поездов кроме k -го не зависит от того, находится ли этот поезд под током или нет. Поэтому все члены формулы МО падения напряжения, не зависящие от тока k -го поезда, будут в обоих случаях одинаковы. Падения

напряжения будут различаться лишь за счет тока k -го поезда, среднее значение которого за время езды под током, несомненно, не будет равно среднему значению за все время движения.

Поэтому МО падения напряжения при каком-либо определенном расположении поездов может быть выражено следующим образом:

$$ZI \left[\sum_{i=1}^{k-1} y_i + (n-k)y_k \right] + Z[\text{МО}(I_k)]y_k.$$

МО тока одного поезда за все время его работы равно среднему арифметическому току одного поезда, который мы обозначили ранее через I . Точно также МО за время езды под током будет равно среднему арифметическому току за соответствующее время. Этот ток будет, очевидно, во столько раз больше тока I , во сколько все время хода поезда больше времени хода под током. Поэтому если мы обозначим отношение всего времени ко времени хода под током через α , то МО величины тока за время движения под током будет равно $I\alpha$.

Подставив это значение МО (I_k) в предыдущую формулу, получим МО падения напряжения при данном расположении поездов:

$$\begin{aligned} & ZI \left[\sum_{i=1}^{k-1} y_i + (n-k)y_k \right] + ZI\alpha y_k = \\ & = ZI \left[\sum_{i=1}^k y_i + (n-k)y_k + (\alpha-1)y_k \right]. \end{aligned}$$

МО падения напряжения до токоприемника поезда за время движения под током (C_5) при всех возможных перемещениях поездов выразится согласно изложенному в предыдущем случае следующим образом:

$$\begin{aligned} C_5 = & \frac{ZI(n-1)!}{L^n} \sum_{k=1}^{n-1} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_{k+1}} dy_k \dots \\ & \dots \int_0^{y_2} dy_1 \left[\sum_{i=1}^k y_i + (n-k)y_k + (\alpha-1)y_k \right]. \end{aligned}$$

Решение этого интеграла было в основном разобрано в предыдущем случае; необходимо лишь прибавить к полученному там результату выражение

$$\begin{aligned} & \frac{ZI(n-1)!}{L^n} \sum_{k=1}^{n-1} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_2} dy_1 (\alpha-1)y_k = \\ & = \frac{ZI(n-1)!}{L^n} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{(\alpha-1) \cdot L^{n+1} \cdot k}{(n+1)!} = \frac{ZLI(\alpha-1)}{2}. \quad (12) \end{aligned}$$

Прибавляя это выражение к формуле (10), получим

$$C_5 = \frac{ZLI(2n+1)}{6} + \frac{ZLI(\alpha-1)}{2} = ZLI \frac{2n+3\alpha-2}{6}. \quad (13)$$

Коэффициент c_5 для этого случая равен

$$c_5 = ZLI \frac{2n+3\alpha-2}{6} : ZLI n \cdot \frac{1}{3} = 1 + \frac{3\alpha-2}{2n}. \quad (14)$$

Отношение падения напряжения до токоприемника за время хода под током к тому же падению за все время движения получится путем деления величины C_5 на C_4 , а именно:

$$\frac{C_5}{C_4} = ZLI \frac{2n+3\alpha-2}{6} : ZLI \frac{2n+1}{6} = \frac{2n+3\alpha-2}{2n+1} \quad (15)$$

6. Средняя потеря мощности при одностороннем питании

Определим для той же схемы, что и для случая 3, математическое ожидание потери мощности в линии.

При каком-либо распределении поездов на линии $0 \leq y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_{k-1} \leq y_k \leq y_{k+1} \leq \dots \leq y_{n-1} \leq y_n \leq L$, вероятность которого равна

$$\frac{dy_1 dy_2 \dots dy_k \dots dy_n}{L^n},$$

потеря мощности выразится формулой

$$R \sum_{i=1}^n \left[(y_i - y_{i-1}) \left(\sum_{j=1}^i I_j \right)^2 \right].$$

Так как МО $\left(\sum_{i=1}^n I_i \right)^2$ равно согласно формуле (5) $I^2 n^2 + I^2 n \beta$ то МО потери мощности при заданном расположении поездов будет равно:

$$\begin{aligned} R [(y_n - y_{n-1}) P^2 + (y_n - y_{n-1}) P \beta + (y_{n-1} - y_{n-2}) P \cdot 2 \beta + \\ + (y_{n-1} - y_{n-2}) P \cdot 2 \beta + \dots + (y_2 - y_1) P(n-1)^2 + \\ + (y_2 - y_1) P(n-1) \beta + y_1 P^2 + y_1 P \beta]. \end{aligned}$$

Раскрывая скобки и учитывая, что коэффициент при каждом члене ряда $y_{n-i}[i^2 - (i-1)^2] = y_{n-i}(2i+1)$ равен i -му члену ряда нечетных чисел, получим следующую величину потерь:

$$R P^2 \sum_{i=1}^n \left\{ y_{n-i} [2(n-i)+1] + \beta y_{n-i} \right\}.$$

Так как такие же потери мы будем иметь при любой перестановке всех n поездов, то вероятность таких потерь будет равна

$$\frac{n!}{L^n} \frac{dy_1 dy_2 \dots dy_k \dots dy_n}{L^n}$$

и математическое ожидание потерь C_6 будет выражаться следующим образом:

$$\begin{aligned} C_6 = & \frac{R P n!}{L^n} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_{k+1}} dy_k \dots \\ & \dots \int_0^{y_2} dy_1 \sum_{i=1}^n \left\{ y_{n-i} [2(n-i)+1] + \beta y_{n-i} \right\} \end{aligned}$$

Этот интеграл решается таким же образом, как и интеграл в случае 3. Необходимо лишь все члены первой части интеграла умножить на члены ряда нечетных чисел $-2(n-i)+1$, после чего получим следующее выражение для математического ожидания потерь:

$$C_6 = \frac{R P L^{n+1} n!}{L^n (n+1)!} \sum_{i=1}^n \left\{ [2(n-i)+1] i + \beta i \right\} =$$

$$= \frac{R L P^2}{n+1} \sum_{i=1}^n [(2n+1)i - 2i^2 + \beta i] =$$

$$= \frac{R L P}{n+1} \left[\frac{(2n+1)n(n+1)}{2} - \frac{2n(n+1)(2n+1)}{6} + \frac{\beta n(n+1)}{2} \right] = \\ = R L P \frac{2n^2 + n + 3\beta n}{6}. \quad (16)$$

Потери при равномерно распределенной нагрузке будут равны $R L P^2 n^2 / 3$ и, следовательно, искомый коэффициент c_6 для случая потерь на вылетной линии равен

$$c_6 = R L P \frac{2n^2 + n + 3\beta n}{6} : R L P^2 \frac{1}{3} = 1 + \frac{1 + 3\beta}{2n}. \quad (17)$$

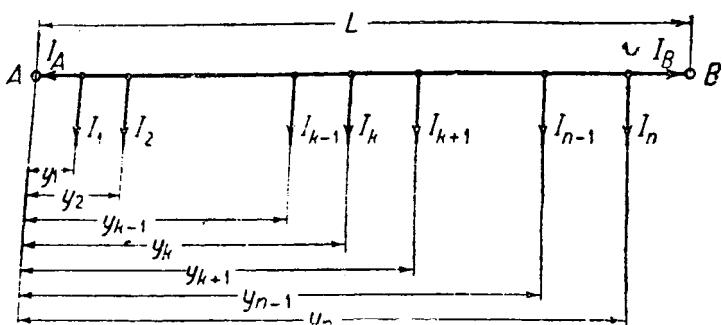


Рис. 2

7. Среднее падение напряжения до токораздела на линии, питаемой с двух сторон

Рассмотрим теперь ту же схему, что и в предыдущих случаях, но при питании линии с двух сторон в пунктах A и B (рис. 2).

Примем, как и в предыдущих случаях, какое-то определенное расположение поездов, при котором $0 \leq y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_{k-1} \leq y_k \leq y_{k+1} \leq \dots \leq y_{n-1} \leq y_n \leq L$.

МО падения напряжения до k -го поезда при заданном положении поездов будет равно

$$Z \left[I_A y_k - I \sum_{i=1}^{i=k} (y_k - y_i) \right],$$

где I_A — ток питательного пункта A . Подставляя значение,

$$I_A = n I - \frac{I}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i$$

получим следующее выражение для падения напряжения до k -го поезда:

$$\begin{aligned} Z \left[n I y_k - \frac{I y_k}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i - I \sum_{i=1}^{i=k} (y_k - y_i) \right] &= \\ &= Z I \left[y_k (n - k) - \frac{y_k}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i + \sum_{i=1}^{i=k} y_i \right]. \end{aligned}$$

Вероятность такого падения напряжения будет равна

$$n! \frac{dy_1 dy_2 \dots dy_k \dots dy_n}{L^n}.$$

Определим, при каких условиях падение напряжения до k -го поезда будет максимальным, т. е. токораздел будет находиться около этого поезда.

Согласно определению максимума какой-либо функции падение напряжения до k -го поезда будет наибольшим в том случае, если это падение напряжения e_k будет больше или равно падению напряжения около двух соседних поездов $(k-1)$ -го и $(k+1)$ -го, т. е. если соблюдены неравенства

$$\begin{aligned} e_k - e_{k+1} &\geq 0 \\ e_k - e_{k-1} &\geq 0. \end{aligned}$$

Подставляя значения e_{k-1} , e_k и e_{k+1} , получим следующие неравенства:

$$\begin{aligned} Z I \left\{ y_k (n - k) - \frac{y_k}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i + \sum_{i=1}^{i=k} y_i \right\} - \\ - \left[y_{k+1} (n - k - 1) - \frac{y_{k+1}}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i + \sum_{i=1}^{i=k+1} y_i \right] \geq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z I \left\{ y_k (n - k) - \frac{y_k}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i + \sum_{i=1}^{i=k} y_i \right\} - \\ - \left[y_{k-1} (n - k + 1) - \frac{y_{k-1}}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i + \sum_{i=1}^{i=k-1} y_i \right] \geq 0. \end{aligned}$$

Раскрыв скобки и произведя сокращения и приведения подобных членов, получим

$$\frac{y_{k+1} - y_k}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i - (y_{k+1} - y_k)(n - k) \geq 0$$

и

$$\frac{y_k - y_{k-1}}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i + (y_k - y_{k-1})(n - k + 1) \geq 0.$$

Учитывая, что при принятом нами расположении поездов любое y_{k-1} всегда больше y_k , мы можем переписать наши неравенства следующим образом:

$$-\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i - (n - k) \geq 0 \quad \text{и} \quad \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i - (n - k + 1) \leq 0,$$

откуда

$$L(n - k) \leq \sum_{i=1}^{i=n} y_i \leq L(n - k + 1). \quad (18)$$

Последнее неравенство и определяет те пределы, в которых токораздел будет находиться около k -го поезда.

Так как k может принимать любые целые значения от 1 до n и вероятность каждого значения равна $\frac{1}{n}$, то МО падения напряжения до k -го поезда равно

$$\begin{aligned} \frac{Z I (n - 1)!}{L^n} \sum_{k=1}^{k=n} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_{k+1}} dy_k \dots \\ \dots \int_0^{y_2} dy_1 \left[y_k (n - k) + \sum_{i=1}^{i=k} y_i - \frac{y_k}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Для того чтобы получить математическое ожидание падения напряжения до токораздела C_7 , необходимо взять этот интеграл для каждого k в пределах

$$\sum_{i=1}^{i=n} y_i = (n - k) L \div \sum_{i=1}^{i=n} y_i = (n - k + 1) L.$$

Так как решение этого интеграла в общем виде чрезвычайно затруднительно, то нами было произведено интегрирование для различных числовых значений числа поездов n . Все полученные решения полностью укладываются в формулу

$$C_7 = Z L I \frac{3n + 1}{24}, \quad (20)$$

которая, повидимому, и является решением этого интеграла.

При равномерно распределенной нагрузке и двустороннем питании падение напряжения до токораздела равно $\frac{3n + 1}{24}$, и следовательно, искомое отношение най-

денного математического ожидания к этому падению напряжения будет равно

$$c_7 = ILZ \frac{2n+1}{24} : ILZ \frac{n}{8} = 1 + \frac{1}{3n}. \quad (21)$$

8. Среднее падение напряжения до токоприемника движущегося поезда за все время его работы при двустороннем питании

Рассмотрим ту же систему, что и в предыдущем случае и определим для нее среднее падение напряжения до токоприемника.

Согласно формуле 19 математическое ожидание падения напряжений до токоприемника k -го поезда C_8 , учитывая возможность изменения k от 1 до n , может быть выражено, как и падение до токораздела, следующим образом:

$$C_8 = \frac{ZI(n-1)!}{L^n} \sum_{k=1}^{k=n} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_{k+1}} dy_k \dots \\ \dots \int_0^{y_1} dy_1 \left[y_k(n-k) + \sum_{i=1}^{i=k} y_i - \frac{y_k}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i \right].$$

Интеграл и суммы первых двух членов уже были определены нами в случае 4 при рассмотрении падения напряжения до токоприемника в случае одностороннего питания. Этот интеграл равен согласно формуле (10)

$$ZLI \frac{2n+1}{6}.$$

Таким образом остается лишь вычислить интеграл и суммы третьего члена, а именно

$$\frac{ZI(n-1)!}{L^n} \sum_{k=1}^{k=n} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_2} dy_1 \frac{y_k}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i.$$

Произведя $k-1$ интегрирований и подставив все пределы, получим под интегралом следующее выражение:

$$\frac{y_k}{L} \left[\frac{y_k^{k-1}}{(k-1)!} \sum_{i=1}^{i=k-1} i + \frac{y_k^{k-1}}{(k-1)!} \sum_{i=k}^{i=n} y_i \right] = \\ = \frac{1}{L} \left[\frac{y_k^{k+1}}{(k+1)!} \frac{(k-1)k(k+1)}{2} + \frac{y_k^k}{k!} k \sum_{i=k}^{i=n} y_i \right].$$

Следующее интегрирование дает

$$\frac{1}{L} \left[\frac{y_k^{k+2}}{(k+2)!} \frac{(k-1)k(k+1)}{2} + \frac{y_k^{k+1}}{(k+1)!} k \sum_{i=k}^{i=n} y_i \right].$$

Производя дальнейшее интегрирование до n -го включительно и подставляя последние пределы $y_n=L$ и $y_n=0$, получим следующее выражение для искомого интеграла и суммы:

$$\frac{ZI(n-1)!}{L^n} \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{L} \cdot \frac{L^{n+2}}{(n+2)!} \left[\frac{(k-1)k(k+1)}{2} + k \sum_{i=k+1}^{i=n+1} i \right] = \\ = ZLI \sum_{k=1}^{k=n} \left[\frac{(k-1)k(k+1) + k(n+1)(n+2) - k^2(k+1)}{2n(n+1)(n+2)} \right] = \\ = ZLI \sum_{k=1}^{k=n} \left[\frac{(n+1)(n+2)k - k^2 - k}{2n(n+1)(n+2)} \right] = ZLI \cdot \frac{3n+1}{12}.$$

Подставляя значение всех интегралов в выражение для математического ожидания падения напряжения, получим

$$C_8 = ZLI \frac{2n+1}{6} - ZLI \frac{3n+1}{12} = ZLI \frac{n+1}{12}. \quad (22)$$

При равномерно распределенной нагрузке и двустороннем питании среднее падение напряжения равно $\frac{ZLI}{12}$ и, следовательно, коэффициент c_8 для случая падения напряжения до токоприемника за все время работы поезда равен

$$c_8 = ZLI \frac{n+1}{12} : ZLI \frac{n}{12} = 1 + \frac{1}{n}. \quad (23)$$

9. Среднее падение напряжения до токоприемника поезда за время хода под током при двустороннем питании

Как нами уже было установлено, при разборе случая 5, МО падения напряжения за время езды под током отличается от соответствующего МО за все время движения лишь тем, что среднее значение тока k -го поезда равно не I , а $I\alpha$.

Подставляя это значение тока k -го поезда в формулу (19), получим МО падения напряжения до токоприемника за время хода под током — C_9 :

$$C_9 = \frac{ZI(n-1)!}{L^n} \sum_{k=1}^{k=n} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_{k+1}} dy_k \dots \int_0^{y_2} dy_1 \times \\ \times \left[\sum_{i=1}^{i=k} y_i + y_k(n-k) - \frac{y_k}{L} \sum_{i=1}^{i=n} y_i + y_k(\alpha-1) - \frac{y_k^2}{L} (\alpha-1) \right].$$

Интеграл и сумма первых трех членов определены нами в предыдущем случае [формула (22)], а четвертого — в случае 5 [формула (12)].

Таким образом для определения искомого МО остается определить значение пятого члена, а именно

$$\frac{ZI(n-1)!}{L^{n+1}} \sum_{k=1}^{k=n} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_2} dy_1 (\alpha-1) \frac{y_k^2}{L}.$$

Первые $k-1$ интегрирований дадут выражение

$$\frac{ZI(n-1)!(\alpha-1)}{L^{n+1}} \sum_{k=1}^{k=n} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_2} dy_1 \frac{y_k^{k-1}(k+1)}{(k+1)!}.$$

Дальнейшее интегрирование будет каждый раз повышать на единицу степень при y_i и величину факториала.

Произведя n интегрирований, получим выражение

$$\frac{ZLI(n-1)!(\alpha-1)}{L^{n+1}} \frac{L^{n+2}}{(n+2)!} \sum_{k=1}^{k=n} k(k+1) = \\ = \frac{ZLI(\alpha-1)}{n(n+1)(n+2)} \left[\frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + \frac{n(n+1)}{2} \right] = \\ = \frac{ZLI(\alpha-1)}{3}. \quad (24)$$

Складывая значения отдельных слагающих выражения для C_9 , т. е. выражения, полученные в формулках (12), (22) и (24) получим

$$C_9 = ZLI \frac{n+1}{12} + ZLI \frac{\alpha-1}{2} - ZLI \cdot \frac{\alpha-1}{3} = \\ = ZLI \frac{n+2\alpha-1}{12}. \quad (25)$$

Коэффициент c_9 для этого случая будет равен

$$c_9 = ZLI \frac{n+2\alpha-1}{12} : ZLI \frac{n}{12} = 1 + \frac{2\alpha-1}{n}. \quad (26)$$

Отношение падения напряжения до токоприемника за время хода под током к тому же падению за все время работы поезда определяется из выражения

$$\frac{C_9}{C_8} = ZLI \frac{n+2\alpha-1}{12} : ZLI \frac{n+1}{12} = \frac{n+2\alpha-1}{n+1}. \quad (27)$$

10. Потеря мощности при двустороннем питании

Для определения потерь мощности установим величину тока, текущего по какому-либо участку между поездами k и $k+1$.

