

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

51



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

5

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

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

СОДЕРЖАНИЕ

С. Р. Буачидзе — О регулировании передачи постоянного тока	3
В. Н. Андрианов и Д. Н. Быстрицкий — О параллельной работе ветроэлектрической станции с мощной сетью	8
Р. М. Кантор — Некоторые вопросы из теории динамических перенапряжений в электрических системах	12
Б. А. Левин — Расчет ступеней пусковых реостатов для электроподвижного состава при изменяющемся пусковом токе	20
Б. Я. Привальский — Выбор автоматов для защиты машин главного привода прокатных станов	24
А. В. Донской — О магнитной проницаемости при индукционном нагреве	27
Н. А. Марков — Определение параметров электрической цепи трехфазной дуговой электропечи	31
Г. Н. Сенилов — Реакция якоря в магнето	34
В. В. Фетисов — Экспериментальное исследование коммутационной реакции якоря в машинах постоянного тока	41
Л. М. Шильдинер — Влияние взаимной индукции в цепях машин постоянного тока и определение взаимной индуктивности цепей	48
Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг — Электрокерамика и свойства ионных кристаллов	52
Л. Л. Рожанский — К теории многофазных умножителей частоты	57
В. В. Андреев — К расчету переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях в цепях с последовательно включенной емкостью	63
Л. А. Бессонов — Графоаналитический метод расчета переходных процессов в электрических цепях с нелинейными элементами	66
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ	
Е. И. Горин и К. Н. Осолоков — Кабели 825 в и их защита	71
К. А. Прейс и С. Н. Шойхет — Рациональная схема ввода в эксплуатацию новых электрических ванн	75
ПО СТРАНИЦАМ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖУРНАЛОВ	
Работа конденсаторных электровозов на шахтах Донбасса. Передача электроэнергии на большое расстояние. Металлобумажные конденсаторы. Электрическое оборудование аэродинамических труб. Танталовые электролитические конденсаторы. Индукционный нагрев поперечным магнитным полем.	77
ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА	
Почему синус положен в основу изменения э. д. с. вращающихся генераторов? Новый документ о П. Н. Яблочкове. Физик Биша о приоритете А. С. Попова. К статье „Динамические усилия в расплаве индукционных печей“	85
ХРОНИКА	
Пленум секции промэлектротехники МОНИТОЭ. Профессор А. Я. Бергер. К 5-летию со дня смерти К. И. Шенфера. Памяти И. Г. Александрова	87
БИБЛИОГРАФИЯ	
А. А. Янко-Триницкий — Книга М. А. Перекалина „Электрические цепи“	90
Д. М. Казарновский — Книга Н. П. Богородицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева „Электротехнические материалы“	91
В. Н. Ужов — Книга С. П. Жезровского „Электросфильтры“	93
А. М. Левитский — Книга А. Г. Калашникова „Флюксметр“	94
Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике	96

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К 4-24-80

Адрес для телеграмм: Москва Электричество

Адрес для корреспонденции: Москва, Главный почтамт, почтовый ящик № 648

Да здравствует 1 Мая — день международной солидарности трудящихся, день братства рабочих всех стран!

Трудящиеся Советского Союза! Успешным осуществлением великих строек на Волге и Днепре, на Дону и Аму-Дарье внесем новый вклад в дело строительства коммунизма!

Под знаменем Ленина, под водительством Сталина — вперед, к победе коммунизма!

(Из призывов ЦК ВКП(б) к 1 Мая 1951 г.)

0 регулировании передачи постоянного тока

Кандидат техн. наук С. Р. БУАЧИДЗЕ

Львовский политехнический институт

ри нижеследующем кении преобразовыва-ые агрегаты подстан-ринято заменять од-эквивалентным агре-и. Величины перемен-тока обозначены жир-шрифтом, а постоянного тока — светлым. значения величин посылающей системы снаб-индексом α (символ угла зажигания вы-теля), а приемной — β (символ угла опере-инвертора).

гулирование передачи вручную для обес-режим постоянства передаваемой мощности. режим достигается посредством установки ки или дистанционно определенных значе-углов α и β и анцапф трансформаторов ачи. Однако непредвиденные колебания жений U_α и U_β , связанные с изменениями вных мощностей в системах, могут повлечь ой недопустимое изменение передаваемой ной мощности. Если, например, в приемной e имеет место понижение напряжения U_β , ное недостатком реактивной мощности, то ваемая мощность увеличится и произойдет зка системы не по реактивной, а по активной сти. Указанный недостаток ручного регу-ция может быть частично устранен путем ки автоматических регуляторов напря- U_α и U_β , воздействующих на анцапфы рматоров. Однако эффективность этой ограничивается диапазоном анцапф. Коле-астоты в обычно допускаемых пределах ески не отражаются на передаваемой мощ-Поэтому в данном случае регулирование аемой мощности должно производиться здействия на углы α и β , или на уставки юров напряжения.

регулировании передаваемой мощности вом изменения углов α и β необходимо я с балансом реактивных мощностей ах, а также с тем, что нарастание реак-мощности, при всех прочих равных з, происходит более интенсивно на ин-ри изменении угла β), чем на выпря-и изменении угла α).

Рассматриваются вопросы (неавтоматического и ав-томатического) регулирования обменных мощностей, частоты и напряжения энергосистем переменного тока, связанных между собой передачей постоянного тока. Даются принципиальные соображения о регу-лировании путем воздействия на устройства пере-дачи постоянного тока, а также даются схемы соот-ветствующих регулирующих устройств.