Этот ток равен алгебраической сумме токов, текущих от первых k поездов к пункту B и остальных $n-k$ к пункту A и будет равен, следовательно,

$$\sum_{i=1}^{i=k} \frac{I_{ji} y_i}{L} + \sum_{i=k+1}^{i=n} \left[-I_{ji} \frac{(L-y_i)}{L} \right].$$

Мгновенное значение потери мощности на участке от k до $k+1$ определяется выражением

$$R(y_{k+1} - y_k) \left[\sum_{i=1}^{i=n} I_{ji} \frac{y_i}{L} + \sum_{i=k+1}^{i=n} \left(-I_{ji} \frac{(L-y_i)}{L} \right) \right]^2.$$

Согласно выведенной выше формуле (4) МО потерь мощности при данном расположении поездов может быть выражено следующим образом:

$$\begin{aligned} & R(y_{k+1} - y_k) \left\{ \left[\sum_{i=1}^{i=k} I \frac{y_i}{L} + \sum_{i=k+1}^{i=n} \left(-I \frac{(L-y_i)}{L} \right) \right]^2 + \right. \\ & + \beta \left[\sum_{i=1}^{i=k} \left(I \frac{y_i}{L} \right)^2 + \sum_{i=k+1}^{i=n} \left(-I \frac{(L-y_i)}{L} \right)^2 \right] \} = \\ & = \frac{R^2}{L^2} (y_{k+1} - y_k) \left\{ \left[\sum_{i=1}^{i=k} y_i - \sum_{i=k+1}^{i=n} (L-y_i) \right]^2 + \right. \\ & + \beta \left[\sum_{i=1}^{i=k} y_i^2 + \sum_{i=k+1}^{i=n} (L-y_i)^2 \right] \} = \\ & = \frac{R^2}{L^2} (y_{k+1} - y_k) \left\{ \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i + L(n-k) \right]^2 + \right. \\ & \left. + \beta \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 + L \sum_{i=k+1}^{i=n} (L-2y_i) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Потери на всем участке между точками питания определяются как сумма потерь между всеми поездами, а именно

$$\begin{aligned} & \frac{R^2}{L^2} \sum_{k=1}^{k=n} (y_{k+1} - y_k) \left\{ \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i + L(n-k) \right]^2 + \right. \\ & + \beta \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 + L \sum_{i=k+1}^{i=n} (L-2y_i) \right] \} . \end{aligned}$$

Вероятность таких потерь будет равна

$$n! \frac{dy_1 dy_2 \dots dy_{k-1} dy_k \dots dy_n}{L^n},$$

и следовательно, МО потерь (C_{10}) при всех возможных перемещениях поездов выразится следующим образом:

$$\begin{aligned} C_{10} &= \frac{R^2 n!}{L^{n+2}} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_1} dy_1 \sum_{k=1}^{k=n} (y_{k+1} - y_k) \times \\ & \times \left\{ \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i + L(n-k) \right]^2 + \beta \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 + L \sum_{i=k+1}^{i=n} (L-2y_i) \right] \right\}. \quad (28) \end{aligned}$$

Для упрощения решения этого интеграла воспользуемся тем, что при неизменном токе каждого поезда т. е. при $\beta=0$, коэффициент c для случая потерь должен быть равен этому же коэффициенту для случая падения напряжения до токоприемника за все время движений. Подставив в выведенное выражение (28) $\beta=0$ и притравив его потерям мощности при равномерно распределенной нагрузке и при двустороннем питании (равным $\frac{RLPn^2}{12}$), умноженным на коэффициент c_8 , получим

$$\begin{aligned} & \frac{RPn!}{L^{n+2}} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_{k+1}} dy_k \dots \\ & \dots \int_0^{y_2} dy_1 \sum_{k=1}^{k=n} (y_{k+1} - y_k) \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i + L(n-k) \right]^2 = \frac{RLPn^3}{12} \left(1 + \frac{1}{n} \right). \end{aligned}$$

Таким образом нам остается решить лишь интеграл.

$$\begin{aligned} & \frac{RPn! \beta}{L^{n+2}} \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_{k-1}} dy_k \dots \\ & \dots \int_0^{y_2} dy_1 \sum_{k=1}^{k=n} (y_{k+1} - y_k) \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 + L \sum_{i=k+1}^{i=n} (L-2y_i) \right]. \end{aligned}$$

Просуммируем сначала подинтегральное выражение

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{k=n} (y_{k+1} - y_k) \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 + L \sum_{i=k+1}^{i=n} (L-2y_i) \right] = \\ & = L \sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 - y_n \sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 + y_n \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 + L \sum_{i=k+1}^{i=n} (L-2y_i) \right] - \\ & - y_{n-1} \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 + L \sum_{i=k+1}^{i=n} (L-2y_i) \right] + \dots \\ & \dots + y_1 \left[\sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 + L \sum_{i=k+1}^{i=n} (L-2y_i) \right] = \\ & = L \sum_{i=1}^{i=n} y_i^2 + L \sum_{i=1}^{i=n} y_i (L-2y_i) = L^2 \sum_{i=1}^{i=n} y_i - L \sum_{i=1}^{i=n} y_i^2. \end{aligned}$$

Таким образом определение МО сводится к решению двух интегралов:

$$\int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_2} dy_1 (y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n)$$

$$\text{и } \int_0^L dy_n \int_0^{y_n} dy_{n-1} \dots \int_0^{y_2} dy_1 (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2).$$

Первый из этих интегралов был нами решен при определении падения напряжения до конца вылетной линии [формула (7)] и равен $\frac{L^{n+1}}{2(n-1)!}$.

Рассмотрим теперь второй интеграл. Производя первое интегрирование, получим под знаком интеграла

$$\frac{y_1^3}{3} + y_2^2 y_1 + y_3^2 y_1 + y_4^2 y_1 + \dots + y_n^2 y_1.$$

Подставляя пределы, получим

$$\frac{y_1^3}{3} + y_2^3 + y_3^3 + y_4^3 + \dots + y_n^3.$$

Второе интегрирование дает

$$\frac{y_2^4}{3 \cdot 4} + \frac{y_3^4}{1 \cdot 4} + \frac{y_2^2 y_3^2}{1 \cdot 2} + \frac{y_4^2 y_2^2}{1 \cdot 2} + \dots + \frac{y_n^2 y_2^2}{1 \cdot 2}.$$

Подставив пределы и проинтегрировав в третий раз, имеем

$$\frac{y_3^5}{3 \cdot 4 \cdot 5} + \frac{y_3^5}{1 \cdot 4 \cdot 5} + \frac{y_3^5}{1 \cdot 2 \cdot 5} + \frac{y_4^2 \cdot y_3^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \dots + \frac{y_n^2 y_3^3}{1 \cdot 2 \cdot 3}.$$

Произведя n последовательных интегрирований, получим, очевидно, следующее выражение:

$$\begin{aligned} \frac{L^{n+2}}{(n+2)!} [1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + \dots + n(n+1)] &= \frac{L^{n+2}}{(n+2)!} \sum_{i=1}^{i=n} i(i+1) = \\ &= \frac{L^{n+2}}{(n+2)!} \left[\frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + \frac{n(n+1)}{2} \right] = \frac{L^{n+2}}{3(n-1)!} \end{aligned}$$

Подставив значения всех интегралов в выражение для МО потерь, получим окончательно

$$\begin{aligned} C_{10} &= \frac{RLPn^2}{12} \left(1 + \frac{1}{n} \right) + \frac{RPn! \beta}{L^{n+2}} \left[\frac{L^2 \cdot L^{n+1}}{2(n-1)!} - \frac{L \cdot L^{n+2}}{3(n-1)!} \right] = \\ &= RLP \frac{n^2 + n + 2\beta n}{12}. \end{aligned} \quad (29)$$

Так как потери при равномерно распределенной нагрузке и двустороннем питании равны $\frac{RLPn^2}{12}$, то коэффициент c_{10} для этого случая будет равен

$$c_{10} = RLP \frac{n^2 + n + 2\beta n}{12} : RLP \frac{n^2}{12} = 1 + \frac{1 + 2\beta}{n}. \quad (30)$$

В табл. 1 сведены выведенные нами формулы как для величин падений напряжений и потерь, так и для коэффициентов c .

Интересно отметить следующие частные случаи, в которых особенно наглядно выявляется полное соответствие выведенных формул физической стороне явлений.

1. При бесконечно большом числе поездов ($n = \infty$) метод равномерно распределенной нагрузки должен дать абсолютно точные результаты, и все коэффициенты c обращаются в единицу.

2. В случае, если ток одного поезда неизменен за все время его работы (т. е. при $\beta = 0$ и $\alpha = 1$), коэффициенты c для падения напряжения до токоприемника за все время работы поезда, падения напряжения за время езды под током и потери мощности совпадают между собой.

3. В случае если ток одного поезда неизменен только за время езды под током (при этом $\beta = \alpha - 1$) коэфи-

Таблица 1

№ по пор. №	Наименование	Формулы для определения падения напряжения и потерь мощности	Отношение падений напряжения и потерь мощности, выведенных методом теории вероятностей, тем же величинам, определенным методом равномерно распределенной нагрузки	№ по пор. №	Наименование	Формулы для определения падения напряжения и потерь мощности	Отношение падений напряжения и потерь мощности, выведенных методом теории вероятностей, к тем же величинам, определенным методом равномерно распределенной нагрузки
1	Среднее падение напряжения в фидере	$ZLI \frac{n}{2}$	1	6	Средняя потеря мощности при одностороннем питании	$RLP \frac{2n^2 + n + 3\beta n}{6}$	$1 + \frac{1 + 3\beta}{n}$
2	Средняя потеря мощности в фидере	$RLP^2 (n^2 + \beta n)$	$1 + \frac{\beta}{n}$	7	Среднее падение напряжения до токораздела при двустороннем питании	$ZLI \frac{3n+1}{24}$	$1 + \frac{1}{3n}$
3	Среднее падение напряжения до токораздела при одностороннем питании	$ZLI \frac{n}{2}$	1	8	Среднее падение напряжения до токоприемника за все время работы поезда при двустороннем питании	$ZLI \frac{n+1}{12}$	$1 + \frac{1}{n}$
4	Среднее падение напряжения до токоприемника за все время работы поезда при одностороннем питании	$ZLI \frac{2n+1}{6}$	$1 + \frac{1}{2n}$	9	Среднее падение напряжения до токоприемника за время хода под током при двустороннем питании	$ZLI \frac{n+2\alpha-1}{12}$	$1 + \frac{2\alpha-1}{n}$
5	Среднее падение напряжения до токоприемника за время хода под током при одностороннем питании	$ZLI \frac{2n+3\alpha-2}{6}$	$1 + \frac{3\alpha-2}{2n}$	10	Средняя потеря мощности при двустороннем питании	$RLP \frac{n^2 + n + 2\beta n}{12}$	$1 + \frac{1 + 2\beta}{n}$

1 — средний арифметический ток одного поезда (A).

2 — полное сопротивление единицы длины линии или фидера ($\Omega/\text{км}$).

3 — ваттное сопротивление единицы длины линии или фидера ($\Omega/\text{км}$).

4 — длина рассматриваемого участка или фидера (км).

5 — количество поездов, находящихся одновременно на рассматриваемом участке линии.

6 — средний квадратичный ток одного поезда (A).

7 — отношение всего времени работы поезда на линии к времени хода под током.

циенты c для падения напряжения до токоприемника за время движения под током и для потерь мощности также должны совпасть между собой.

4. При $n=1$ формулы для определения падения напряжения до токоприемника за все время работы поезда и до токораздела совпадают.

5. При $n=1$ коэффициент c для случая падения напряжения до токоприемника поезда за время езды под током будет в α раз больше того же коэффициента за все время работы поезда.

В заключение заметим, что из всех допущений, положенных в основу наших выводов, существенное влияние на конечные результаты могут оказывать лишь следующих два:

1. Принятие одинаковых нагрузок для обоих направлений движения поездов.

2. Принятие абсолютно нерегулярного движения поездов в то время, как даже при самых неблагоприятных условиях расстояние между поездами не может быть менее некоторой величины, определяемой пропускной способностью дороги.

Для более правильного учета условий работы тяговой сети следовало бы поэтому принять вместо движущихся по линии n поездов, потребляющих средний ток I каждый, n_1 поездов одного направления с током I_1 и n_2 поездов другого направления с током I_2 (причем

$n_1 + n_2 = n$ и $I_1 n_1 + I_2 n_2 = In$) и изменить пределы интегрирования при определении математического ожидания, интегрируя по каждому dy_i не от 0 до y_{i+1} , а от 0 до $y_{i+1} - l$, где l — минимальное возможное расстояние между поездами.

При этом интегралы для определения математического ожидания приняли бы следующий вид:

$$\int_0^L dy_n \int_0^{y_n - l} dy_{n-1} \cdots \int_0^{y_2 - l} dy_1 f(y_1).$$

При $l=0$ этот интеграл совпал бы с рассмотренными нами; при $l = \frac{L}{n}$ — соответствовал бы случаю параллельного графика с полным использованием пропускной способности дороги.

Однако введение этих уточнений настолько усложнило бы и без того достаточно громоздкие математические выкладки, что мы предпочли ограничиться установлением интересующих нас зависимостей на основе сделанных выше допущений с тем, чтобы уже в дальнейшем попытаться подойти к разрешению данной проблемы в полном объеме.

Об экономии металла в сетях наружного освещения

Инж. Л. И. Столов
ВЭО, Казань

Сети наружного освещения промышленных предприятий, а иногда и коммунальные, осуществляются отдельными линиями, к которым в определенных пунктах, находящихся обычно на равных расстояниях друг от друга ($30 \div 60$ м), присоединяются световые точки. Наличие большей частью одинаковых нагрузок, сосредоточено приложенных по очереди к различным фазам сети, вызываемая этим несимметрией токов в отдельных участках различных фаз и, как следствие ее, смещение нулевой точки векторной диаграммы, выполнение концевых участков двух- и трехпроводными при включении нагрузок звездой и двух-проводными при включении нагрузок треугольником — влечет за собой ряд специфических особенностей электрического расчета сетей наружного освещения, что и рассмотрено ниже.

Ниже будет показано, что распространенный порядок присоединения световых точек к фазам I-II-III-I-II-III-I-II-III и т. д. (рис. 2), как будет показано дальше, целесообразен и что чередование присоединенных точек в порядке III-II-III-II-I-I-II-III-II-I и т. д. (рис. 1) обеспечивает значительную экономию в весе проводов или же соответствующее уменьшение потерь напряжения в линии.

Анализ потерь напряжения в отдельных фазах, одно-, двух- и трехфазных участков линий, производимый ниже с учетом смещения нулевой точки векторной диаграммы, показывает, что это смещение нулевой точки, увеличивая потерю напряжения в одной из фаз, вызывает в то же время в других фазах повышение напряжения, которое на соседних участках при надлежащей системе питания может быть использовано. При этом порядок присоединения световых точек согласно рис. 2 вызывает все увеличивающееся смещение нулевой точки векторной диаграммы по мере удаления от источника

питания к концу линии; порядок же присоединения согласно рис. 1 дает взаимную компенсацию этих смещений на соседних участках, что и обеспечивает экономичность системы.

Введем следующие обозначения:

p — мощность одной световой точки в ваттах;

P — полная мощность, передаваемая по всем фазам данного участка линии в ваттах;

E — линейное напряжение в вольтах;

r — омическое сопротивление участка на одну фазу в омах;

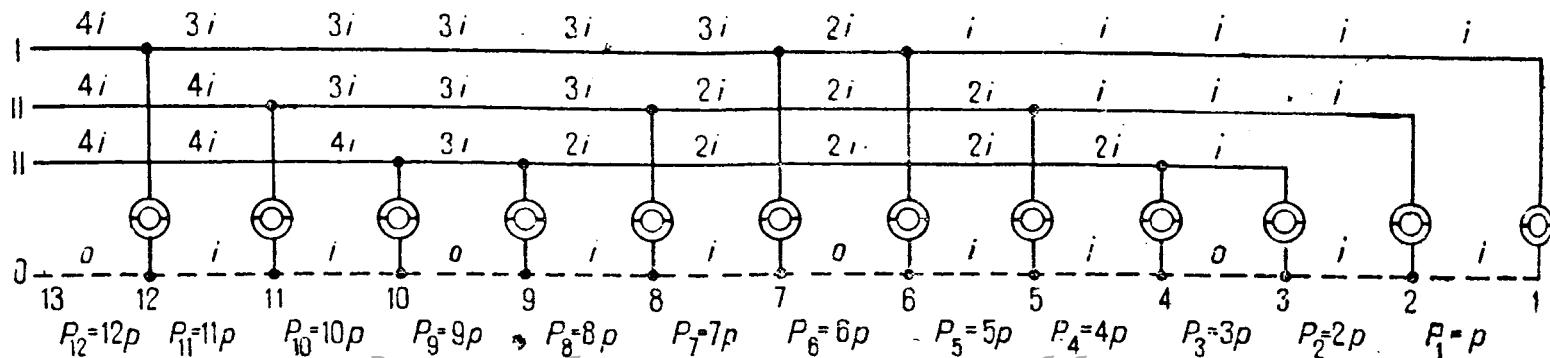
i — ток, соответствующий мощности одной световой точки, в амперах.

Очевидно

$$i = \frac{p}{E} = \frac{\sqrt{3} p}{E}.$$

Дальнейшие выводы сделаны в предположении, что нагрузки включены на звезду (четырехпроводная система); все световые точки — одинаковой мощности; длины участков между отдельными световыми точками равны между собой и сечение проводов постоянно (к чему в сетях наружного освещения нередко приводят условия механической прочности).

Потери напряжения в различных фазах отдельных участков сети при включении световых точек согласно рис. 1 приведены (для сети



стоящей из шести участков) в табл. 1 и иллюстрированы соответствующей векторной диаграммой (рис. 3), где цифрами 1, 2, 3 т. д. обозначены концы векторов фазового напряжения в точках 1, 2, 3 и т. д. сети (рис. 1), а знаками $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и т. д. обозначены положения нулевой точки векторной диаграммы, смещающейся под влиянием протекающего по нулевому проводу тока.

В табл. 1 первая графа дает индекс участка согласно рис. 1; вторая графа — полную мощность (P_n), передаваемую по всем фазам данного участка, графы от третьей до шестой дают токи в отдельных фазах и в нулевом проводе на соответствующем участке. Так, например, на участке 5-4 токи в фазах I, II, III и в нулевом прово-

де составляют (рис. 1) $i, i, 2i$ и i , или $\frac{\sqrt{3}P_4}{E}, \frac{\sqrt{3}P_4}{E}, \frac{2\sqrt{3}P_4}{E}$ и $\frac{\sqrt{3}P_4}{E}$, или, выраженные через мощность $P_4 = 4p$, протекающую по данному участку, соответственно

$$\frac{\sqrt{3}P_4}{4E}, \frac{\sqrt{3}P_4}{4E}, \frac{\sqrt{3}P_4}{2E}, \frac{\sqrt{3}P_4}{4E}.$$

В графах от седьмой по девятую приведены потери напряжения (т. е. алгебраические разности напряжений в начале и конце участка) в различных фазах данного участка с учетом смещения нулевой точки векторной диаграммы, влияющего на результирующую потерю напряжения. Различные положения нулевой точки показаны на рис. 3, цифрой 0 с индексом соответствующей точки сети согласно рис. 1. Так, например, для рассмотренного выше участка линии 5-4, нагрузка которого состоит (рис. 1) из симметричной нагрузки

$$i = \frac{\sqrt{3}P_4}{4E},$$

текущей в каждой фазе, и несимметричной

$$i = \frac{\sqrt{3}P_4}{4E}$$

в фазе III и в нулевом проводе, несимметричная нагрузка смещает потенциал нуля в конце участка 5-4 (точка 4) в сторону вектора III (отрезок $\theta_5\theta_4$ на векторной диаграмме), что вызывает дополнительную потерю напряжения в фазе III, но зато повышение напряжения в фазах I и II, компенсирующее повышенную потерю напряжения в этих фазах, питающих несимметрично нагруженные концевые участки 3-2 и 2-1.

Таким образом, имея ввиду, что собственное падение напряжения в фазе I составляет $\frac{\sqrt{3}P_{4r}}{E}$ (см. табл. 1) и выражается на векторной диаграмме (рис. 3) отрезком 5-4 (соответственно индексу участка на рис. 1), получим, что результирующая потеря в фазе I с учетом смещения нуля, если пренебречь незначительной разницей между вектором $\theta_4 - \theta_1$ (не показанным на рис. 3) и его проекцией на направлении вектора I, составляет

$$\frac{\sqrt{3}P_{4r}}{4E} - \frac{\sqrt{3}P_{4r}}{4E} \cos 60^\circ = \frac{\sqrt{3}P_{4r}}{8E};$$

здесь 60° — угол между линией $\theta_5\theta_4$ и продолжением вектора I.

Аналогично в фазе II результирующая потеря напряжения составляет

$$\frac{\sqrt{3}P_{4r}}{4E} - \frac{\sqrt{3}P_{4r}}{4E} \cos 60^\circ = \frac{\sqrt{3}P_{4r}}{8E}$$

и в фазе III

$$\frac{\sqrt{3}P_{4r}}{2E} + \frac{\sqrt{3}P_{4r}}{4E} = \frac{3\sqrt{3}P_{4r}}{4E}.$$

Таким образом на данном участке происходит выравнивание той несимметрии в потерях напряжения у отдельных фаз, которая имеет место на участке 4-1. Полное выравнивание подобной несимметрии векторной диаграммы происходит через каждые шесть участков.

Наконец, далее в графах 10–12 даны коэффициенты K , помощью которых полные мощности отдельных участков линии могут быть приведены к эквивалентным мощностям трехфазной симметрично нагруженной системы, дающим те же потери напряжения, что и данный несимметрично нагруженный участок. Для получения этих коэффициентов приведенные в графах 7–9 результирующие фазовые

Таблица 1

Передаваемая мощность W	Ток A	Фазовая потеря напряжения с учетом смещения нулевой точки V						Коэффициент K для перевода мощности участка P_n в эквивалентную трехфазн. мощн., соотв. пот. напр.	
		I фаза	II фаза	III фаза	9	10	11	12	
7 - 6	$P_6 = 6p$	$\frac{\sqrt{3}P_6}{3E}$	$\frac{\sqrt{3}P_6}{3E}$	$\frac{\sqrt{3}P_6}{3E}$	$\frac{\sqrt{3}P_6}{3E}$	$\frac{2\sqrt{3}P_5}{5E}$	$\frac{2\sqrt{3}P_5}{5E}$	$\frac{2\sqrt{3}P_5}{5E}$	1,00
6 - 5	$P_5 = 5p$	$\frac{\sqrt{3}P_5}{5E}$	$\frac{\sqrt{3}P_5}{5E}$	$\frac{\sqrt{3}P_5}{5E}$	$\frac{\sqrt{3}P_5}{5E}$	$\frac{\sqrt{3}P_4}{4E}$	$\frac{\sqrt{3}P_4}{4E}$	$\frac{\sqrt{3}P_4}{4E}$	0,00
5 - 4	$P_4 = 4p$	$\frac{\sqrt{3}P_4}{4E}$	$\frac{\sqrt{3}P_4}{4E}$	$\frac{\sqrt{3}P_4}{4E}$	$\frac{\sqrt{3}P_4}{4E}$	$\frac{\sqrt{3}P_3}{3E}$	$\frac{\sqrt{3}P_3}{3E}$	$\frac{\sqrt{3}P_3}{3E}$	0,375
4 - 3	$P_3 = 3p$	$\frac{\sqrt{3}P_3}{3E}$	$\frac{\sqrt{3}P_3}{3E}$	$\frac{\sqrt{3}P_3}{3E}$	$\frac{\sqrt{3}P_3}{3E}$	$\frac{\sqrt{3}P_2}{2E}$	$\frac{\sqrt{3}P_2}{2E}$	$\frac{\sqrt{3}P_2}{2E}$	1,00
3 - 2	$P_2 = 2p$	$\frac{\sqrt{3}P_2}{2E}$	$\frac{\sqrt{3}P_2}{2E}$	$\frac{\sqrt{3}P_2}{2E}$	$\frac{\sqrt{3}P_2}{2E}$	$\frac{\sqrt{3}P_1}{E}$	$\frac{\sqrt{3}P_1}{E}$	$\frac{\sqrt{3}P_1}{E}$	2,25
2 - 1	$P_1 = p$	$\frac{\sqrt{3}P_1}{E}$	$\frac{\sqrt{3}P_1}{E}$	$\frac{\sqrt{3}P_1}{E}$	$\frac{\sqrt{3}P_1}{E}$	$\frac{\sqrt{3}P_1}{E}$	$\frac{\sqrt{3}P_1}{E}$	$\frac{\sqrt{3}P_1}{E}$	6,00

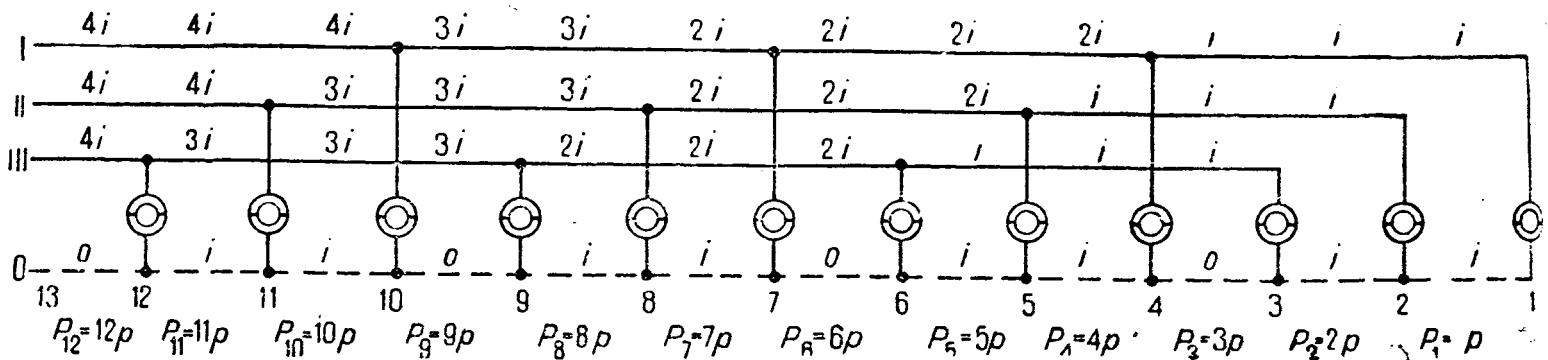


Рис. 2

потери напряжения делились на выражение для фазовой потери напряжения в симметрично нагруженной трехфазной системе:

$$Ir = \frac{P_n r}{\sqrt{3} E}$$

Так, например, для рассмотренного выше участка 5-4 коэффициент K для фазы I равен всего лишь

$$\frac{\sqrt{3} P_4 r}{8 E} : \frac{P_4 r}{\sqrt{3} E} = \frac{3}{8} = 0,375;$$

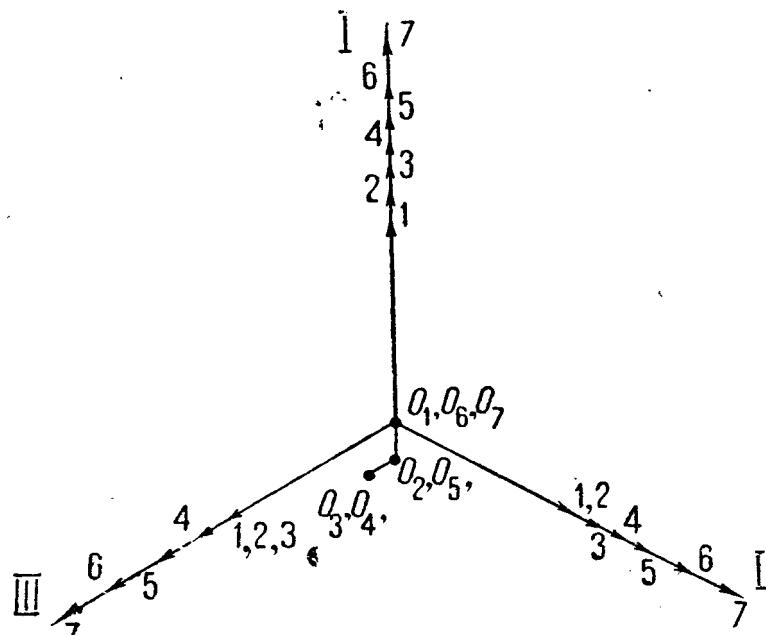


Рис. 3

для фазы II также

$$\frac{\sqrt{3} P_4 r}{8 E} : \frac{P_4 r}{\sqrt{3} E} = 0,375;$$

для фазы III

$$\frac{3 \sqrt{3} P_4 r}{4 E} : \frac{P_4 r}{\sqrt{3} E} = \frac{9}{4} = 2,25 \text{ и т. д.}$$

Отметим, что указанные в графе 10 коэффициенты для участков 2-1 и 3-2 приведены в статьях А. Бухштаба («Известия ГЭТ», 1929, № 1) и Ф. Рейма («Электрификация и электромонтер», 1932, № 8/9).

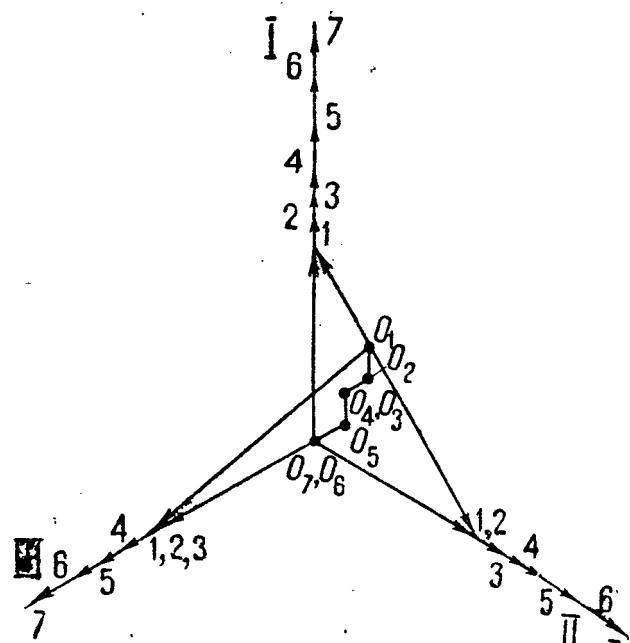
Все расчеты на потерю напряжения должны вестись в соответствии с графикой 10, дающей наиболее тяжелые условия.

Сводка коэффициентов K , на которые необходимо умножать мощности отдельных участков линии для перевода их к мощностям эквивалентной трехфазной симметрично нагруженной системы, дана в табл. 2.

Индекс участка	Коэффициент K для перевода мощности участка P_n в эквивалентную трехфазную мощность симметричной нагрузки, дающую соответствующую потерю напряжения
2-1	6,00
3-2	2,25
4-3	1,00
5-4	0,38
6-5	0,00
7-6	1,00
8-7	1,72
9-8	1,31
10-9	1,00
11-10	0,75
12-11	0,55
13-12	1,00

Приведя протекающие по участкам мощности к мощностям эквивалентной трехфазной симметрично нагруженной системы и имея соответствующие длины участков, следует производить расчет, определяя обычными способами соответствующую относительную потерю напряжения (в процентах).

При расположении световых точек согласно рис. 2 смещение нулевой точки в направлении фазы I по мере удаления от места питания происходит непрерывно (см. рис. 4), следствием чего является значительное повышение коэффициентов K (см. табл. 3), а следовательно, и эквивалентной трехфазной мощности, что в свою очередь вызывает возрастание потребного сечения. Вышеуказанные иллюстрируются приводимой для сравнения (в сокращенном виде) табл. 3 и соответствующей векторной диаграммой (рис. 4) (составленными для сети, состоящей из шести участков).



Библиотека универсальная научная
www.booksite.ru

Рис. 4

Таблица 3

Индекс участка	Коэффициент K для перевода мощности участка P_n в эквивалентную трехфазную мощность, дающую соответствующую потерю напряжения		
	I фаза	II фаза	III фаза
1	2	3	4
7-6	1,00	1,00	1,00
6-5	1,50	1,50	0,00
5-4	2,25	0,375	0,375
4-3	1,00	1,00	1,00
3-2	2,25	1,50	-1,50
2-1	6,00	-1,50	-1,50

Сравнение весов фазовых проводов для расположения световых точек согласно рис. 1 и 2 иллюстрируется рис. 5, где ломаная A показывает относительный перерасход металла проводов в функции от числа участков при расположении точек согласно рис. 2 по сравнению с аналогичным весом при расположении точек согласно рис. 1.

Следует отметить, что применяемый иногда для участков 3-4 4-5 5-6 и т. д. способ расчета в предположении симметричной трехфазной нагрузки этих участков, не учитывая возможности использовать потери напряжения на этих и иных участках для восстановления симметрии трехфазной системы, искаженной нагрузками участков 1-2, 2-3, и т. д., также влечет за собой чрезмерный перерасход материала проводов по сравнению с выше рассмотренным расчетом для световых точек, расположенных согласно рис. 1, что иллюстрируется кривой B на рис. 5.

Наконец, отметим, что рекомендуемый нами порядок присоединения точек к фазам I-II-III-II-I-II и т. д. дает возможность не менее чем порядок присоединения I-II-III-I-II-III и т. д. оставлять на дежурном освещении $1/3$ ламп (например, фаза II) или $2/8$ ламп (например, фазы I-III).

Пример. Осветительная установка питающаяся от сети 220/127 V, включает в себя 6 световых точек по 500 W (см. табл. 4, где указаны длины отдельных участков в метрах); порядок включения точек взят согласно рис. 1; линия выполняется постоянным сечением; допустимая потеря напряжения составляет 4%. Таблица к выбору сечения приводится ниже. Незначительное искажение векторной диаграммы за счет неодинаковости длин отдельных участков во внимание не принимается. Потребное сечение составляет 6 mm² при действительной потере напряжения в 3,85%.

Таблица 4

Индекс участка	Передаваемая мощность P_n W	Передаваемая мощность, приведенная к эквивалентной симметричной трехфазной системе W	Длина участка км	W/m к эквивалентной симметричной трехфазной системе	Сечение пл. ²	Потеря напряжения %
1-2	500	3 000	60	180 000	—	—
2-3	1 000	2 250	55	124 000	—	—
3-4	1 500	1 500	50	75 000	—	—
4-5	2 000	750	65	48 800	—	—
5-6	2 500	—	60	—	—	—
6-7	3 000	3 000	70	210 000	—	—
Итого			637 800	6	3,85	

Тот же подсчет, произведенный для порядка включения световых точек согласно рис. 2, дает потребное сечение в 10 mm² при действительной потере напряжения в 4,02%, что соответствует перерасходу в весе фазовых проводов в 67%.

Отметим, что в случае если бы расчет участков 3-7 велся бы в предположении симметричной трехфазной нагрузки, то расчетное сечение составило бы 8 mm², что дало бы перерасход в сечении проводов 33%, разумеется, не исключило бы целесообразности включения ламп согласно рис. 1.

Все приведенные выше рассуждения относились к трехфазной четырехпроводной линии, выполненной постоянным сечением с равными мощностями световых точек и равными расстояниями между ними. Некоторым неравенством мощностей отдельных световых точек, а также некоторым различием в пролетах, в целях упрощения расчетов можно пренебречь (см. примеры). То же относится и к выполнению линий с уменьшенным сечением нулевого провода. Наконец, для трехфазной системы без нулевого провода можно провести рассуждения, аналогичные выше приведенным.

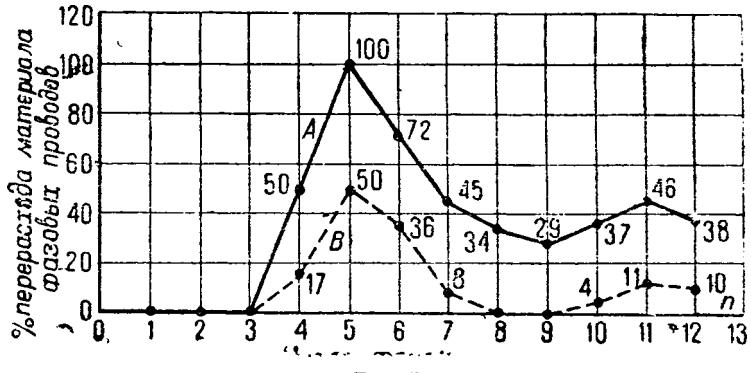


Рис. 5

Последнее время в качестве материала для проводов наружного освещения нередко применяется железо. В этом случае расчеты ведутся аналогично предыдущему. Однако так как сопротивление железного провода зависит от величины тока, текущего по линии, то рассмотренные выше переводные коэффициенты K (см. табл. 2) заменяются произведениями коэффициентов A_1 и K_2 , причем при переходе к эквивалентной симметричной трехфазной мощности вводится коэффициент K_1 такой величины, чтобы полученные трехфазные мощности имели тот же ток, который в действительности протекает по проводам данного участка.

Так, например, в однофазном участке 2-1 (рис. 1) ток составляет $\sqrt{3} P_1$, этому же значению тока в эквивалентной трехфазной сист-

еме соответствует мощность $3 P_1$. Таким образом для перевода данной мощности в эквивалентную трехфазную следует мощность P_1 умножить на $K_1 \cdot 3$, после чего и производить определение относительной потери напряжения обычными способами, например, помощью номограмм, приведенных в статье П. Бенар ("Электрификация и электромонтаж", 1931, № 81).

Полученный результат следует умножить на $K_2 = 2$, чтобы была выдержанна величина результирующего коэффициента $K = K_1 \cdot K_2 = 3 \cdot 2 = 6$.

Аналогично в двухфазном участке 3-2 ток составляет $\frac{\sqrt{3}}{E} P_2$; этому же значению тока в эквивалентной трехфазной системе соответствует мощность $\frac{3}{2} P_2$. Таким образом для перевода данной мощности в эквивалентную трехфазную следует мощность P_2 умножить на $K_1 = 1,5$, после чего и производить определение относительной потери напряжения. Полученный результат следует умножить на $K_2 = 1,5$, чтобы была выдержанна величина результирующего коэффициента

$$K = K_1 K_2 = 1,5 \cdot 1,5 = 2,25.$$

Подобные же рассуждения могут быть применены и для остальных участков. Коэффициенты K_1 и K_2 сведены в табл. 5.

Начиная с участка 8-7, в целях упрощения расчетов можно ходить коэффициент K_2 принимать равным единице, а K_1 — равный соответствующим значениям K из табл. 3.

Таблица 5

Индекс участка	K_1	K_2
2-1	3,0	2,0
3-2	1,5	1,5
4-3	1,0	1,0
5-4	0,75	0,5
6-5	0,0	0,0
7-6	1,0	1,0
8-7	1,72	1,0
9-8	1,31	1,0
10-9	1,00	1,0
11-10	0,75	1,0
12-11	0,55	1,0
13-12	1,00	1,0

1) Отметим, что в этих номограммах приведены падения напряжения, превышающие потери напряжения при $\cos \phi = 1$ на 16%.

НОРМЫ И СТАНДАРТЫ

Электрические счетчики

(ОСТ/ВКС 6225)

Инж. Е. К. Энгель
Москва

ВКС при СТО 14 ноября 1933 г. утвердил общесоюзный стандарт на электрические счетчики (ОСТ/ВКС 6225) со сроком введения с 1 января 1935 г.

Следует отметить, что названный стандарт не распространяется на электрические счетчики постоянного тока на номинальные напряжения выше 600 В и номинальные силы тока выше 100 А, а также на все электрические счетчики реактивной и кажущейся энергии.

В соответствии с этим стандартом указывается лишь классификация всех электрических счетчиков (включая и электрические счетчики, учитывающие количество электрического), подробные же технические условия в отношении электрических счетчиков реактивной и кажущейся энергии этим стандартом не устанавливаются, принимая во внимание, что производство счетчиков этого рода не освоено еще в той мере, которая необходима для конкретизации предъявляемых к ним технических требований уже в форме определенного общесоюзного стандарта. При разработке и установлении этого стандарта были приняты во внимание как «Правила для электрических счетчиков Международной электротехнической комиссии» и «Правила о поверке электрических счетчиков», так и научно-исследовательский опыт в этом направлении, равно как и основные требования производства и главнейших потребителей.

Стандарт не предусматривает счетчиков трехфазного тока для равномерной нагрузки фаз, так как вследствие их больших погрешностей даже при незначительной неравномерности нагрузок по фазам и несимметрии напряжений они, само собою разумеется, в стандарте рекомендованы быть не могут.

Технические условия, предусматриваемые стандартом, устанавливают:

- 1) единицы учета электрической энергии и количества электричества;
- 2) номинальные значения тока и напряжения;
- 3) основные схемы включения электрических счетчиков;
- 4) основные требования к конструкции в части подвижной части, счетного механизма и регулировки;
- 5) допуски на точность измерения;
- 6) погрешности показания электрических счетчиков;
- 7) чувствительность;
- 8) самоход;
- 9) влияния:
 - a) неравномерности напряжения;
 - b) изменение напряжения;
 - c) частоты;
 - d) температура;
 - e) наклон;
- 10) перегрузку;
- 11) динамическую устойчивость;
- 12) испытательное напряжение;
- 13) вариации потреcностей;
- 14) потребление мощности параллельной цепью счетчиков;
- 15) выносимость;
- 16) пределы нагревания;
- 17) маркировку электрических счетчиков.