Если посылающая си-стема полностью работает на передачу постоянного тока, то для регулирова-ния передаваемой мощ-ности можно дополни-тельно воздействовать на напряжения генераторов. Применение для стан-ций такой системы схемы блока¹ генератор — трансформатор—преобразователь уменьшит токи короткого замыкания на стороне переменного тока и расширит пределы регулирования. При этом частоты станций могут быть разными и, следова-тельно, отпадает необходимость в синхрониза-ции. Проблема устойчивости параллельной ра-боты между станциями этой системы снимается.

Перераспределение нагрузки между преоб-разователями может быть достигнуто или воз-действием на анцапфы трансформаторов, или же изменением углов зажигания преобразователей. Таким же путем можно избежать тока небаланса на землю в случае последовательного (каскадного) соединения преобразователей и за-земления средней точки.

При всех указанных выше изменениях задан-ного режима во избежание опрокидывания на-пряжения на инверторах необходимо держать ниже линии их устойчивости.

Автоматическое регулирование мощности, передаваемой по одной линии постоянного тока. Рассмотрим регулирование в функции частоты. На передаче может быть установлен регулятор мощности со статической характери-стикой.

Характеристики регулирования для посы-лающей системы представлены на рис. 1,а, где $P_\alpha(f_\alpha)$ — характеристика эквивалентного регулятора скорости системы и $P_\alpha(f_\beta)$ — характе-ристика передаваемой мощности в функции частоты приемной системы f_β . При действующих частотах f_{α_1} и f_{β_1} собственная нагрузка посы-лающей системы

$$P_{\alpha\alpha_1} = P_{\alpha_1} - P_{\alpha\beta_1}.$$

¹ Параллельная работа станций осуществляется на шинах преобразовательной подстанции.

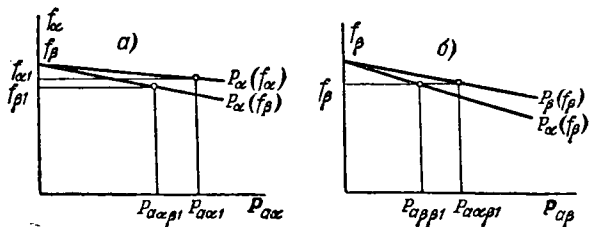


Рис. 1.

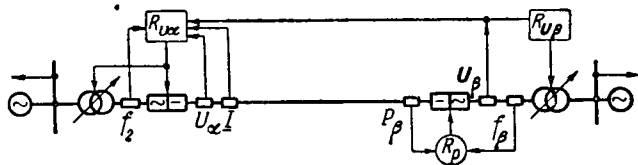


Рис. 2а.

На рис 1,б представлены характеристики регулирования для приемной системы, где $P_\beta(f_\beta)$ — характеристика эквивалентного регулятора скорости системы и $P_\alpha(f_\beta)$ — характеристика регулятора передачи. Суммарная мощность в системе

$$P_{\alpha\beta} = P_{\alpha\beta_1} + P_{\alpha\beta_2}$$

Регулирование в функции частоты может быть осуществлено по схеме рис. 2а. Автоматическому регулятору напряжения R_{U_α} воздействию на угол α выпрямителя и анцапфы трансформатора, задается характеристика, выбранная, исходя из соображений устойчивости инвертора. Регулятор R_{U_α} , регулируя напряжение линии в функции тока, будет поддерживать его ниже критического значения для инвертора. Автоматический регулятор мощности R_p , изменяя угол β , регулирует передаваемую мощность в функции частоты f_β согласно заданной статической характеристике. На рис. 2б показаны

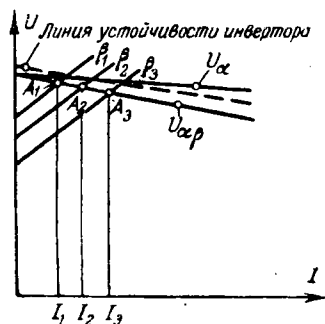


Рис. 2б.

характеристики: U_α — характеристика регулятора R_{U_α} и $U_{\alpha\beta} = U_\alpha - IR$ — характеристика того же регулятора, приведенная к инверторным шинам.

Во избежание нарушения устойчивости инвертора при понижении напряжения U_β необходимо посредством телепередачи передавать регулятору R_{U_α} величину этого напряжения. Тогда

регулятор R_{U_α} при снижении напряжения передвинет вниз свою характеристику, и передаваемая мощность уменьшится. Регулятор R_p в свою очередь, воздействуя на анцапфы трансформатора, стремится поддержать напряжение U_β .

При коротком замыкании в приемной системе будет иметь место резкое повышение частоты. При этом регуляторы R_p и R_{U_α} будут стремиться снизить передаваемую мощность. При понижении напряжения U_α регулятор R_{U_α} уменьшит угол α и, следовательно, уменьшает потребляемую выпрямителями реактивную мощность. При повышении напряжения U_α происходит обратное явление. При снижении частоты посылающей системы f_α регулятору R_{U_α} подается импульс на снижение передаваемой мощности. Таким образом, при всех ненормальностях в приемных и посылающих системах регулирующие устройства действуют правильно.

Для ограничения тока при перегрузках и коротких замыканиях на стороне постоянного тока регулятор R_{U_α} можно снабдить специальным элементом — ограничителем. Недостатком такого устройства является низкий коэффициент полезности передачи при больших нагрузках.

Осуществление регулирования длинной линией по схеме (рис. 2а) потребует некоторого ее изменения. При коротком замыкании в приемной системе ток, протекающий через инвертор временно увеличится за счет разрядного тока линии, а критический ток инвертора уменьшится из-за понижения напряжения U_β . Во избежание опрокидывания инвертора необходимо установить дополнительное устройство, которое при появлении признаков короткого замыкания (понижение напряжения, резкое повышение частоты) пресекло бы нормальную тенденцию регулятора R_p к снижению β и дало бы импульс на быстрое увеличение β .

На рис. 3а дана другая схема автоматического регулирования. Регулятор компенсации R_c настраивается на автоматическое выполнение условий устойчивости инвертора. Регулятор мощности R_p , установленный на выпрямительном конце, регулирует передаваемую мощность в функции частоты f_β согласно заданной статической характеристике. На рис. 3б буквами U_α и U_β обозначены напряжения, потребляемые на концах передачи, а a_1 и a_2 — характеристики выпрямителя, приведенные к инверторным шинам. При понижении напряжения U_β регуляторы R_c и R_p , увеличивая β и α , снижают коэффициент полезности. Такое снижение является чувствительным в аварийных условиях. Специальный ограничитель тока будет действовать при перегрузках по току и коротких замыканиях на стороне постоянного тока. В остальном действие схемы (рис. 3а)

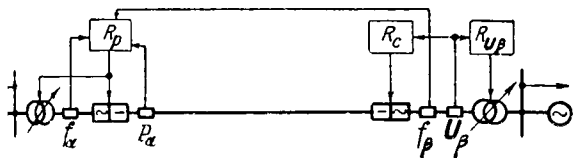


Рис. 3а.

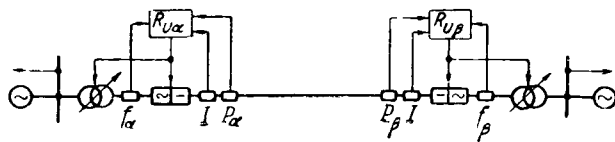


Рис. 4а.

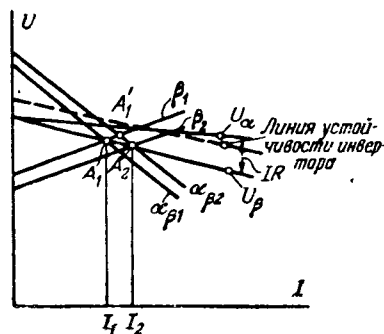


Рис. 3б.

не отличается от действия предыдущей.

При обрыве линейных проводов регулятор R_p не дает импульсы на повышение напряжения, поэтому необходимо установить элемент, снижающий напряжение.

Схема автоматического регулирования передачи неизменным током представлена на рис. 4а, характеристики — на рис. 4б. Это регулирование осуществляется посредством одновременного изменения напряжений U_α и U_β на обоих концах передачи. Регуляторы R_{U_α} и R_{U_β} регулируют передаваемую мощность в функции частоты соответственно заданному статизму. Вместе с тем они стремятся поддержать ток на неизменном уровне.

При снижении частоты f_β регулятор R_{U_β} дает импульсы на повышение напряжения U_β посредством снижения угла β или соответствующей установки анцапф трансформатора. Результатом этого действия регулятора является тенденция к снижению передаваемого тока. Тогда вместе с регулятором R_{U_α} повысит напряжение U_α , соответственно увеличит передаваемую мощность. Таким же образом регуляторы R_{U_α} и R_{U_β} уменьшают передаваемую мощность при понижении частоты f_α .

При понижении напряжения U_α или U_β имеет тенденция к снижению передаваемой мощности. При этом в результате воздействия регуляторов R_{U_α} и R_{U_β} на углы зажигания система неизменным напряжением будет разгружаться активной мощностью.

Схема (рис. 4а) исключает всякую возможность перегрузки передачи по току. Величина передаваемого тока ограничивает предел регулирования угла β инвертора. Регулировочной характеристикой критическое

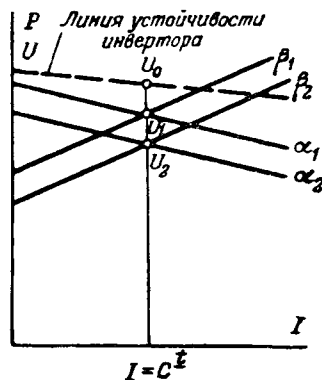


Рис. 4б.

напряжение обозначено через U_0). При схеме регулирования (рис. 4а) необходимо к регулятору R_{U_α} добавить ограничитель напряжения.

Как известно, в случае передачи неизменным током при нагрузках, ниже номинальных, ухудшаются к. п. д. передачи, коэффициент мощности и форма кривой напряжения. Для устранения этого недостатка можно придать характеристике $I=f(P)$ токовых элементов регуляторов R_{U_α} и R_{U_β} ступенчатый вид. В результате предел устойчивости инверторов при малых нагрузках возрастет, и токи короткого замыкания на стороне постоянного тока или в приемной системе снизятся до минимума.