Следует отметить, что стандарт вносит совершенно новые требования, не предусмотренные старыми правилами, как в отношении влияния частоты, так и в отношении особых испытаний на перегрузку и на динамическую устойчивость.

Особенно существенным является то обстоятельство, что названный стандарт устанавливает новые допустимые погрешности показаний электрических счетчиков, значительно более строгие по сравнению с прежними, что должно сильно повысить качество продукции счетчиков. Это особенно важно, так как удовлетворение требований основных потребителей в отношении электрических счетчиков советского производства и особенно установка массового производства счетчиков 1 класса дадут возможность идти по пути освобождения от импортной зависимости.

Вполне очевидна огромная экономия для всего народного хозяйства, возникающая при использовании точными электрическими счетчиками. Это устраниет крупные убытки, возникающие из-за неправильного подсчета потребляемой электроэнергии, и дает твердую базу для рационального использования электрической энергии и электрической сети. Кроме того, значительны экономический эффект получится от уменьшения расходов на регулировку электрических счетчиков.

Ввиду требуемого стандартом повышения качества электрических счетчиков, несмотря на облегчение стандартом их масового производства, в настоящий момент еще трудно установить, в какой именно мере может быть достигнуто снижение в дальнейшем заводской себестоимости электрических счетчиков.

Помимо означенного стандарта в настоящее время в ЦУМ разрабатываются еще и инструкции для типовых испытаний электрических счетчиков и для проверки счетчиков, находящихся в эксплуатации.

Ввиду сильной зависимости правильности показаний электрических счетчиков от той или иной последовательности фаз при включении электрических счетчиков трехфазного тока этот вопрос поставлен особо перед ГЛАВЭСПромом, которому и предложено ВКС и СТО проработать его при участии научно-исследовательских учреждений, представив в ВКС к 1 января 1935 все материалы, характеризующие коэффициенты погрешности на случай изменения порядка последовательности фаз.

Контроль за практическим проведением и соблюдением этого столь важного стандарта поручен особым постановлением ВК при СТО Народному комиссариату тяжелой промышленности по линии ГЛАВЭСПрома и ГЛАВЭНЕРГО.

Ниже приводится содержание названного выше утвержденного общесоюзного стандарта на «Электрические счетчики (технические условия)», с установленными стандартом основными схемами включения эти счетчиков по ОСТ/ВКС 6225:

Настоящий стандарт распространяется на все изготовленные в СССР и ввозимые из-за границы (согласно введению в действие настоящего стандарта) электрические счетчики, служащие для учета электрической энергии и для расчета между поставщиками и потребителями, в том числе и электрические счетчики со специальными приспособлениями, как-то: счетчики двойного тарифа, с максимальным ваттметром, с предварительной оплатой и др.

Настоящий стандарт не распространяется на счетчики постоянного тока на номинальные напряжения выше 600 В и номинальные силы тока выше 100 А и на все счетчики реактивной и кажущейся энергии.

A. Определение

п. 1. Электрический счетчик есть измерительный прибор, учитывающий количество электрической энергии (активной, реактивной, кажущейся) или учитывающий количество электричества.

Примечание. В дальнейшем изложении слова «электрические счетчики» для краткости заменяются словом «счетчики».

B. Классификация

п. 2. По принципу устройства и действия счетчики разделяются на следующие системы:

а) Магнитоэлектрические, состоящие из одного или нескольких неподвижных постоянных магнитов и вращающейся или качающейся подвижной части, по которой проходит весь ток или часть учитываемого тока.

б) Электродинамические, состоящие из одной или нескольких неподвижных катушек и подвижной части (катушки), вращающейся или качающейся под действием токов, проходящих по подвижной и неподвижной частям.

в) Индукционные, состоящие из комбинации нескольких неподвижных катушек (питаемых переменными токами), соединенных магнитной цепью из ферромагнитного материала и создающих вращающееся или бегущее магнитное поле, которое индуцирует токи в подвижной части счетчика и вызывает ее движение.

г) Электролитические, состоящие из сосуда с электролитом и электродов, через которые проходит весь или часть учитываемого тока.

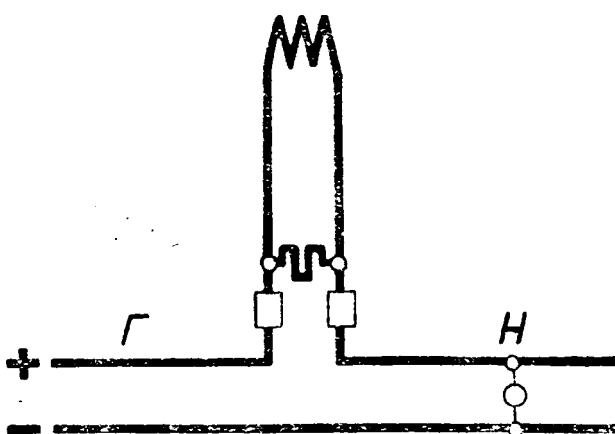


Схема 1. Счетчик количества электричества

п. 3. По роду производимого учета электрические счетчики разделяются на:

- счетчики активной энергии (киловатт-часов);
- счетчики реактивной энергии (киловатт-часов);
- счетчики кажущейся энергии (киловольт-ампер-часов);
- счетчики количества электрических (ампер-часов).

п. 4. По точности учета счетчики разделяются на два класса, обозначаемые цифрами в порядке понижающейся точности.

I класс точности и
II класс точности.

В. Технические условия

Единицы учета

п. 5. Счетчики должны учитывать электрическую энергию (активную и реактивную) в киловатт-часах, количество электричества — в ампер-часах и кажущуюся энергию в киловольт-ампер-часах, без помножения показаний на какой-либо иной множитель кроме степеней 10.

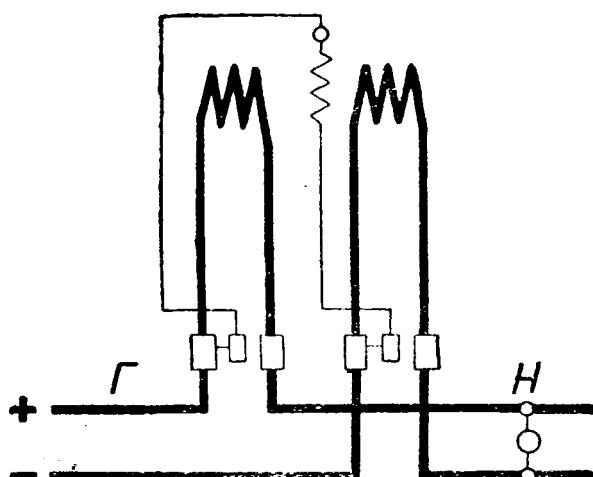


Схема 2. Электродинамический счетчик энергии. Включение в сеть постоянного тока

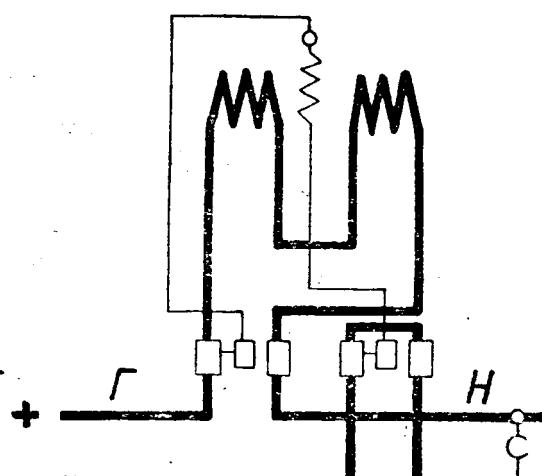


Схема 3. Электродинамический счетчик энергии. Включение в сеть постоянного тока

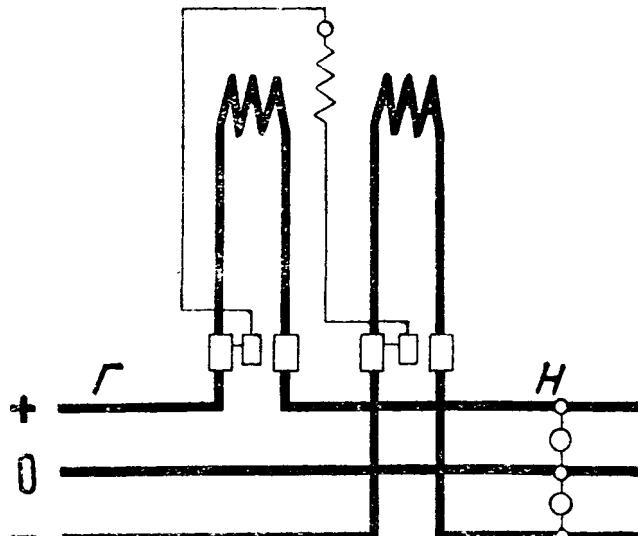


Схема 4. Электродинамический счетчик энергии. Включение в трехпроводную сеть постоянного тока

В случае применения счетчиков со стандартными измерительными трансформаторами, шунтами или иными вспомогательными частями требования настоящего пункта остаются в силе.

Номинальные значения тока и напряжения

п. 6. Счетчики для непосредственного включения в сеть должны изготавляться только на следующие номинальные значения силы тока: 5, 10, 15, 30, 50, 75 и 100 А, при напряжении: а) 110, 220, 440 и 600 В для постоянного тока, б) 127 и 220 В для однофазного тока, в) 127, 220, 380 и 500 В — для трехфазного тока трехпроводной системы и г) 220 и 380 В — для трехфазного тока четырехпроводной системы.

п. 7. Счетчики, предназначенные для работы с измерительными трансформаторами, должны принадлежать к I классу.

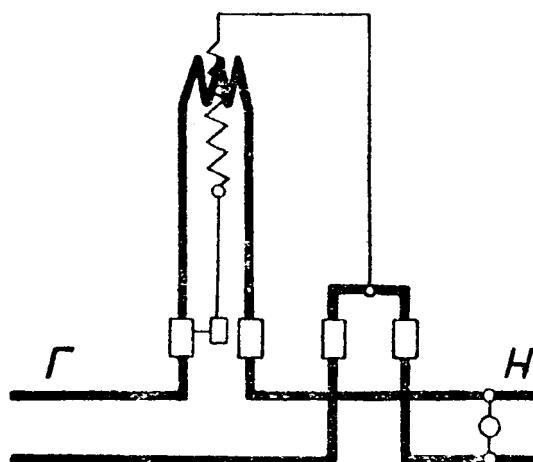
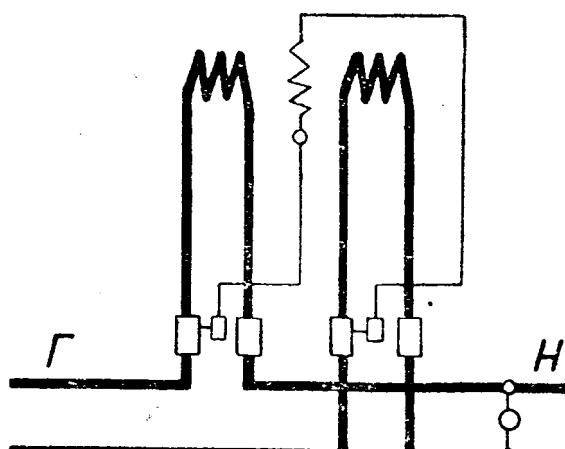


Схема 5. Счетчик однофазного тока



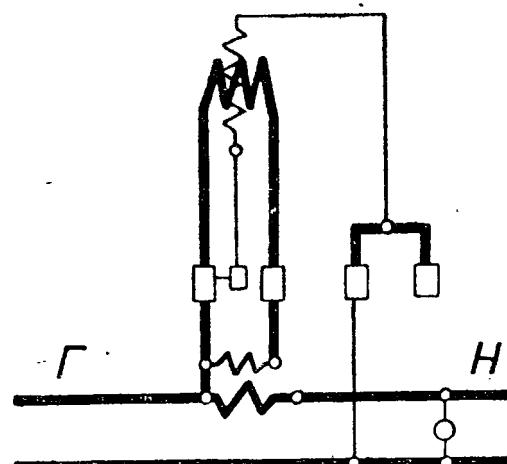


Схема 6. Счетчик однофазного тока с трансформатором тока.

Номинальное значение силы тока счетчиков, предназначенных для включения с трансформаторами тока, должно быть 5 А.

Номинальное значение напряжения счетчиков, предназначенных для включения с трансформаторами напряжения, должно быть равно 100 В.

п. 8. В предыдущем до организации в СССР производства счетчиков I класса допускается применение счетчиков II класса для работы с измерительными трансформаторами.

В этом случае счетчик должен быть отрегулирован и установлен совместно с определенными измерительными трансформаторами, номера которых должны быть указаны на счетчике.

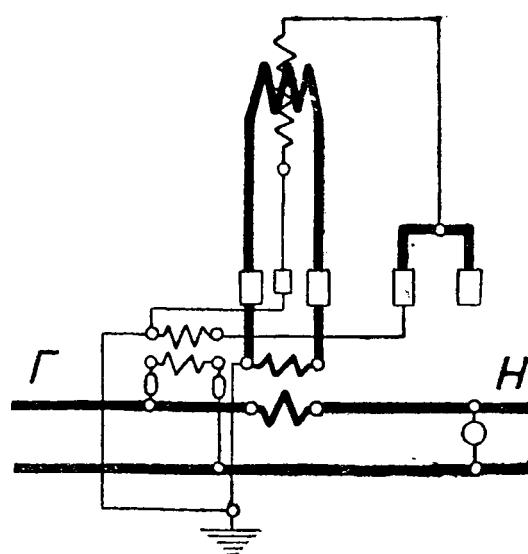


Схема 7. Счетчик однофазного тока с трансформатором тока и напряжения

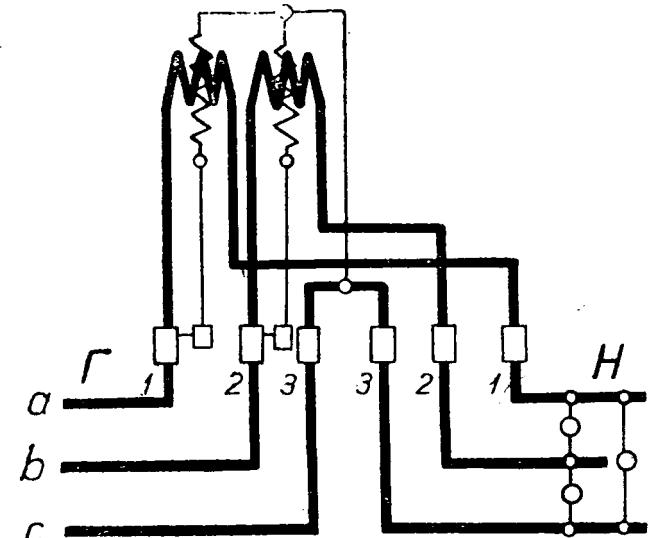
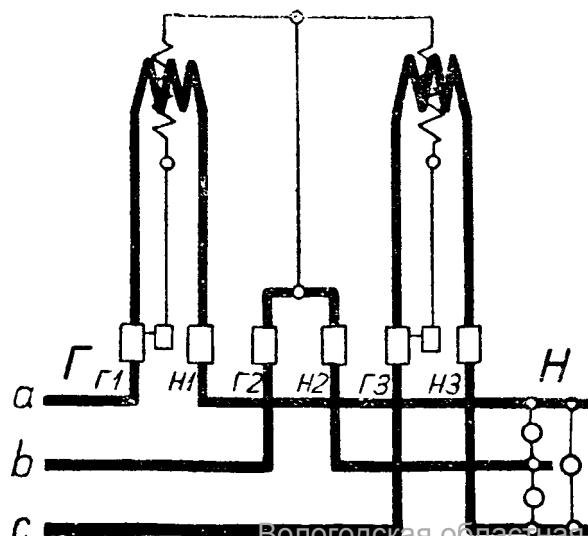


Схема 8а. Счетчик трехфазного тока без трансформаторов

Схема включения

п. 9. Устанавливаются следующие основные схемы включения счетчиков, указанные на прилагаемых схемах № 1—13а.

На внутренней стороне крышки зажимной коробки счетчика должна быть нанесена или надежным образом прикреплена монтажная схема включения его в сеть.

Зажимы счетчика должны иметь обозначения, согласованные со схемой.

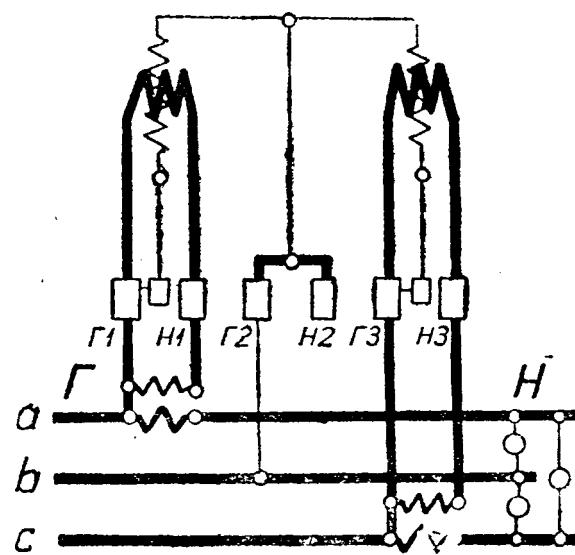
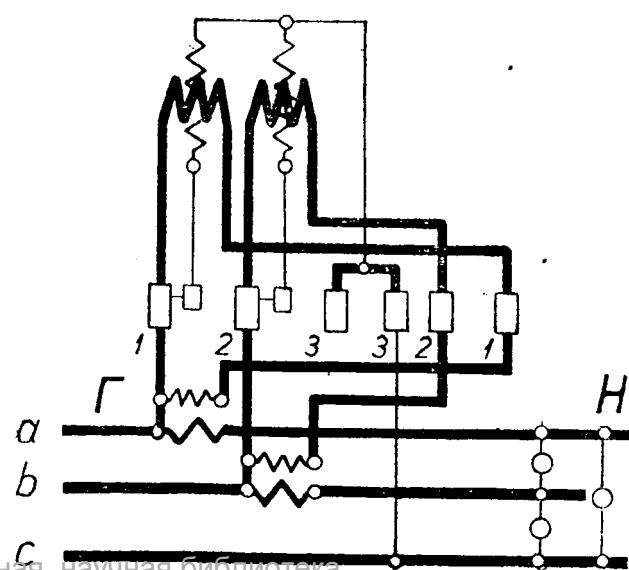


Схема 9. Счетчик трехфазного тока с трансформатором тока



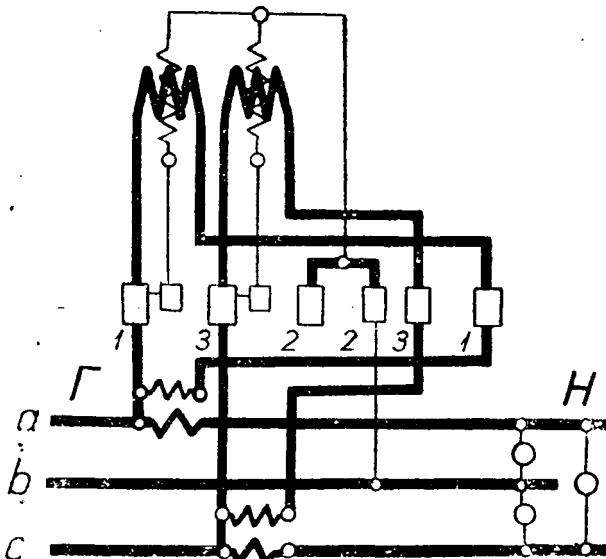


Схема 96. Счетчик трехфазного тока с трансформаторами тока

Конструкция

Корпус

п. 10. Счетчики должны иметь плотно прилегающий к цоколю и закрывающийся кожух, защищающий их механизм от попадания пыли или механического воздействия. Устройство кожуха должно быть таким, чтобы счетчик мог быть запломбирован и чтобы установка счетчика на место, присоединение проводов и пуск в ход счетчика могли быть произведены без снятия кожуха. Между цоколем и кожухом не допускается применения резиновых прокладок и прокладок, вызывающих засорение счетчиков, как-то: войлока, мастики и т. п. Никаких открытых отверстий или трещин в корпусе не должно быть.

п. 11. Отверстия в кожухе счетчиков для снятия показаний и для наблюдения за подвижной частью должны быть закрыты стеклами, прикрепленными к внутренней стороне кожуха. Употребление между стеклом и стенками отверстия резиновых прокладок и таких замазок, которые вызывают засорение счетчиков, не допускается.

Конструкция цоколя должна быть такова, чтобы при установке на месте, при прикреплении винтами к стене вся система (как в механической, так и в электрической части) счетчика не давала перекоса.

п. 12. Счетчик должен иметь соединение последовательной и параллельной цепей вне кожуха, чтобы отделение параллельной цепи при проверке не представляло затруднений и не требовало снятия кожуха.

Зажимы счетчиков и арретир, если таковой имеется, должны закрываться особыми крышками, приспособленными для запломбирования.

Требования настоящего пункта в отношении зажимов не распространяются на счетчики, предназначенные для установки на распределительных щитах.

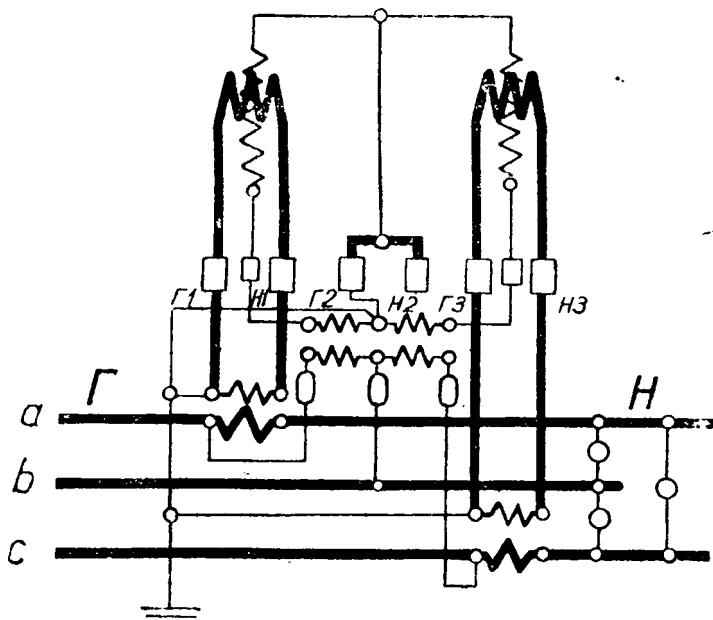


Схема 10. Счетчик трехфазного тока с трансформаторами тока и напряжения

Зажимы счетчика, между которыми имеется разность потенциалов свыше 50 В, должны быть разделены изолирующей перегородкой, исключающей возможность замыкания их отверткой.

Подвижная часть

п. 13. Счетчики с вращающейся подвижной частью должны иметь на ней одно ясно выделяющееся пятно (или метку), по которому производится счет оборотов. Направление вращения должно быть таково, чтобы видимое движение пятна (или метки) происходило слева направо, и это направление должно быть указано на счетчиках стрелкой.

На диске счетчиков допускается нанесение отметок для поверки стrobоскопическим или иным способом.

п. 14. Счетчики должны быть приспособлены для удобного счета числа оборотов или колебаний их подвижной части, если таковая имеется.

Счетный механизм

п. 15. Счетный механизм счетчика должен иметь емкость учета не менее, чем на 750 час. работы при номинальной нагрузке. Если счетный механизм регистрирует десятые или сотые доли учитываемых единиц, то цифры или окошки, указывающие эти доли, должны быть окрашены в иной цвет и отделены запятой от цифр или окошек, указывающих целые единицы.

п. 16. Изменение показания счетного механизма на одну последнюю цифру при номинальной нагрузке не должно продолжаться более 5 мин.

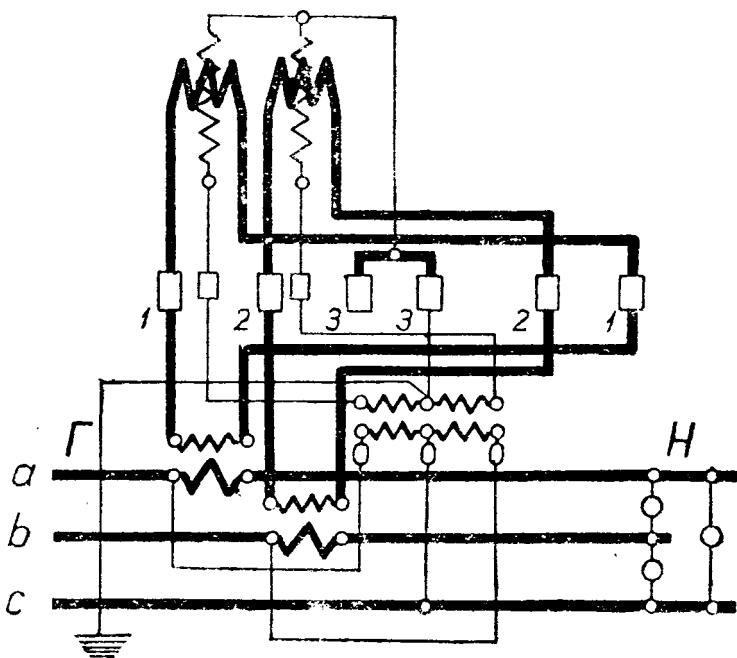


Схема 10а Счетчик трехфазного тока с трансформаторами тока и напряжения

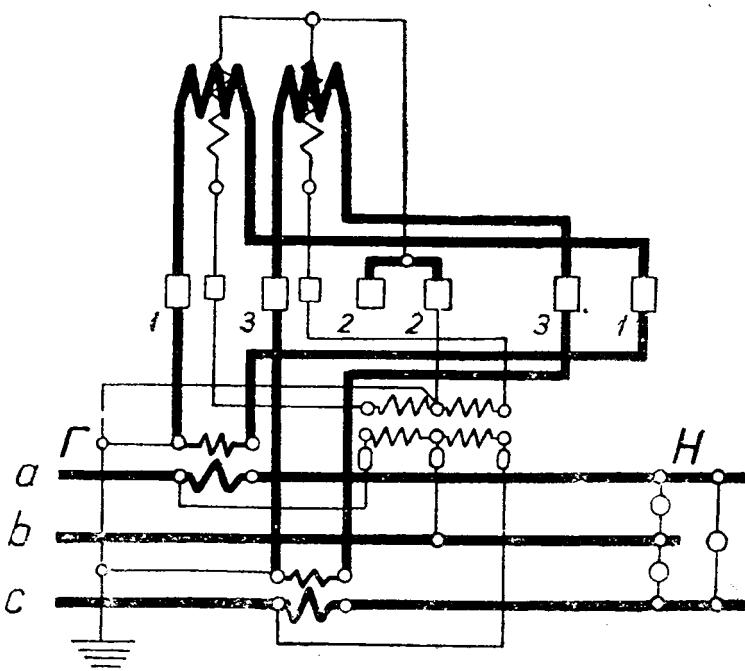


Схема 10б. Счетчик трехфазного тока с трансформаторами тока и напряжения

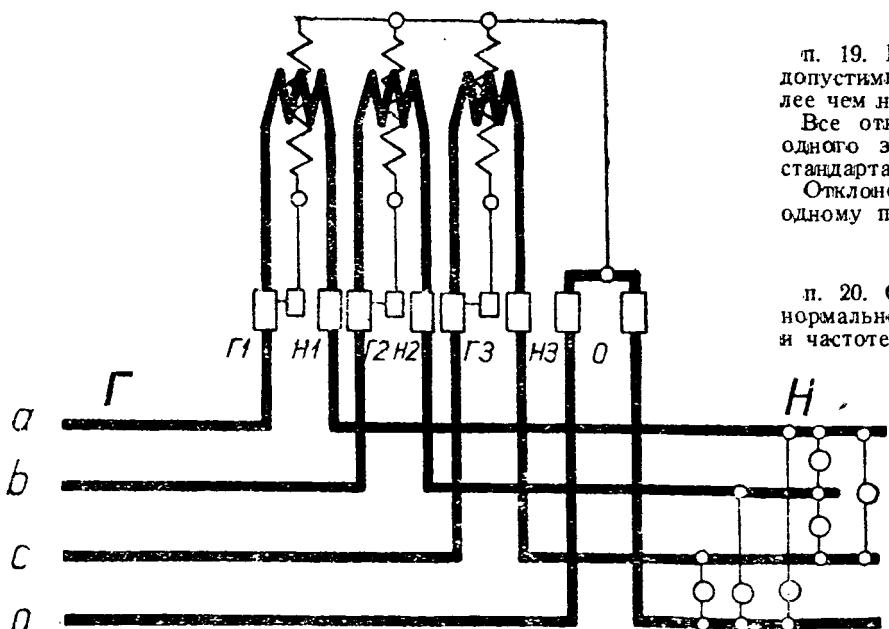


Схема 11 Счетчик трехфазного тока без трансформаторов—для четырехпроводной системы

Зажимы

п. 17. Зажимы счетчиков должны быть рассчитаны на приключаемые к ним провода (médные, алюминиевые или железные) такого сечения, которое соответствует установленным нормам для номинальной силы тока счетчика, причем диаметр отверстия зажимов должен быть не менее:

а) 4,2 мм—для счетчиков на номинальную силу тока до 15 А включительно,

б) 4,6 мм—для счетчиков на номинальную силу тока выше 15 А и для всех счетчиков, включаемых через измерительные трансформаторы.

Счетчики же на номинальную силу тока 50 А и выше должны быть снабжены соответствующими кабельными наконечниками, приспособленными для присоединения медных или алюминиевых или железных (смотря по назначению) проводов.

Зажимная коробка счетчиков, пред назначенных для установки с трансформаторами тока и напряжения, должна иметь зажимы одинаковые как для цепи тока, так и напряжения с отверстием для проводов диаметром не менее 5 мм.

Зажимы должны быть выполнены из металла, не подверженного коррозии или предохранены от таковой при помощи соответствующего металлического покрытия.

Регулировка

п. 18. Конструкция счетчика должна быть такова, чтобы регулировки производились без специальных инструментов в пределах не менее 20%. Приспособление для регулировки должно быть легко доступно.

Стойка, на которой крепится магнит, не должна деформироваться при регулировке тормозным магнитом.

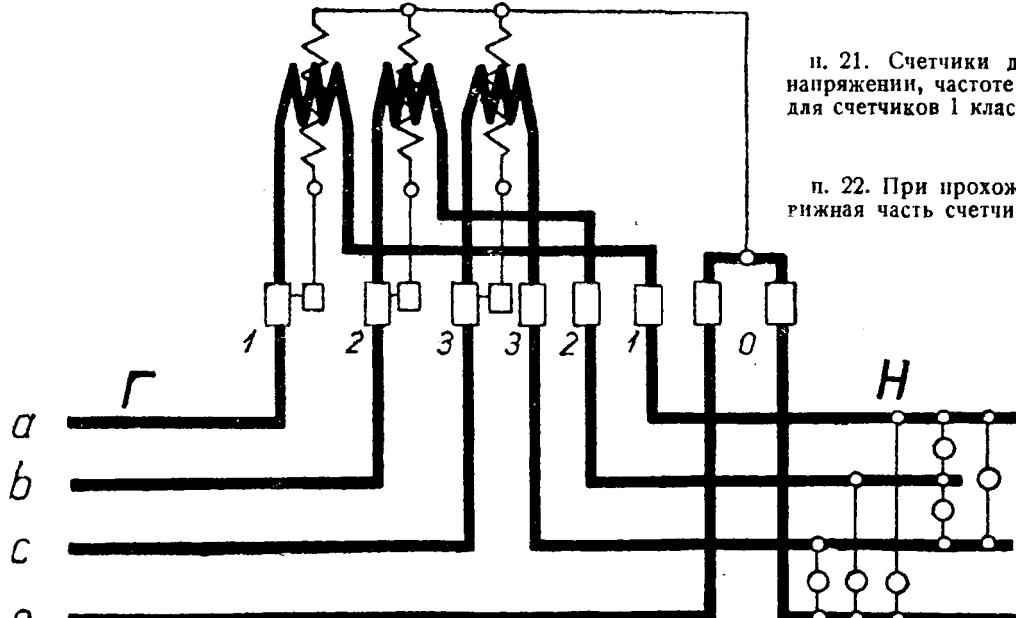


Схема 11а. Счетчик трехфазного тока без трансформаторов—для четырехпроводной системы

Допуски на точность измерения

п. 19. Погрешности счетчика не считаются выходящими из допустимых пределов, если они не отличаются от таковых более чем на 0,2% для I класса и на 0,5% для II класса.

Все отклонения от допустимых погрешностей должны быть одного знака для испытаний по одному и тому же пункту стандарта.

Отклонения могут быть положительными для испытания по одному пункту стандарта и отрицательными по другому.

Погрешности показаний счетчиков

п. 20. Относительные погрешности показаний счетчиков при нормальной температуре (20°C) и номинальных напряжениях и частоте не должны превышать нижеследующих значений:

а) Индукционные счетчики однофазного тока и трехфазного тока при равномерной нагрузке фаз сети.

I класс	II класс
---------	----------

1) при силе тока в 5% номинальной и $\cos\varphi = 1,0 \dots \pm 2,5\%$

2) при силе тока от 10 до 125% номинальной и $\cos\varphi = 1,0 \dots \pm 2,0\%$

3) при силе тока 10% номинальной и $\cos\varphi = 0,5 \dots \pm 2,5\%$

не нормируется

$\pm 2,5\%$

не нормируется

I класс II класс

4) при силе тока от 20 до 125% номинальной для счетчиков I класса и от 20 до 100% номинальной для счетчиков II класса и $\cos\varphi = 0,5 \dots \pm 2\% \quad \pm 4\%$

б) индукционные счетчики трехфазного тока с двумя вращающимися элементами при неравномерной нагрузке фаз сети и номинальном напряжении, приложенном к обоим элементам:

I класс	II класс
---------	----------

1) при силе тока от 10 до 125% номинальной $\cos\varphi = 1,0$ в одном элементе и при отсутствии тока в другом $\pm 2,5\% \quad \pm 3,5\%$

в) Индукционные счетчики трехфазного тока с тремя вращающимися элементами при неравномерной нагрузке фаз сети и номинальном напряжении, приложенном ко всем элементам:

I класс	II класс
---------	----------

1) при силе тока от 20 до 125% номинальной $\cos\varphi = 1,0$ в одном элементе и при отсутствии тока в двух остальных $\pm 2,5\% \quad \pm 3,5\%$

г) Электродинамические и магнитоэлектрические счетчики:

I класс	II класс
---------	----------

1) при силе тока от 10 до 100% номинальной не нормируется $\pm 3,0\%$

д) Электрические счетчики

I класс	II класс
---------	----------

1. при силе тока от 10 до 100% номинальной не нормируется $\pm 3,0\%$

Чувствительность

п. 21. Счетчики должны идти без остановки при номинальных напряжениях, частоте и $\cos\varphi = 1,0$ при нагрузке 0,5% номинальной для счетчиков I класса и 1,0% номинальной для счетчиков II класса.

Самоход

п. 22. При прохождении тока только по параллельной цепи поперечная часть счетчика должна оставаться в покое как при номинальном напряжении, так и при напряжениях, лежащих в пределах от 90 до 110% от номинального.

Влияние неравномерности напряжения

п. 23. Изменение относительной погрешности счетчиков трехфазного тока при неравномерности напряжений по фазам $\pm 5\%$ силе тока от 10 до 100% номинальной, $\cos\varphi = 1,0$ при равномерной нагрузке фаз и при номинальной частоте не должно превышать $\pm 2\%$ для счетчиков I класса и $\pm 4\%$ для счетчиков II класса.

Влияние изменения напряжения

п. 24. Изменение относительной погрешности счетчиков электрической энергии при изменении напряжения на $\pm 10\%$ от номи-

иального и при силе тока от 10 до 100% номинальной, $\cos \varphi = 1,0$ и номинальной частоте не должно превышать $\pm 1,0\%$ для счетчиков I класса и $\pm 2,0\%$ для счетчиков II класса.

Влияние частоты

п. 25. При изменении частоты в пределах $\pm 5\%$ от номинальной и номинальном напряжении изменение относительной погрешности индукционных счетчиков не должно превышать нижеследующих значений:

а) индукционные счетчики однофазного тока:

I класс II класс

- 1) при силе тока от 100% номинальной и $\cos \varphi = 1,0$ $\pm 0,6\%$ $\pm 1,5\%$
- 2) при силе тока 10% номинальной и $\cos \varphi = 1,0$ $\pm 1,0\%$ $\pm 1,5\%$
- 3) при силе тока 100% номинальной и $\cos \varphi = 0,5$ $\pm 1,5\%$ не нормируется

б) Индукционные счетчики трехфазного тока

I класс II класс

- 1) при силе тока от 10% до 100% номинальной и $\cos \varphi = 1,0$ $\pm 1,0\%$ $\pm 1,5\%$
- 2) при силе тока 100% номинальной и $\cos \varphi = 0,5$ $\pm 2,0\%$ не нормируется

Влияние температуры

п. 26. Изменение относительной погрешности счетчиков при изменении температуры окружающей среды на двадцать градусов в обе стороны от нормальной температуры ($20^\circ C$), при $\cos \varphi = 1,0$, при номинальной силе тока и при номинальных напряжениях и частоте не должно превышать для счетчиков I класса $\pm 2,0\%$ и для счетчиков II класса $\pm 2,5\%$.

Перегрузка

п. 27. Счетчики I класса на номинальную силу тока 50 А и ниже и счетчики II класса на номинальную силу тока 10 А и ниже должны выдерживать нагрузку двукратной по сравнению с номинальной силой тока в течение 30 мин.

После охлаждения до температуры $15-25^\circ C$ счетчики I класса не должны изменять своей погрешности; для счетчиков II класса допускается изменение погрешности при нагрузках в 10% и 100% от номинальной при $\cos \varphi = 1$ — на $\pm 1,5\%$.

Счетчики I класса на силу тока выше 50 А и счетчики II класса на силу тока выше 10 А должны удовлетворять тем же требованиям за исключением того, что они испытываются в течение 30 мин. полуторной силой тока.

Динамическая устойчивость

п. 28. Все счетчики I класса и счетчики II класса на силу тока 10 А и ниже должны выдерживать нагрузку тридцатикратной по сравнению с номинальной силой тока в течение 0,5 сек., причем счетчики I класса после этого испытания не должны изменять своей погрешности при любых нагрузках, при $\cos \varphi = 1$ больше чем на $1,5\%$, а счетчики II класса не должны изменять своей погрешности на нагрузках 10% и 100% от номинальной, при $\cos \varphi = 1$ больше чем на $1,5\%$.

Счетчики II класса на силу тока выше 10 А должны удовлетворять тем же требованиям за исключением того, что они испытываются при нагрузке двадцатикратной по сравнению с номинальной силой тока в течение 0,5 сек.

Примечание 1. Испытание счетчиков трехфазного тока как на перегрузку, так и на динамическую устойчивость производится при равномерной нагрузке фаз и симметричном напряжении.

2. Испытание счетчиков по настоящему пункту производится при температуре не выше $25^\circ C$.