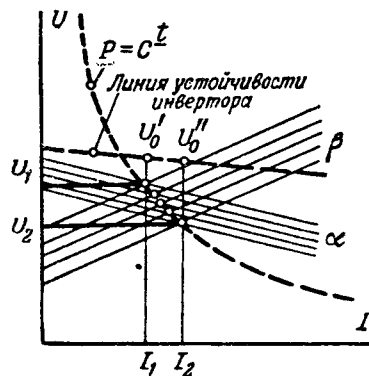


Рис. 4в.

Переход с одной уставки тока на другую может быть осуществлен следующим образом. Несоответствие между мощностью P и током I вызывает на инверторном конце временное снятие регулирующего эффекта от тока I , а на выпрямительном конце — подачу импульсов на соответствующее изменение α для приведения

тока I к новому значению. Но регулирующий элемент $P_\beta = f(f_\beta)$ с целью поддержания постоянства P_β будет давать при этом соответствующие импульсы на изменение β . В результате получим регулирование при переходном режиме вдоль кривой $P = UI = C^t$ (рис. 4в).

Я. М. Червоненкис предложил весьма интересный метод регулирования передаваемой мощности с отсечкой характеристики [Л. 1]. Необходимо в будущем изучить возможности автоматического регулирования и по этому методу.

Использование во всех приведенных выше схемах в качестве элементов регуляторов R_p , R_{U_α} , R_{U_β} и R_c , таких чувствительных устройств, как электронные реле, приведет при наличии безинерционности сеточного управления преобразователей к быстрой отзывчивости и аperiodическому аллюру кривой регулирования во время переходных режимов. Но при изменениях напряжений U_α и U_β сработают в первую очередь сеточные регуляторы, а затем, с некоторым опозданием, переключатся анцапфы трансформаторов. В результате получим колебательный, но затухающий процесс, вызванный взаимодействием между сеточным регулированием и системой переключения анцапф.

Вследствие неодинаковой скорости регулирования регуляторов передачи и регуляторов турбин при изменениях частоты будут иметь место толчки нагрузки и колебательный процесс. Для устранения этого недостатка необходимо уменьшить скорость подачи импульсов на регулирование от частотного элемента регулятора мощности передачи.

Регулирование частоты f_β можно передать посылающей системе. В этом случае описанные выше регуляторы должны иметь механизм для медленного передвижения первичной статической характеристики параллельно самой себе до восстановления частоты. В общем случае роль ведущих по частоте агрегатов может одновременно выполняться и агрегатами приемной системы и передачей постоянного тока.

Желательно иметь автоматическое устройство для переключения направления мощности на обратное на тот случай, если частота f_α удерживается пониженной и после того, как регулятор $P_\alpha(f_\beta)$ передачи полностью снял нагрузку с линии, а частота f_β при этом держится на нормальном уровне. Нормальное направление мощности, заданное диспетчером, должно автоматически восстанавливаться одновременно с восстановлением частоты f_α . Таким образом, для осуществления двухсторонней передачи энергии необходимо иметь по два комплекта регулирующих устройств.

Для осуществления регулирования передаваемой мощности в функции величин, отличных от частоты, например, в функции водотока гидроэлектростанций, авторегулирования по заданному графику, телерегулирования мощности

диспетчером и т. п. достаточно вместо частых импульсов ввести в описанные схемы импульсы от соответствующих функций. Кроме того, диспетчер может дистанционно воздействовать на характеристики регуляторов мощности, действующих в функции частоты.

Для систем, связанных линиями постоянного тока, можно применить регулирование частоты и мощности по принципу виртуального статизма тогда регуляторы „частота-мощность“ будут установлены как на станциях приемной системы так и на передаче. Регулятор с виртуальным статизмом, установленный на передаче, будет действовать через описанные выше первичные регуляторы мощности передачи. В данном случае можно также применить метод астатического регулирования передачи и одновременного регулирования мощности станций приемной системы пропорционально передаваемой мощности (полагающая система регулирует частоту приемной системы).

Для станций приемной системы и электростанций передачи может быть применен метод регулирования посредством применения регулятора часового интегрального отклонения со статической характеристикой. Соответствующий регулятор, установленный на передаче, будет пускать импульсы для регулирования от дренциального частотомера только в том случае когда мощность передачи отклонится от значения, обусловленного заданной характеристикой.

Регулирование параллельных линий. Параллельные линии постоянного тока со своими преобразователями могут быть присоединены к шинам переменного тока через индивидуальные трансформаторы. Кроме того, каждая из них может иметь по несколько преобразователей. Схема блока трансформатор-преобразователь линии является наиболее гибкой для регулирования. Для каждой из параллельных линий применимы все соображения о регулировании изложенные выше; в частности каждой линии можно задать свой, особый режим работы.

Системы могут быть соединены между собой параллельными линиями постоянного и переменного тока. Если линия постоянного тока регулирована на передачу неизменной мощностью то все изменения нагрузки систем будут отражаться на величинах обменных мощностей для переменного тока.

Изменением величины и знака реактивной мощности преобразователей² можно регулировать величину натуральной мощности для переменного тока (эффект, аналогичный введению шунтовых конденсаторов и реакторов).

Если требуется поддерживать неизменную мощность линии переменного тока, то регулирование этой линии сможет воздействовать не только на систему регулирования агрегатов приемной системы, но и на уставку регулятора линии постоянного тока. Для перераспределения

² Имеются в виду преобразователи с искусственной коммутацией.

эки необходимо воздействовать в противоположные стороны на регуляторы обеих линий. Изменение потоков мощности в линиях зависит от заданного режима регулирования линий режима нагрузок систем, присоединенных к шинам передачи. Например, отрегулировав соответствующим образом напряжения постоянного и переменного тока, можно получить переактивной мощности по линии постоянного тока в одну сторону и передачу реактивной мощности по линии переменного тока в другую сторону. Вследствие изменения напряжений реактивной мощности «перетоков» реактивной мощности линии переменного тока может повлиять на величину активной мощности, передаваемой по линии постоянного тока. Поэтому регулятор постоянного тока должен оказывать корректирующее действие.

При параллельной работе линий постоянного и переменного тока системы имеют общую точку. Поэтому все описанные выше методы автоматического регулирования мощности, применяемые по линии постоянного тока, кроме метода виртуального статизма, в данном случае применимы. Регулятор же виртуального статизма должен воздействовать одновременно на регуляторы мощности обеих линий.

Изменения генераторов, вызванные нарушением устойчивости параллельной работы систем, можно устранить отключением линии переменного тока. Между системами сохранится через линию постоянного тока.

С точки зрения регулирования наиболее гибкой является схема с отдельными для каждой линии трансформаторами.

Регулирование систем, работающих в кольце линий постоянного или переменного и постоянного токов. В этом случае применимо все вышесказанное.

Если кольцо состоит только из регулируемых линий постоянного тока, то явления короткого замыкания локализуются в поврежденной системе, система устойчивости параллельной работы не снимается, и потребность в синхронизации отпадает. Наиболее легко осуществимым методом регулирования является метод независимого регулирования частоты и напряжения каждой системы в отдельности. Он равноценен методу с виртуальным статизмом. Отсутствие возможности обмена реактивной мощностью между системами существенного значения не имеет, так как передача реактивной мощности по длинной линии переменного тока мала.

Перейдем к случаю кольца, выполненного из линий постоянного и линиями переменного тока. При замыкании такого кольца посредством линий постоянного тока, имеющего преобразование с запертыми сетками, подгонять величины токов и напряжений, как это делается при одном кольце переменного тока, не требуется. Регулирование вена постоянного тока сводится к распределению активных мощностей между линиями кольца.

Рассмотрим кольцо, где к шинам каждой из систем подключены, с одной стороны, линия постоянного тока, а с другой — линия переменного тока. Если применяются регуляторы скорости, частоты и мощности, необходимо определить направление и величину мощности, которую требуется передать по линии постоянного тока. При трех системах, включенных в кольцо, возможны четыре случая, представленные на рис. 5,а, 5,б, 5,в и 5,г.

В случаях рис. 5,а и 5,б величину мощности, которую надлежит передать постоянным током, целесообразно определить пропорционально мощности, поступающей на те же шины по линии переменного тока. На линиях переменного тока, которые отходят от шин, находящихся на обоих концах передачи постоянного тока, устанавливаются дистанционно-взаимосвязанные реле направления активной энергии. Эти реле будут сравнивать направления потоков мощности в кольце и при их совпадении переключать линию постоянного тока на передачу мощности в ту же сторону и в заданной пропорции.

В случаях рис. 5,в и 5,г, после того как указанные реле установят несовпадение направлений потоков мощности в смежных линиях переменного тока, специальное балансное реле должно сравнить возможные величины мощностей, которые надлежит передавать в ту или другую сторону и включить систему регулирования линии постоянного тока таким образом, чтобы передача происходила в сторону разгрузки наиболее перегруженной линии переменного тока. При этом

$$P_{a_1} = k_1 P_{a_1}; \quad P_{a_2} = k_2 P_{a_2},$$

$$P_a = k_1 P_{a_1} - k_2 P_{a_2},$$

или

$$P_a = k_2 P_{a_2} - k_1 P_{a_1},$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности, выбираемые в результате сравнения потерь при передаче по линиям постоянного и переменного тока. На регуляторе передачи постоянного тока должен быть установлен ограничитель мощности. При отключении одной из линий переменного тока получим две группы систем с разными частотами, связанных между собой линией постоянного тока. Устройство регулирования в кольце должно автоматически отключаться, а описанные выше устройства регулирования передачи — включаться.

Потокораспределение в том случае, когда три системы соединены в кольцо двумя линиями постоянного тока и одной линией переменного тока, показано на рис. 6,а, 6,б, 6,в и 6,г.

В случаях рис. 6,а и 6,в одновременно с описанными выше устройствами регулирования будет действовать реле направления энергии.

В случаях рис. 6,б и 6,г «переток» мощности по линии переменного тока отсутствует, реле направления энергии бездействует, и передача регулируется указанными выше устройствами.

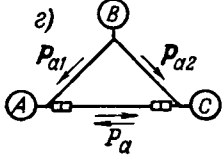
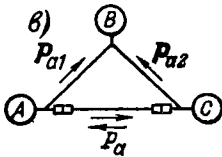
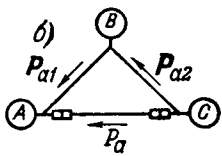
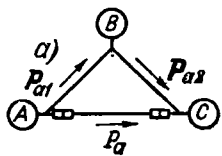


Рис. 5.