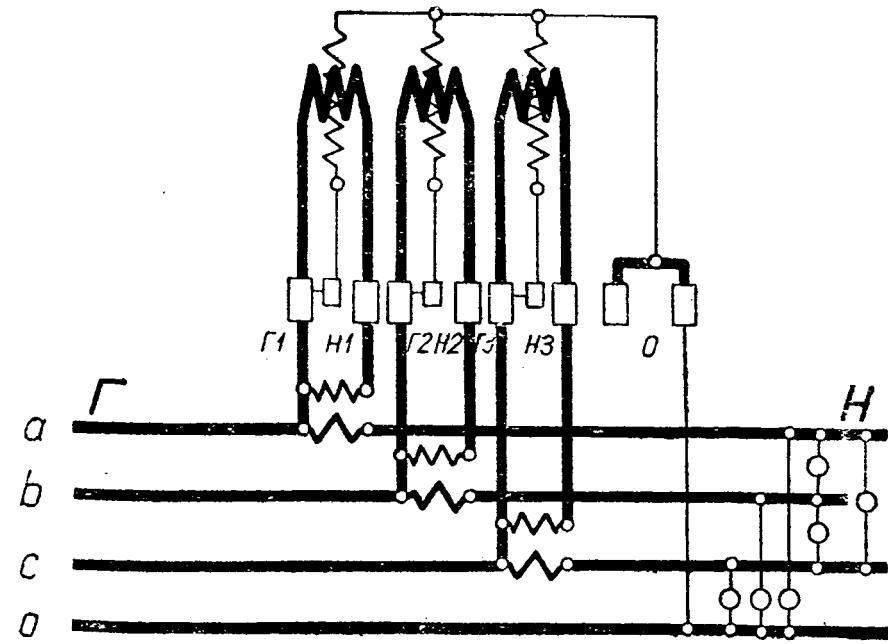


Схема 12. Счетчик трехфазного тока с трансформаторами тока для четырехпроводной системы

Изоляция

п. 29. Изоляция вполовине собранных счетчиков должна выдерживать в течение одной минуты напряжение 2000 В, практически синусоидального тока частотой 50 Hz, при мощности на высоком напряжении не менее 0,5 kW.

Напряжение должно быть приложено между корпусом и металлическими соединенными зажимами счетчика и должно подниматься до указанного выше значения со скоростью около 100 V в секунду и выдерживаться в течение одной минуты с момента достижения испытательным напряжением 2000 V.

Вариации погрешностей

п. 30. Вариации погрешностей счетчика при всех режимах работы и при нагрузках не ниже 10% номинальной не должны превышать: а) для I класса 0,5% и б) для II класса 1% при условии одновременного передвижения не более трех цифр счетного механизма.

Потребление мощности параллельной цепью счетчиков

п. 31. Мощность, потребляемая параллельной цепью счетчика, не должна превышать:

- а) у индукционных счетчиков I класса для номинального напряжения до 500 V и частоты 50 Hz — 2W.

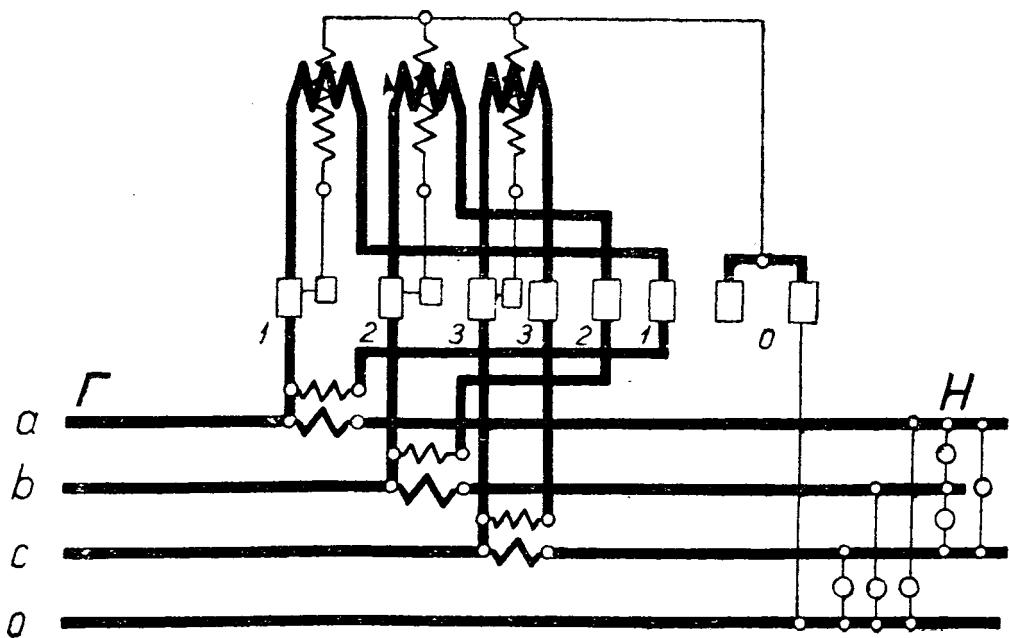


Схема 12а. Счетчик трехфазного тока с трансформаторами тока — для четырехпроводной системы

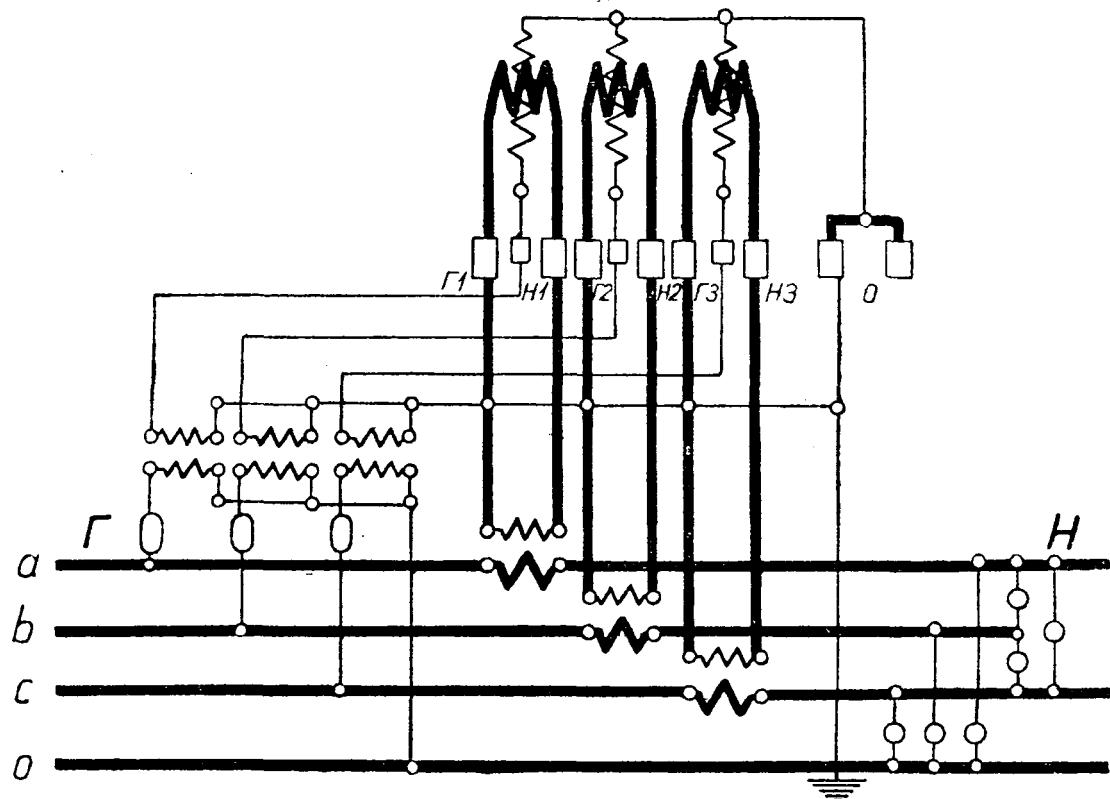


Схема 13. Счетчик трехфазного тока с трансформаторами тока и напряжения — для четырехпроводной системы

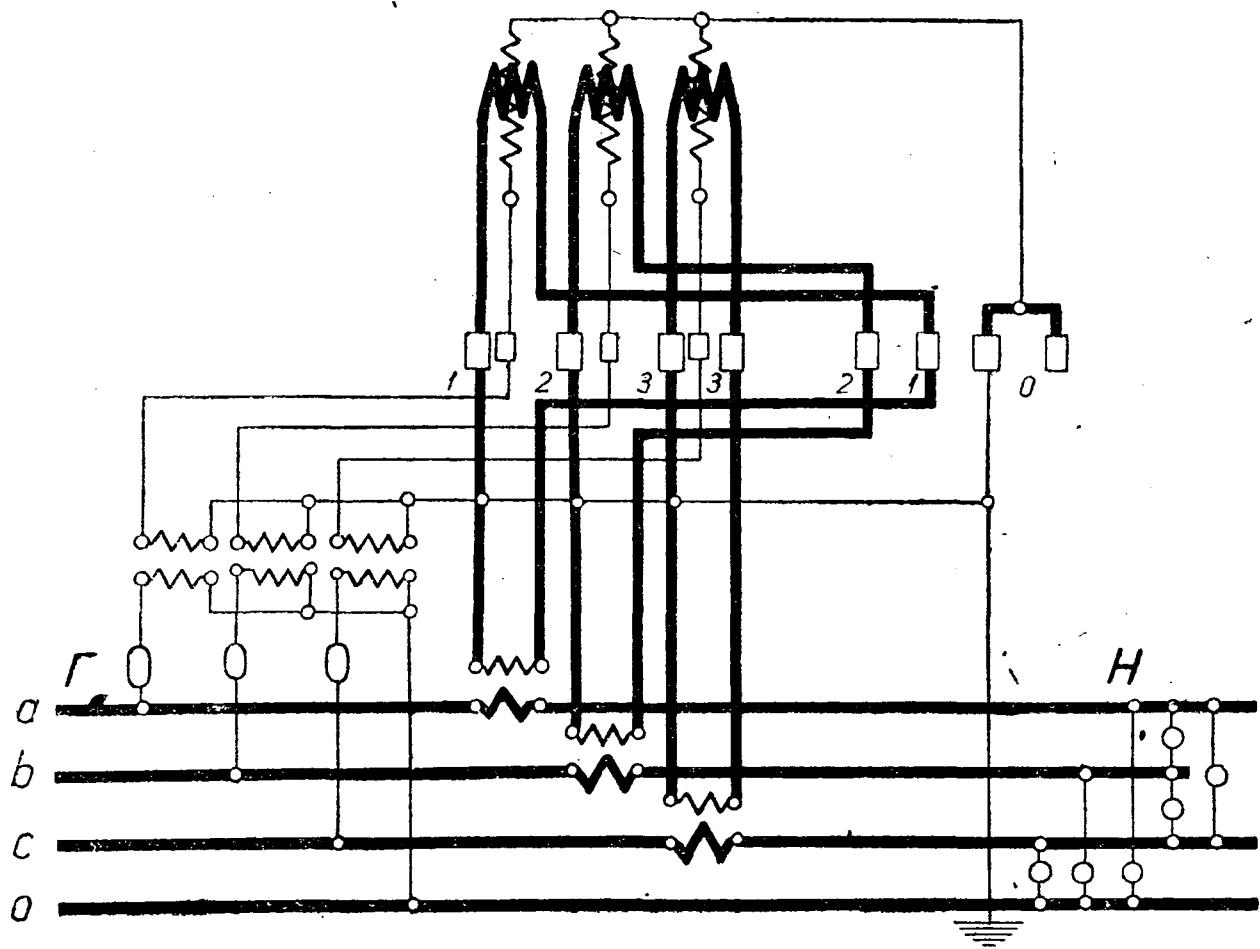


Схема 13а. Счетчик трехфазного тока с трансформаторами тока и напряжения — для четырехпроводной системы

б) у индукционных счетчиков II класса для номинального напряжения до 250 V и частоты 50 Hz—1W; для номинальных напряжений выше 250 V и частоты 50 Hz—1W на каждые 100 V выше 250 V;

в) у электродинамических счетчиков — 2 W на каждые 100 V номинального напряжения. У счетчиков, предназначенных для включения в сеть с частотой ниже 50 Hz, указанная мощность увеличивается обратно пропорционально частоте.

Для счетчиков многофазного тока указанные значения относятся к каждому отдельному врачающему элементу.

Примечание. Удовлетворение требованиям настоящего пункта необязательно для счетчиков специального назначения.

Выносливость

п. 32. После 750-часовой работы счетчика при номинальной силе тока, напряжении и частоте и при $\cos \varphi = 1,0$ относительная погрешность счетчика и чувствительность счетчика не должны выйти из пределов установленных для них значений.

Пределы нагревания

п. 33. Токоведущие цепи счетчика, а также части магнитной цепи и другие металлические части, соприкасающиеся с обмотками, шунты и т. п. при номинальных силах тока, напряжении и частоте не должны нагреваться выше температур, установленных для измерительных приборов (ОСТ 5236).

Влияние наклона

п. 34. При наклоне счетчика от вертикального положения на 5° при нагрузке от 50 до 100% от номинальной относительная погрешность счетчика не должна изменяться больше чем на $\pm 1,0\%$

Г. Маркировка

п. 35. Каждый счетчик должен быть снабжен щитком, на котором должны быть указаны: завод или фирма, заводское обо-

значение типа, класс (только для счетчиков I класса), заводской номер, ОСТ 6225, единицы измерения (прописью без сокращений на русском языке), род тока, номинальные значения силы тока и напряжения и передаточное число. На счетчике переменного тока, кроме того, должна быть указана номинальная частота.

Примечание. Для обозначения I класса счетчика устанавливается знак (1)—единица в круге.

п. 36. Счетчики однофазного тока, предназначенные только для бессрективной нагрузки, должны иметь об этом дополнительные указания; счетчики ампер-часов, градуированные в киловатт-часах, должны иметь надпись, указывающую, для какого напряжения действительны показания счетчика.

п. 37. На счетчиках, включаемых с измерительными трансформаторами, должны указываться две силы тока или два напряжения в виде дроби, в числителе которой должно быть поставлено первичное значение, а в знаменателе — вторичное значение силы тока или напряжения, причем знаком дроби служит двоеточие или горизонтальная черта.

п. 38. На счетчиках трехфазного тока указывается линейное напряжение; на счетчиках, предназначенных для четырехпроводной системы, должно быть обозначено также и фазное напряжение, которое пишется в строку с линейным и отделяется от него косой чертой.

п. 39. На счетчиках энергии постоянного тока трехпроводной системы указывается напряжение, которое должно быть приложено к параллельной цепи счетчика.

п. 40. Щитки, на которых сделаны указанные в пп. 35, 36, 37, 38 и 39 надписи и обозначения, должны быть прикреплены внутри корпуса счетчика так, чтобы щиток был виден при надетом кожухе.

п. 41. Заводской номер должен быть указан как на щитке, так и на цоколе счетчика.

Д. Упаковка

п. 42. Упаковка счетчиков и обозначения на ней должны соответствовать особому ОСТ на упаковку измерительных приборов.

ХРОНИКА

Электроморстрой

Симпатическое управление механизмами системы инженеров В. Г. Мерзлютина и В. В. Гнилорыбова

1. Работа по схеме Леонарда

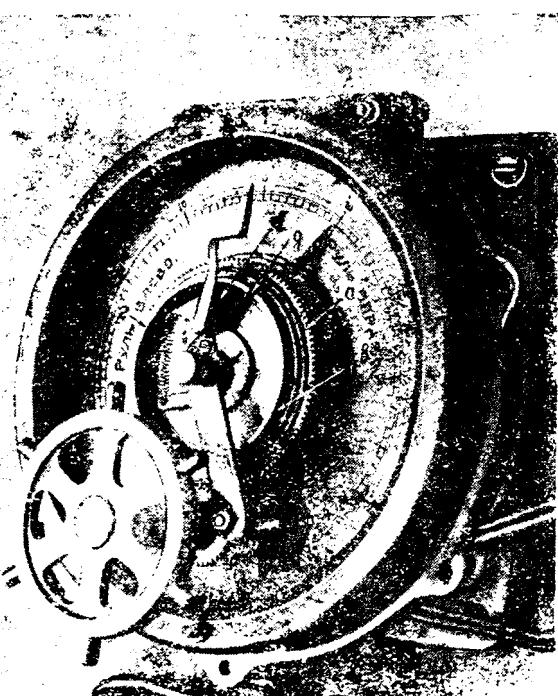
Агрегат Леонарда, представляющий обычно группу мотор-генератор, снабжаются еще добавочными возбудителями для генератора, находящегося на одном с ними валу и снабженного двумя шунтовыми обмотками, дающими приблизительно одинаковые, но противоположные по направлению, магнитные поля. На посту управления имеется диск *a* (рис. 1), снабженный указателем поворота, вращаемый вручную. На этом диске расположены два токоведущих полукольца *b* и *c*, разделенных в двух местах изоляцией *d*, которые электрически связаны каждый в отдельности с одним из концов шунтовых обмоток возбудителя. Общая точка возбуждения подводится к одному из полюсов независимого питания, другой полюс соединен с ползунком *b* движущимся по токоведущим полукольцам. Этот ползунок механически связан со стрелкой прибора синхронной передачи (указателя положения руля), дающей прибор которого установлен на головке руля.

Управление рулем происходит следующим образом:

Диск с полукольцами *a* вручную устанавливается на необходимое деление. Вследствие этого ползунок *b*, находящийся в этот момент на изоляции *d*, сходит с нее, и ток, подведенный через одно из полуколец, проходит в соответствующую обмотку возбудителя, которая, создав поле в определенном направлении, возбудит генератор и, следовательно, заставит электродвигатель руля вращаться в определенную сторону.

Дающий прибор синхронной передачи, установленный на головке руля, начнет тоже передвигать свою стрелку, а следовательно, и стрелку положения руля, расположенного в посту управления. Так как последняя механически связана с ползунком *b*, находящимся на полукольце, то, следовательно, ползунок начнет двигаться в том же направлении. Пройдя тот угол, на который был повернут диск, ползунок опять станет на изоляции между полукольцами и тем самым прервет ток возбуждения возбудителя, а следовательно, и остановит электродвигатель руля. Остановка последнего вызовет остановку дающего прибора на руле, затем указателя в посту и связанного с ним ползунка, находящегося в этот момент на изоляции. При задании углов поворотов в обратном направлении явление происходит в том же порядке с той лишь разницей, что ползунок становится на другое полукольцо и дает ток в другую обмотку

возбуждения возбудителя, создающего ток обратного направления и, следовательно, меняющего главный ток рабочего мотора в обратном направлении. В цепь возбуждения может быть включен реостат, позволяющий по желанию давать ту или иную скорость работы электромеханизма.



Библиотека Российской Федерации научная библиотека www.booksite.ru



Рис. 2

Ввиду того что при схеме Леонарда всегда оказывается влияние остаточного магнетизма генератора, в предлагаемой схеме введено реле, уничтожающее это влияние. Нормально реле замкнуто постоянной пружиной и замыкает якорь генератора на свою шунтовую обмотку. Соединение выполнено таким образом, что ток, получаемый от остаточного магнетизма, создает в магнитной системе генератора поле, направленное навстречу остаточному магнетизму, и тем самым размагничивает генератор. Обмотка реле включена последовательно с шунтом генератора и в момент пуска в ход выключает якорь генератора.

2. Работа при контакторном управлении

В этом случае схема меняется только в том отношении, что вместо двух обмоток возбудителя включаются обмотки двух пусковых контакторов для двух направлений вращения двигателя механизма. Во всем остальном работа системы остается прежней.

Необходимо отметить, что применение этой системы возможно не только для управления рулевым, но и в других случаях, когда требуется симпатическое управление.