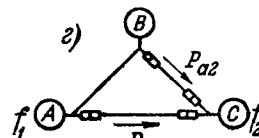
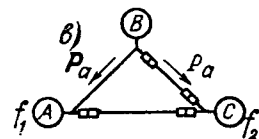
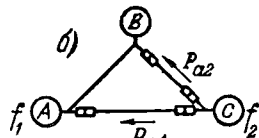
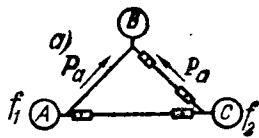


Рис. 6.

обмена мощностями между двумя системами, которые были описаны выше. При применении тогда виртуального статизма мощность, выдаваемая в кольцо регулирования «частота — мощность» должна распределяться между линиями в указанной пропорции.

С увеличением количества включенных в кольцо систем автоматизация потоков распределения усложняется.

Заключение. Использование передачи постоянного тока для осуществления связи между системами переменного тока дает возможность весьма гибко регулировать частоту, напряжения, обменные активные и реактивные мощности. Однако осуществление такого регулирования потребует применения довольно сложных автоматических устройств. Но даже применение в них постоянного тока, передающей неизменяемой мощности и имеющей сравнительно несложную автоматику, дает весьма существенное улучшение режима работы включенных к ней систем.

Желательно осуществление указанных мероприятий по регулированию и проверка их на опытных установках, так как только после этого можно будет более определенно высказаться о преимуществах того или иного из этих методов.

Литература

1. Я. М. Червоненкис. Передача энергии постоянным током с улучшенной характеристикой. *Электричество*, № 3, 1945.



О параллельной работе ветроэлектрической станции с мощной сетью

Кандидат техн. наук В. Н. АНДРИАНОВ

Московский институт механизации и электрификации сельского хозяйства им. Молотова

и инж. Д. Н. БЫСТРИЦКИЙ

Всесоюзный институт электрификации сельского хозяйства

При широком использовании энергии ветра для целей электрификации основным режимом работы ветроэлектрической станции является ее параллельная работа с сетью.

Ранее [Л. 1] нами была теоретически показана возможность устойчивой параллельной работы с сетью синхронного генератора, соединенного непосредственно с ветродвигателем. Продолжением этой работы являются первые опыты по осуществлению параллельной работы ветроэлектри-

Описаны опыты по синхронизации и параллельной работе ветроэлектрической станции с сетью. Предложен способ синхронизации синхронного генератора, работающего от ветродвигателя со стабилизаторным регулированием.

ческой станции с мощной сетью, проведенные опытной ВЭС Западного филиала ВИАЭ. Во время опытов

подвергнута экспериментальной проверке возможность синхронизации и устойчивой работы при разной скорости и порывистости ветра.

Синхронный генератор опытной ВЭС мощностью 40 кВА, напряжением 380 В, с числом полюсов 1000 об/мин, приводившийся во вращение ветродвигателем Д-18, работал на мощную трансформаторную подстанцию через повысительный трансформатор и

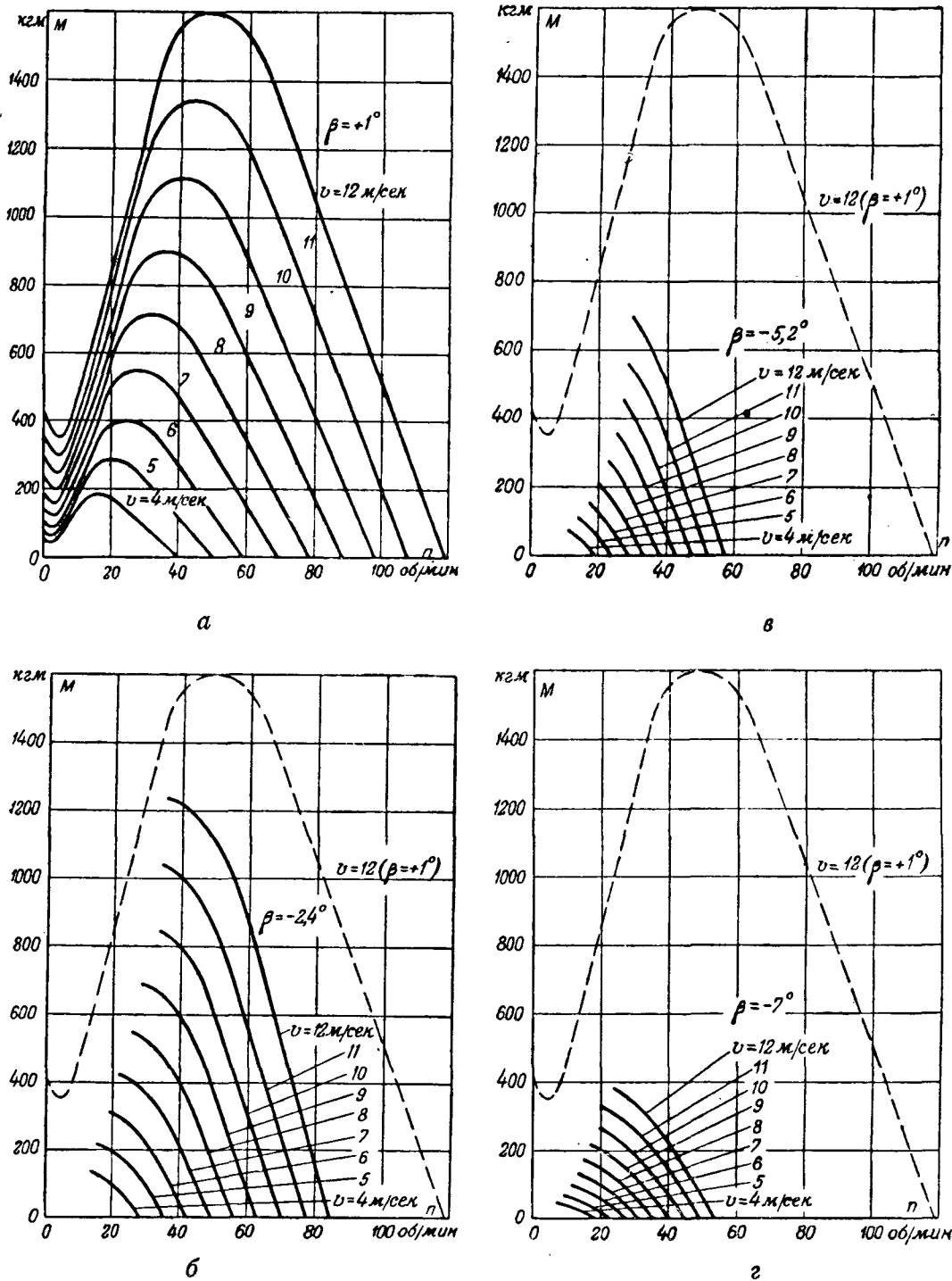


Рис. 1.

длиной 1 км, выполненную стальными про-
 . Соединение генератора с ветроколесом
 твлялось через две пары конических шесте-
 ренную передачу. Регулирование числа
 ов производилось центробежным регулято-
 ействующим на поворотные части лопастей
 ством стабилизаторов (аэродинамические
 юторы) [Л. 2].

родинамические характеристики рассматри-
 го ветродвигателя (рис. 1, а, б, в, г) даны
 ьных величинах для следующих углов β
 поворота стабилизатора относительно хор-

ды поворотной части лопасти): $+1^\circ$; $-2,4^\circ$; $-5,2^\circ$
 и -7° .

Как видно из этих характеристик, центробеж-
 ное регулирование не может быть использовано
 для автоматического подведения числа оборотов
 к синхронному. В самом деле, если для поддер-
 жания числа оборотов, равного синхронному, за-
 тянуть пружины регулятора, то ветродвигатель
 в момент синхронизации будет работать на ха-
 рактеристике, соответствующей определенному
 углу β . В дальнейшем, после синхронизации
 центробежный регулятор не сможет проявить

своего действия. Ручное же регулирование, начиная с момента синхронизации, будет возможно лишь в сторону уменьшения нагрузки путем воздействия на муфту отводки. Таким образом, ветродвигатель будет работать по характеристикам, соответствующим углу β , фиксированному в момент синхронизации. Поскольку этот угол будет заведомо отличаться от нормального угла ($\beta = +1^\circ$), соответствующего расчетным характеристикам, ветродвигатель не сможет развить полной мощности, определяемой скоростями ветра.

Если же путем затяжки пружины перенести начало регулирования на число оборотов выше синхронного, то угол β до и после синхронизации не изменится и останется равным первоначально установленному, нормальному углу ($\beta = +1^\circ$). В таком случае при синхронизации неизбежно наличие избыточного момента той или иной величины, что делает успешную синхронизацию практически маловероятной.

Центробежное регулирование могло быть применено при синхронизации, если была бы возможность путем воздействия на муфту отводки осуществить двухстороннее движение муфты регулятора при синхронной скорости. Но это потребует изменения конструкции регулятора.

Указанных выше затруднений можно избежать, применив пуск ветродвигателя по сниженным аэродинамическим характеристикам, полученным путем передвижения вручную муфты регуляторов в зависимости от скорости ветра. Для этого необходимо перенести начало регулирования на сверхсинхронное число оборотов и воздействовать на муфту отводки, которая ставит муфту регулятора в положение, соответствующее моменту холостого хода ветродвигателя при синхронном числе оборотов. Роль центробежного регулирования сводится лишь к предохранению двигателя от разгона. Этот метод, предложенный нами совместно с Б. А. Васильевым, позволяет снять избыточный момент ветродвигателя при подходе к синхронному числу оборотов. Однако обычная синхронизация все же оказалась затруднительной, так как непрерывная пульсация ветра не позволила получить постоянную скорость в течение достаточно длительного времени. Поэтому был принят метод самосинхронизации.

Генератор включался в сеть трехполюсным рубильником рычажного типа, после чего немед-

ленно замыкалась обмотка возбуждения возбудителя и подавалось возбуждение, так как обмотка возбуждения генератора в течение всего процесса синхронизации оставалась замкнутой на обмотку возбудителя. При самосинхронизации осциллографировался ток возбуждения, ток якоря и напряжение на шинах.

Значения некоторых величин, характерных для проведенных опытов самосинхронизации реактивного электрического генератора, приведены в таблице.