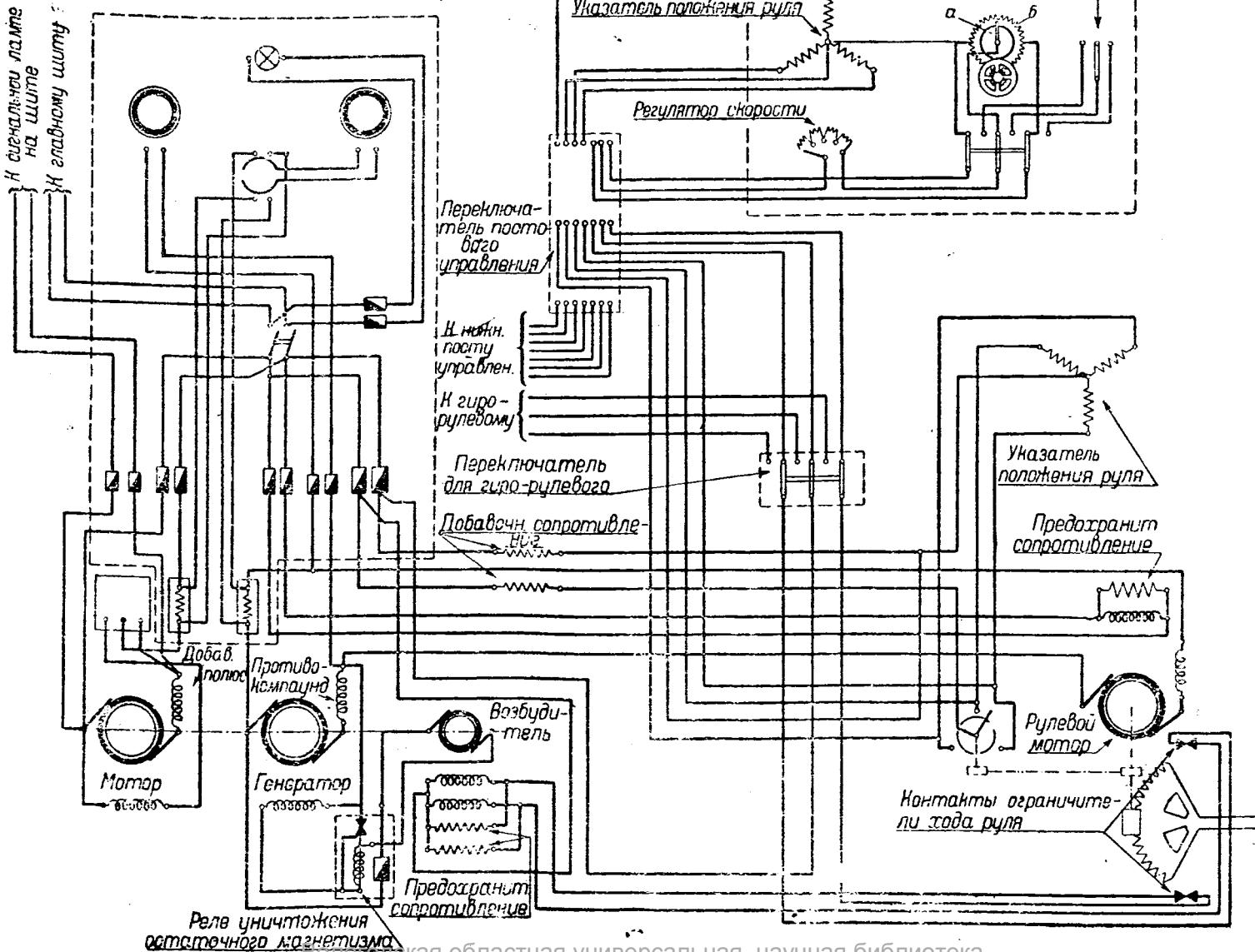
Помещенные в тексте рисунки представляют собой фотографии опытных приборов, выполненных Электроморстровом по эскизам и руководящим указаниям авторов.

На рис. 1 показан внешний вид поста управления, на рис. 2 изображен тот же пост, но в раскрытом виде.

Рис. 3 представляет собой полную схему симпатического управления.

Научно-технический совет одобрил предложенную инженерами Мерзлютиным и Гниловым систему и постановил немедленно изготовить одно опытное устройство для установки на одном из вновь строящихся больших судов для окончательной проверки этой системы. В случае удовлетворительных результатов решено принять ее для всех строящихся электрифицированных судов.

«Электроморстрой»



Всесоюзный электротехнический институт (ВЭИ)

Термостойкий миканит, изготовленный на растворимом стекле

Технология производства указанных миканитов имеет целью получение этих материалов с особой прочностью склейки и связности путем выделения kleющейся состава и применением соответственной температурной обработки.

Испытания термостойкого миканита, проведенные в электрофизической лаборатории ОЭМ ВЭИ, имели целью выяснить:

1) характер воздействия на данный миканит насыщенных паров воды при 18 и 80° С,

2) действие переменных температур до 800° и

3) диэлектрическую прочность в интервале температур 400—800° в направлении, перпендикулярном и параллельном плоскости склейки.

Заключенное исследование показало, что при 18° в условиях относительной влажности (до 95%) миканит достаточно устойчив, и его длительное хранение при относительной влажности (до 70%) можно считать безопасным для качества. Однако ввиду непрерывного роста поглощения влаги (продолжающегося свыше 11 дней) следует стремиться к предохранению миканита от соответствующего воздействия. Вследствие сильного поглощения влаги и заметного расслаивания по плоскости склейки миканит не является устойчивым в отношении воздействия горячих паров воды при 80°.

Воздействие на сухой миканит переменной температуры до 600° в течение 30 мин. не производит каких-либо заметных на-

рушений в прочности склейки, но эти нарушения оказываются заметными после прогрева миканита в течение 30 мин. при 800°. Введение в миканит растворимого стекла в качестве связующего с ростом температуры очень сильно снижает диэлектрическую прочность миканита, особенно в направлении, параллельном плоскости склейки.

Результаты испытаний позволяют рекомендовать миканит, изготовленный на растворимом стекле, для применения в нагревательных элементах при температуре не выше 650°, работающих на переменном токе.

«Муликор» — новый вид керамического материала

В керамической лаборатории Отдела электротехнических материалов ВЭИ получен в результате соответствующего исследования новый вид керамического черепка, получивший название «муликор». По сравнению с фарфоровым черепком «муликор» имеет ряд преимуществ, превышая, например, в два раза фарфор прочностью на разрыв, сопротивление и изгиб. Теплопроводность «муликора» в 10 раз превышает таковую у фарфора. Высокая огнеупорность «муликора» (до 1700° С), термостойкость и твердость (около 9 по шкале Мооса) позволяют найти ему широкое применение не только в качестве материала для электроизолирующего, но и в качестве материала для пирометрических труб, химической посуды, некоторых деталей текстильного оборудования (ведение нитей) и т. д.

А. П. Примаковский

Всесоюзный энергетический комитет рабочей, научной и инженерной технической общественности (ВЭК — РНITO)

В апреле с. г. состоится созываемая ВЭК — РНITO I Всесоюзная конференция по эксплуатации энергоснабжающих систем. Конференция будет посвящена преимущественно вопросам освоения мощностей электростанций, улучшению качества энергоснабжения и диспетчерской службы систем.

Помещая предварительный перечень тем докладов на конференции, мы обращаемся с просьбой к учреждениям, организациям, предприятиям и отдельным лицам, располагающим материалом по темам конференции или замечания и дополнения по ее предварительной программе, сообщить об этом Оргкомитету конференции по адресу: Красная площадь, д. № 9/2.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОСНАБЖАЮЩИХ СИСТЕМ

I. Перечень тем докладов на пленарных заседаниях

1. Задачи конференции т. Ломов
2. Энергоснабжающие системы в СССР и за границей т. Вейц¹⁾
3. Итоги опыта и основные задачи энергоснабжающих систем т. Винтер(Келлен)
4. Принципы проектирования электростанций т. Флаксерман
5. Организация и управление энергоснабжающих систем т. Игнат
6. Освоение мощностей электростанций и надежность электроснабжения. т. Ладогин
7. Научно-исследовательская работа в энергоснабжающих системах и роль научно-исследовательских институтов. т. Юденич
8. Научно-исследовательская работа в энергоснабжающих системах и роль научно-исследовательских институтов. т. Барсуков
9. Научно-исследовательская работа в энергоснабжающих системах и роль научно-исследовательских институтов. т. Турорев
10. Научно-исследовательская работа в энергоснабжающих системах и роль научно-исследовательских институтов. т. Чернышев

Заключительное заседание Пленума

Задачи ВЭК — РНITO и работа энергоячеек. т. Кузнецов

II. Перечень тем докладов по теплотехнической секции

1. Основные технические проблемы теплосилового хозяйства энергоснабжающих систем. Ленэнерго
2. Топливоснабжение электростанций. Размещение резервов топлива в электроснабжающей системе. Главэнерг
3. Основные данные по освоению местных низкосортных топлив. Добронравов

- a) штыба
- b) подмосковного угля
- c) фрезерного торфа

4. Освоение отечественного энергетического оборудования

- a) котлы
- b) турбины

5. Анализ аварий теплосилового оборудования по машинному залу

6. Практика эксплуатации котлов высокого давления на Березниковской тэц

7. Химическое дело на электростанциях Донсевукрэнерго

8. Эксплуатация теплофикационного оборудования и тепловых сетей. Наиболее характерные аварии, нормальные ремонты.

9. Учет теплосилового оборудования и надзор за его ремонтом и эксплуатацией.

10. Производственно-исследовательская работа в Ленэнерго по теплотехнике и текущий контроль за качеством топлива, масла и теплоизоляции.

III. Перечень тем докладов по электротехнической секции

1. Техническое руководство эксплуатацией энергоснабжающих систем. Мосэнерго
2. Освоение генераторов отечественного производства. Электросила
3. Анализ аварий в машинном зале. Ленэнерго
4. О допустимых колебаниях напряжения в сложных сетях. Теплоэлектро-проект.
5. О работе электроустановок при питании током неизменной частоты и напряжения. Инст. Пром-энергетики УССР.
6. Устойчивость параллельной работы станций систем. Мосэнерго
7. Заземление в эксплуатации современного энергобезопасства. Донэнерго
8. Гарькэнерго
9. Установка в эксплуатации современного энергобезопасства. Ленэнерго

Донэнерго
Мосэнерго
Шатура

Лукашик
Самойлов

ШККБ
Ленэнерго
ЯМЗ
им. Сталина

Гринберг

ВИТГЭО

Березники

Зайченков

Донэнерго

Четвериков

Ленэнерго,

Ланин

Мосэнерго

Брик

Ленэнерго

Григорьев

Ленэнерго

Гаврилов

- Организация релейной службы, обслуживание и опыт эксплуатации релейной защиты.
- Перенапряжения и борьба с ними в электроснабжающих системах.
- Гололед и борьба с ним на линиях сильного и слабого токов в Донбассе.
- Эксплоатация, ревизия и ремонт генераторов.
- Эксплоатация трансформаторных установок.
- Эксплоатация технических измерительных приборов и учет электроэнергии.
- Техническое обслуживание электросетей.
- Собственные нужды Зугрэс.
- Эксплоатационные электротехнические исследования, испытания и измерения.
- Борьба за повышение коэффициента фи в системах.
- Освоение новых мощностей Донэнерго.

IV. Перечень тем докладов по гидротехнической секции

- Пусковой период и освоение Днепровской электросистемы
- Основное гидромеханическое оборудование ДГЭС, система регулирования ДГЭС и их освоение.
- Характеристика грозоупорности системы ДГЭС и опыт первого года эксплуатации.
- Релейная защита Днепровской электросистемы.
- Эксплоатация гидротехнических сооружений ГЭС
- Эксплоатация гидротехнического оборудования гидростанций.
- Использование водной энергии станции.
- Особенности эксплуатации гидростанций, расположенных в горных районах.
- Эксплоатация деривационных сооружений.
- Эксплоатация автоматической гидростанции (Эгрэс 2)

Мосэнерго	<i>Кашталев</i>
Ленэнерго	<i>Виноградов</i>
Мосэнерго	<i>Отрадин</i>
Донэнерго	<i>Гроб</i>
Донэнерго	<i>Шидловский</i>
Мосэнерго	<i>Поляк</i>
Ленэнерго	<i>Никольский</i>
Донэнерго	<i>Валицкий</i>
Донэнерго	<i>Васильев</i>
Ленэнерго	<i>Сухотинский</i>
Донэнерго	<i>Берман и Микульчик</i>
Ленэнерго	<i>Прилуцкий</i>
Главэнерго	<i>Гинзбург</i>
Мосэнерго	<i>Секей</i>
Ленэнерго	<i>Быков</i>
Донэнерго	<i>Швецов</i>
Донэнерго	<i>Будницкий</i>

V. Перечень тем докладов по производственной секции

А. Планово-экономическая п/секция	
1. Пределы использования мощностей станций энергоснабжающих систем	МЭИ
2. Планирование работы энергоснабжающей системы, исходя из потребности энергии, развития системы учета ремонтов и топливной политики:	
а) годовое	Донэнерго
б) месячное	Ленэнерго
3. Планирование и учет расхода топлива.	Ленэнерго
4. Техническое планирование развития электроснабжающей системы и основной коммутационной схемы.	Мосэнерго
5. Технико-экономические и эксплоатационные показатели, характеризующие экономичность и рациональность эксплоатации ТЭЦ.	
6. Регулирование графиков нагрузки потребителей (электрических и тепловых).	Ленэнерго
7. Основные принципы и методы проведения хозрасчета в энергоснабжающей системе и внутри предприятий.	Ленэнерго
8. Себестоимость энергии в системе	ЭИИ Ак. Наук
B. Секция организации управления и технического обслуживания энергоснабжающих систем	<i>Грановская</i>
1. Диспетчерское управление систем.	Ленэнерго
2. Организация оперативного управления на станциях.	Мосэнерго
3. Организация управления системами на примере Донэнерго.	Донэнерго
4. Применение телемеханики и автоматики в эксплуатации станций и сетей.	ДГЭС
5. Основы службы слабого тока в энерготехнологии.	Ленэнерго
6. Система показателей энергоснабжающей системы.	Герасимов
7. Технико-экономические показатели ТЭЦ.	ЭИИ Ак. Наук
8. Планирование и учет труда	<i>Гуревич</i>
9. Научно-исследовательская работа в энергоснабжающей системе и роль научно-исследовательских институтов.	Мосэнерго
	НКС
	Главэнерго
	Ленэнерго
	Ленэнерго
	Басов
	Максимов
	ВИТГЭО
	Мосэнерго
	Вобашев

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

Уважаемый тов. редактор!

Во избежание возможных недоразумений и неправильных толкований прошу напечатать в журнале „Электричество“ в дополнение к моей статье „Новая векторная диаграмма синхронного генератора“ („Электричество“ № 14 за 1983 г., стр. 39 и далее) ниже следующее.

1. Примерный расчет, приведенный в конце статьи, относится не к выпускаемому в настоящее время заводом „Электросила“ турбогенератору 50 000 kW, а к одному из его расчетных вариантов, имеющему существенные отличия от варианта основного.

2. Под магнитным потоком $\varphi = 164 \cdot 10^6$ понимается поток коллекторного хода упомянутому расчетному варианту.

3. Целью приводимого в конце статьи примерного расчета является сравнение вычисленного предлагаемым мною методом магнитного потока с потоками, рассчитанными, с одной стороны, по напряжению в холостом ходу и, с другой стороны, по э. д. с. машины при нагрузке.

Целью приводимого примерного расчета не является критика заводского метода расчета, как может быть неправильно понято из-за недостаточно точной формулировки конца статьи. Заводской метод, учитывающий ряд других факторов, дает величины потерь и ампервитков, согласующиеся достаточно точно с данными опыта.

Инж. Е. Комар

Электромашиностроение

С. И. ФЕННЕIMER. Некоторые факторы, определяющие превышение температуры якоря электрической машины, „Тр. АИЕЕ“, июнь 1933, стр. 325—331. Доклад, представленный на зимнюю конференцию „АИЕЕ“ в январе 1933 г.

Автор реферируемой статьи много лет работал на заводах американской фирмы Westinghouse, занимаясь исследованием вентиляции и нагрева электрических машин и, в частности, турбогенераторов. В настоящей статье автор ставит себе целью предложить простой метод косвенного определения установившегося перегрева обмотки и железа, общий для машин большой мощности всех типов, и метод экспериментального определения характеристических параметров, которые могли бы служить инженеру, рассчитывающему машину, более совершенным критерием к оценке перегрева электрической машины.

Для поставленной задачи автор использует данные опыта холостого хода с нормальным напряжением и данные короткого замыкания с нормальным током.

Для любого отдельного элемента машины, состоящего из одного зубцового деления, пакета железа и уложенной в пазу части обмотки длиной, равной одному пакетному делению, автор дает уравнения:

при холостом ходе

$$P_2 = K_{22}\theta_2 + K_{21}(\theta_2 - \theta_1), \quad (1)$$

при коротком замыкании

$$P_1 = K_{11}\theta_1 + K_{12}(\theta_1 - \theta_2), \quad (2)$$

где P_1 и P_2 — потери в железе и меди рассматриваемого элемента соответственно, θ_1 и θ_2 — перегревы железа и меди соответственно, K_{11} и K_{22} — эквивалентная теплопроводность рассматриваемого элемента пакета и обмотки по отношению к охлаждающему воздуху, K_{12} и K_{21} — эквивалентная теплопроводность от меди к железу и наоборот, $K_{11}\theta_1$ и $K_{22}\theta_2$ — потери (тепловые потоки), отдаваемые медью и железом непосредственно на воздух, $K_{12}(\theta_1 - \theta_2)$ и $K_{21}(\theta_1 - \theta_2)$ — тепловые потоки, отдаваемые медью железу, и наоборот. Эти уравнения автор иллюстрирует схемой эквивалентной тепловой цепи (рис. 1) и затем строит подобную ей схему электрической цепи, проводя аналогию между падением напряжения (э. д. с.) и перегревом (температурой), между током и тепловым потоком (количеством потерь), между эквивалентными теплопроводностями и проводимостями электрической цепи.

Далее автор указывает, что при нагрузке тепловые потоки, обусловленные потерями в меди и в железе, будут взаимно накладываться и создадут такое результирующее распределение температур, при котором оба уравнения (1) и (2) будут удовлетворяться одновременно. Соответственно этому, решая совместно уравнения (1) и (2), легко получить уравнение для температуры меди и железа

$$\theta_1 = R_{11}P_1 + R_{12}P_2 \quad (5)$$

и

$$\theta_2 = R_{21}P_1 + R_{22}P_2, \quad (6)$$

где R_{11} , R_{22} , R_{12} и R_{21} представляют собой тепловые сопротивления, а P_1 и P_2 — потери в меди и железе.

Если воздух, охлаждающий рассматриваемый элемент, имеет значительный перегрев над температурой воздуха, входящего в машину, то уравнения для температур меди и железа выражаются соответственно

$$\theta_1 = R_{11}P_1 + R_{12}P_2 + \theta_a \quad (13)$$

и

$$\theta_2 = R_{21}P_1 + R_{22}P_2 + \theta_a, \quad (14)$$

Уравнениями (5) и (6) или (13) и (14) автор и предлагает пользоваться для подсчета перегрева обмотки и железа при нагрузке.

Большинство тепловых сопротивлений, входящих в эти уравнения, автор рекомендует определять по данным опыта холостого хода и короткого замыкания, а именно: при холостом ходе $P_1 = 0$, и из уравнения (13) получается

$$R_{12} = \frac{\theta_1 - \theta_{a2}}{P_2}, \quad (15)$$

а из уравнения (14)

$$R_{22} = \frac{\theta_2 - \theta_{a2}}{P_2}; \quad (16)$$

при коротком замыкании $P_2 = 0$ и соответственно получается

$$R_{11} = \frac{\theta_1 - \theta_{a1}}{P_1} \quad (17)$$

и

$$R_{21} = \frac{\theta_2 - \theta_{a1}}{P_1}. \quad (18)$$

Здесь θ_{a2} и θ_{a1} — перегрев воздуха соответственно при опыте холостого хода и короткого замыкания.

Величины тепловых сопротивлений R_{11} , R_{22} , R_{12} и R_{21} по мысли автора являются теми параметрами, которые могут быть полезны

инженерам, производящим расчеты электрических машин. Вычисление тепловых сопротивлений для удобства их сравнений рекомендуется производить, относя потери P_1 и P_2 или на единицу длины на одно зубцовое деление, или на единицу длины периферии внутренней расточки, или на единицу ее поверхности.

Для подсчета P_1 автор рекомендует брать сумму основных и добавочных потерь в меди; для подсчета P_2 — только потери в зубцах. Измерение температуры он рекомендует производить при помощи термодетекторов, встроенных в обмотку и в железе зубцов, но если это невозможно, допускает и обычные методы измерения; при измерении по сопротивлению рекомендует температуру экстраполировать на момент выключения машины. Когда перегрев обмотки для номинальной нагрузки получается значительно отличающимся от перегрева при коротком замыкании, рекомендуется делать поправку на возрастание потерь в меди. Тогда температура меди

$$\theta_1 = \frac{R_{11}P_1'(1 - \alpha\theta') - R_{12}P_2 + \theta_a}{1 - R_{11}P_1'\alpha} \quad (20)$$

и температура железа

$$\theta_2 = R_{12}P' [1 + \alpha(\theta_1 - \theta_1')] + R_{22}P_2 + \theta_a, \quad (22)$$

где P_1' — потери в меди, включая и добавочные, рассчитанные на температуру меди при коротком замыкании, θ_1' — температура меди при коротком замыкании, $\alpha = \frac{234,5 + \theta_1' + \theta_0}{\theta_0}$ — температурный коэффициент меди при $\theta = \theta_1' + \theta_0$, θ_0 — температура воздуха, входящего в машину, θ_a — температура охлаждающего воздуха в рас-

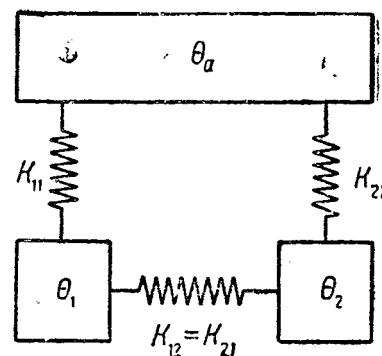


Рис. 1

сматриваемом месте. Последнюю автор рекомендует определять из выражения

$$\theta_a = \theta_{at} \frac{P - P_c}{P} \quad (23)$$

или

$$\theta_a = 1,765 \frac{P'}{Q},$$

где θ_{at} — полный перегрев воздуха в машине, P — полные потери машины, P_c — сумма потерь в ядре (сердечнике) и головина суммы потерь в зубцах и в меди, P' — полные потери (W), Q — объем воздуха (куб. футы в минуту).

Применение метода иллюстрируется примером.

Далее указано, что при измерении температур по термометру определить тепловые сопротивления нельзя, и температура при нагрузке определяется простым сложением температур, определенных при холостом ходе и коротком замыкании.

Результаты расчетов сопоставлены в табл. 1.

Таблица 1

Способ и место измерения перегрева	Повышение температуры (перегрев)			
	Нагрузка расчет	100% опыт	Нагрузка расчет	125% опыт
По детектору на меди обмотки	63,3	61,5	88,4	84,2
По детектору в железе зубцов	57,2	58,5	72,7	не сделан
Средней по сопротивлению обмотки	36,8	35,0	51,0	58,5
Термометр на поверхности железа	40,0	39,0	54,0	55,5
Термометр на лобовых соединениях	39,2	38,0	52,5	49,3

В заключение автор отмечает практическое значение предлагаемого им метода определения перегрева, соответствующего полной нагрузке машин большой мощности, которые не удается или оказывается неэкономичным испытывать под нагрузкой на заводе. Определение нагрева при холостом ходе и коротком замыкании не встречает затруднений за исключением режима короткого замыкания индукционных моторов. Для последнего случая автор рекомендует режим тормоза при вращении с номинальным числом оборотов под таким напряжением, чтобы по обмоткам статора протекал нормальный ток. При этом он отмечает возможность преувеличения нагрева за счет сильного возрастания потерь в роторе.

Практическое значение введения понятий о тепловых сопротивлениях по мнению автора велико, так как существующие до сих пор методы оценки температур, применяемые при расчетах электрических машин, себя не оправдывают. Выступившие в прениях по докладу Fechheimer'a инж. Snell, работающий на заводах GE, инж. Taylor и Weber критиковали предложенный метод определения температур, отмечая возможность ошибки: 1) из-за того, что потери в железе при коротком замыкании принимаются равными нулю, 2) из-за того что потери в меди при холостом ходе принимаются равными нулю и 3) из-за перегрева воздуха за счет больших механических потерь на вентиляцию. Кроме того, была отмечена сложность введения поправки на увеличение потерь в меди и сложность расчета нагрева воздуха при нагрузке. Snell и Taylor указали, что автор согласился с ними, что для турбогенераторов предлагаемый метод определения потерь неприменим.

Для турбогенераторов общее признание получил метод изложения перегревов трех опытов $\theta_{xh} + \theta_{kz} - \theta_{xh} = \theta_{nagr}$, точности которого иллюстрировали инж. Snell и Taylor.

Таблица

Повышение температуры сверх температуры входящего воздуха (°С)

№ термодетекто-ров	Холостой ход без возбуждения (1)	Холостой ход нормального возбуждения (2)	Короткое замыкание (3)	(2) — (1) + (3)	Полное расчетное повышение температуры при нормальной нагрузке	Полное повышение температуры при нормальной нагрузке по испытанию
1	9,5	20,3	42,4	53,2	54,3	53,2
2	9,6	20,6	33,4	44,4	45,2	45,7
3	11,1	27,4	28,0	44,3	45,1	41,3
4	10,5	21,7	37,8	49,0	49,8	48,6
5	10,4	21,0	38,8	49,4	50,2	52,5
потери на воз- буждение в (kW)	20,1	22,6				

Добавочное повышение температуры воздуха при полной нагрузке $1,765 k (76,8 - 20,1 - 22,6) / 80000 = 0,75^\circ$ по Snell'ю

Таблица 3

Машина	1	2	3

Перегрев обмотки, измеренной термометром сопротивления (по Taylor'у):

1) за счет одних потерь трения (и на вентиляцию)	5,6	9,0	11,5
2) добавочный за счет потерь холостого хода	7,2	13,7	11,5
3) добавочный перегрев за счет потерь короткого замыкания	19,5	9,7	7,4
4) поправка на увеличение потерь возбуждения при полной нагрузке	1,8	2,8	1,8
5) вычисленное повышение температуры при полной нагрузке (1) + (2) + (3) + (4)	34,1	35,2	32,2
6) действительный перегрев, измеренный тем же детектором сопротивления при полной нагрузке	34,5	35,6	31,2

Практическое значение введения понятия тепловых сопротивлений не оспаривалось, но было указано на необходимость уточнения метода их определения введя в рассмотрение добавочные потери в железе при коротком замыкании и в меди при холостом

ходе. В ответе на дискуссию Fechheimer указал, что целью доклада было дать простой, но достаточно точный метод. Предлагаемые уточнения едва ли оправдывают себя, так как вводят усложнения, а инженер, ведущий расчеты, не имеет времени для сложных расчетов.

Инж. П. Шитов

H. A. WINNE, Вспомогательное электрооборудование листопрокатных станов „Blast Furnace and Steel Plant“ № 1, 1933, стр. 35.

В настоящее время в САСШ наблюдается оживление в области оборудования вспомогательных механизмов листопрокатных станов. Было установлено значительное количество автоматических захватывающих приспособлений для этих станов. Вследствие чрезвычайно быстрой работы этих приспособлений, требующей реверсирования до 40 раз в минуту, возникла необходимость в специальных моторах и аппаратуре управления к ним. В большинстве случаев применялись асинхронные моторы с короткозамкнутым ротором, и вентиляторным охлаждением, а в некоторых случаях — моторы постоянного тока с регулируемой скоростью.

Достижением в области захватывающих приспособлений является применение фотоэлементов в качестве концевых выключателей для управления автоматической работой этих приспособлений. Эти фотореле работают с большим успехом и обладают рядом бесспорных преимуществ в сравнении с механическими выключателями. Фотореле дает импульс всегда в тот момент, когда конец листа проходит между ним и источником света. Механический же выключатель может подействовать слишком рано, если конец листа случайно отогнется вверх, так как при этом рабочий рычаг может подняться прежде, чем конец листа достигнет требуемого положения. Для фотореле также не требуется никаких механических передач, подшипников и т. д., которые необходимы для механического выключателя.

Изобретено и осуществлено приспособление, позволяющее прокатчику получать автоматически совершенно точные показания длины листа после каждого прохода. Маленький генератор «Сельсин» соединен через зубчатую передачу со станом, так что его скорость пропорциональна скорости прохода листа через стан. Приемник «Сельсин» соединен посредством электромагнитной муфты с прибором, указывающим длину листа. Электромагнитная муфта управляема фотоэлементом или выключателем, который приводится в действие листом во время прохождения последнего через стан. Когда передний конец листа проходит мимо фотоэлемента, в электромагнитную муфту поступает ток, и последняя соединяет указатель длины с приемником «Сельсин», который постоянно вращается со скоростью, соответствующей скорости движения листа. Таким образом указатель начинает вращаться и продолжает вращаться до тех пор, пока задний конец листа не пройдет мимо фотоэлемента; в этот момент муфта выключается и отсоединяет указатель от приемника «Сельсин». Указатель в этот момент дает показание полной длины листа. Приспособление можно отрегулировать так, чтобы стрелка указателя немедленно вернулась в начальное положение, или так, чтобы она сохранила конечное положение в течение 1—2 сек. Это приспособление экономит много рабочего времени, так как отпадает необходимость остановки листа и измерения его длины. Оно может быть легко приспособлено к существующим захватывающим механизмам прокатных станов.

Инж. Р. Хайнер

Электроматериалы

R. FERRIFR, Бетон как электроизолирующий материал „Revue Générale de l'Electricité“ № 22, 3 июня 1933, стр. 731.

В результате исследовательских работ, проводившихся в течение ряда лет на французских электрических железных дорогах инж. Е. Ламбертом выявлена возможность широкого применения в качестве дешевого электроизолирующего материала бетона надлежаще подобранным составом. Удельное объемное сопротивление сухого бетона порядка $10^{12}\Omega\cdot\text{см}$. Эта величина сильно снижается от действия влаги, но по прекращении воздействия влаги быстро восстанавливается. Из бетона были изготовлены подвесные изоляторы и изолирующие блоки для третьего (контактного) рельса электрической железной дороги с рабочим напряжением 1500 V постоянного тока. Такой блок, перекрывавшийся в сухом состоянии при 77—78 kV, былложен на 45 мин. в воду; тотчас после того, как он был вынут из воды, он показал напряжение перекрытия 28 kV через 1 мин., 36 kV через 2 мин., а через 3 мин. 41 kV. Сопротивление блоков в сухом состоянии от 50 до 80 MΩ.

Инж. Б. М. Тареев

ОНТИ — ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Технический редактор Г. Г. Андреев

Сдано в набор 21/1 1934 г. Подписано к печати 5/III 1934 г. Бумага 62×94. Печатных листов 7,5, печатных знаков в листе 78 800

Уполн. Главлита В-78970. 1-я Журналная тип. ОНТИ НКТП СССР. Москва. Денисовский пер., 30. Заказ 196. Тираж 10 000 + 235 экз.

РЕДКОЛЛЕГИЯ: инж. Е. С. Аватков, проф. В. И. Вейд, инж. В. Н. Главанов, инж. М. Н. Грановская, инж. Я. А. Климовидский, акад. Г. М. Кржижановский, инж. И. С. Палицын, М. И. Рубинштейн, инж. Н. А. Сазонов, проф. М. А. Шателен, проф. Я. Н. Шпильрейн.

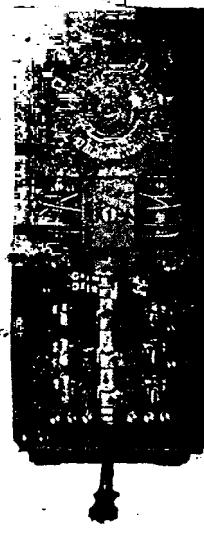
ОТВ. РЕДАКТОР: инж. Н. А. Сазонов

Библиотека Российской Федерации
Универсальная научная библиотека
www.biblio.ru

ФАБРИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ Фр. САУТЕР, Акц. Общ. в БАЗЕЛЕ

Fabrik elektrischer Apparate Fr. SAUTER, A.-G., BASEL

Мы строим:



Автоматический чехол выключатель
электрическим заводом.

6070

1. Астрономические электрические часовые выключатели для автоматического зажигания и тушения уличного освещения,
• для силы тока от 2 до 600 А и для напряжения от 100 до 8000 В.
2. Автоматические выключатели, действующие на расстоянии
(реле: ртутные, магнитные и моторные).
3. Электрические автоматы для счетчиков 2 и 3-го тарифа, холодильных машин, насосных установок, фабричной сигнализации, регулирования уличного освещения, зарядки аккумуляторов и т. п.

Наши изделия выставлены на постоянной выставке „Технопромимпорта“.

Поставщики Элайтропорта.

Запросы могут быть составлены на русском языке.

Sachgemäße Beratung
in allen Fragen

der

ausländischen Reklame
in der Sowjetunion

bietet unverbindlich:

Generalvertretung des
Staatl. Anzeigenbüros
„Inreklama“, Moskau,
in: Deutschland,
Österreich, Tschecho-
Slovakei, Holland,
Schweden, Norwegen
und Dänemark:

industrie- und Handelsreklame
„TORGPROM“ G.M.B.H.

Berlin w. 35, Kurfürstenstr. 33

Tel. B 1 Kurfürst 2264

L.F.I.
МИЛАН Муссолини №5 ИТАЛИЯ



Трехполюсные измерительные выключатели до 230 кВт.

Более 2000 наборов на заводе

Арматуры высокого напряжения



Выписка заграничных товаров может последовать лишь на основании действующих в СССР правил о монополии
и внешней торговли. При всех вопросах к иностранным фирмам о присыпке каталога образцов и проспектов
просим ссылаться на номер нашего журнала.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

ИЗВЕСТИЯ ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ Орган Всесоюзного объединения электрослаботочной промышленности (ВЭСО)
Рассчитан на инженеров, техников, студентов и высококвалифицированных рабочих.
Подписная цена: на год — 12 р.,
на 6 мес. — 6 р.
10 номеров в год. Отдельный номер — 1 р. 20 к.

Электричество Орган Главэнергопрома, ВЭНИТО и Энергетического института Академии наук СССР
Рассчитан на квалифицированных работников электро-промышленности и электрохозяйства.
Подписная цена: на год — 25 р.,
20 номеров в год. на 6 мес. — 12 р. 50 к., на 3 мес. — 6 р. 25 к. Отд. номер — 1 р. 25 к.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

ОРГАН ГЛАВЭНЕРГО
Рассчитан на инженеров-энергетиков и учащихся вузов.
Подписная цена: на год — 18 р.,
12 номеров в год. на 6 мес. — 9 р., на 3 мес. — 4 р. 50 к. Отд. номер — 1 р. 50 к.

ИЗВЕСТИЯ ВСЕСОЮЗНОГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени Ф. Дзержинского
Орган ВТИ им. Дзержинского.
Рассчитан на инженеров, техников, студентов вузов.
Подписная цена: на год — 20 р.,
10 номеров в год. на 6 мес. — 10 р. Отд. номер — 2 р.

Дизелестроение Орган Государственного Всесоюзного дизельного объединения и Научно-исследовательского дизельного института
Рассчитан на ИТС заводов, сотрудников институтов, преподавателей вузов и техникумов и инженерно-технический персонал дизельных установок и судов.
Подписная цена: на год — 10 р. 50 к.,
6 номеров в год. на 6 мес. — 5 р. 40 к.
Отд. номер — 1 р. 50 к.

ТЕПЛО и СИЛА

ОРГАН ГЛАВЭНЕРГО
Рассчитан на инженеров-энергетиков, инженеро-технических работников электростанций и студентов вузов.
Подписная цена: на год — 18 р.,
12 номеров в год. на 6 мес. — 9 р. 50 к.
Отд. номер — 1 р. 50 к.

Гидротехническое строительство Орган Гидротехнограда, Сектора вспомогательных ресурсов Госплана СССР, Института гидротехники и гидрорыболовства, Насосостроительного института строительной гидротехники в академии гидрологии, Совета индустрии и сельского хозяйства.
Рассчитан на инженерно-технических работников, занятых производством в эксплуатации гидротехнических сооружений.
Подписная цена: на год — 15 р., на 6 мес. — 7 р. 50 к.
10 номеров в год. Отдельный номер — 1 р. 50 к.

ВЕСТНИК КОЧЕГАРА

Ежемесячный массовый журнал Государственного центрального бюро по обучению рабочих теплоэнергетического хозяйства.
Рассчитан на кочегаров стационарных и судовых котельных установок, на машинистов, на низший и средний административно-технический персонал.
Подписная цена: на год — 3 р. 60 к.,
12 номеров в год. на 6 мес. — 1 р. 80 к., на 3 мес. — 90 к.
Отдельный номер — 30 к.

Подписку на журналы и деньги направляйте по адресу: Москва, 19, Гоголевский бульвар, 27, Главной конторе периодических изданий ОНТИ — "Техпериодика".
Полиссируйте плату переводите по почте или перечисляйте на расчетный счет Гл. к-ра "Техпериодика" ОНТИ № 3708 в Моск. обл. к-ре Госбанка. В заявке (подписке) указывайте дату перевода или № и дату аванса банка.
Подпись принимается также отдельными, наименованиями и уполномоченными ОНТИ, снабженными соответствующими удостоверениями, общеизвестными сборщиками подписи на предприятиях, всеми отделениями и магазинами Когиза, всеми почтовыми отделениями и письменными салонами.
Вниманию подписчиков. Главной конторой "Техпериодика" ОНТИ организована специальная экспедиция для обеспечения аккуратной и своевременной рассыпки журналов подписчикам. С хлебами на аккуратное получение журналов 1934 г. обращайтесь непосредственно в адрес конторы.
Все журналы ОНТИ экспедируются по ярлычной (адресной) системе. Подписка меньше чем на 3 мес. не принимается.

ВЕСТНИК ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ

ОРГАН ГЛАВЭНЕРГОПРОМА

Рассчитан на инж.-технический персонал заводов ВЭТ и инженеров-электротехников.
Подписная цена: на год — 18 р., на 12 номеров в год. на 6 мес. — 9 р. на 3 мес. — 4 р. 50 к.
Отдельный номер — 1 р. 50 к.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОЗРЕНИЕ

Выпуск ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

РЕФЕРАТНЫЙ ОРГАН ГЛАВЭНЕРГО

Рассчитан на инженеров и техников.

Подписная цена: на год — 12 р., на 10 номеров в год. на 6 мес. — 6 р. Отд. номер — 1 р. 20 к.

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И ЭЛЕКТРОМОНТЕР

ОРГАН ГЛАВЭНЕРГОПРОМА

Рассчитан на квалифицированного электромонтера, младший и средний текперсонал и прорабов.
Подписная цена: на год — 8 р. 40 к., на 6 мес. — 4 р. 20 к., на 3 мес. — 2 р. 12 номеров в год.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОЗРЕНИЕ

Выпуск ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ

РЕФЕРАТНЫЙ ЖУРНАЛ ГЛАВЭНЕРГО

Рассчитан на инженеров-теплотехников.
Подписная цена: на год — 12 р., на 10 номеров в год. на 6 мес. — 6 р. Отд. номер — 1 р. 20 к.

Вестник котлотурбинной промышленности

Орган Всесоюзного научно-исследовательского института теплогидротехнического оборудования.

Рассчитан на инженерно-технический персонал заводов и научно-исследовательских институтов котлотурбостроения.

Подписная цена: на год — 12 р., на 6 номеров в год. на 6 мес. — 6 р.
Отдельный номер — 2 р.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

Орган Главэнергопрома и постоянного бюро съездов по электрификации жел. дорог.

Рассчитан на квалифицированного рабочего техника, студента, мастера и инженера, работающих по электрической тяге.

Подписная цена: на год — 12 р., на 6 номеров в год. на 6 мес. — 6 р. Отдельн. номер — 2 р.

СВЕТОТЕХНИКА

Орган Главэнергопрома, светотехнической секции ЭНИА и светотехнической секции ВЭК-РНITO

Рассчитан на инженеров, техников, студентов, квалифицированных рабочих и мастеров.

Подписная цена: на год — 6 р., на 6 мес. — 3 р. Отд. номер — 1 р.

МАШИНИСТ

Ежемесячный массовый журнал Государственного центрального бюро по обучению рабочих теплоэнергетического хозяйства.

Рассчитан на машинистов стационарных и подвижных теплосиловых установок.

Подписная цена: на год — 4 р. 20 к., на 6 мес. — 2 р. 10 к., на 3 мес. — 1 р. 5 к.
12 номеров в год.

Отдельный номер — 35 к.