Осциллограммы (рис. 2) наглядно иллюстрируют картину изменения токов якоря и тока обмотки возбуждения при самосинхронизации [Л. 3]. Аперiodическая составляющая тока якоря вследствие относительно большой величины реактивного сопротивления r_a затухает весьма быстро, и ее трудно выявить на осциллограмме. Поэтому ток якоря представляет сумму вынужденного периодического тока частоты сети и переходного процесса частоты $f(1-s)$. На осциллограммах (рис. 2, а, б) наглядно видно уменьшение амплитуды периодического тока, объясняющееся затуханием свободной аперiodической составляющей тока возбуждения генератора и уменьшением скольжения. На осциллограммах (рис. 2, в), снятых при больших скольжениях, видна также пульсация с двойной частотой скольжения $2fs$ амплитуды вынужденной составляющей тока якоря, вызванная здесь относительно большой величиной r_a .

Резкие изменения кривой тока возбуждения (на рис. 2, а, б и в), наблюдающиеся в самом начале осциллограммы, являются результатом наложения периодической составляющей с частотой $f(1-s)$, вызванной, в свою очередь, аперiodической составляющей тока якоря. Быстрое исчезновение этих колебаний объясняется относительно малым значением постоянной времени обмотки якоря T_a . Из дальнейшего хода кривой видно наложение на аперiodическую составляющую, затухающую в соответствии с постоянной времени T'_a , вынужденного тока с частотой скольжения (рис. 2, б и в). В опыте 3 (рис. 2, в) ток возбуждения был подан после того, как генератор под влиянием избыточного и реактивного момента уже втянулся в синхронизм. В опыте 4 (рис. 2, б) втягивание в синхронизм произошло

№ опытов	Величина скольжения, %	Напряжение на шинах, в	Средняя скорость ветра, м/сек	Глубина посадки напояжения на шинах, %	Длительность посадки напояжения на шинах, сек	Кратность тока якоря в момент включения, относительные единицы	Наибольшая кратность тока якоря при различных, относительные единицы	Время до подачи тока возбуждения, сек	Величина тока возбуждения в синхронном режиме, а	Кратность наибольшего тока возбуждения, относительные единицы
1 (рис. 2, а)	Более 5	368	5,0	0	—	2,04	2,04	0,76	2,33	0,42
2 (рис. 2, б)	Около 10	370	5,5	16,7	0,08	1,96	2,94	0,6	6,0	3,0
3 (рис. 2, в)	Около 10	360	6,0	15,0	1,8	4,7	2,15	1,96	2,67	4,29
4 (рис. 2, г)	Около 10	370	8,5	18,1	2,0	2,36	4,3	0,4	4,0	2,22

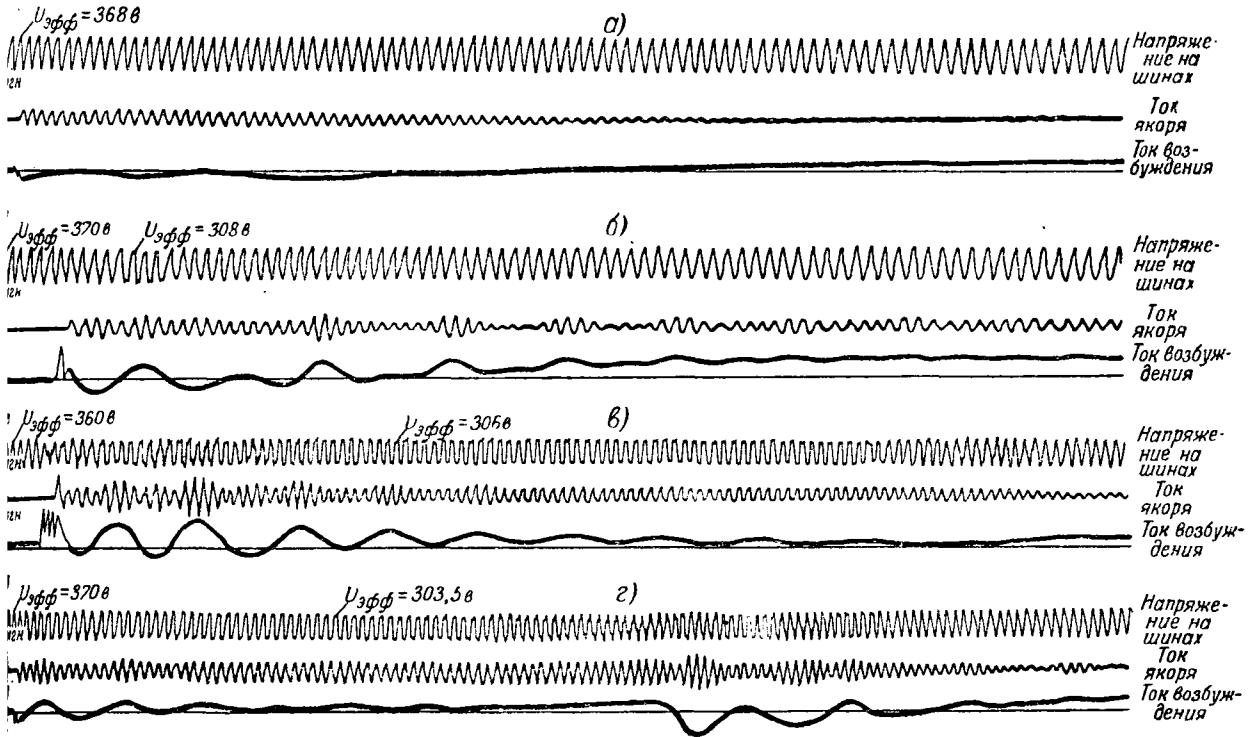


Рис. 2.

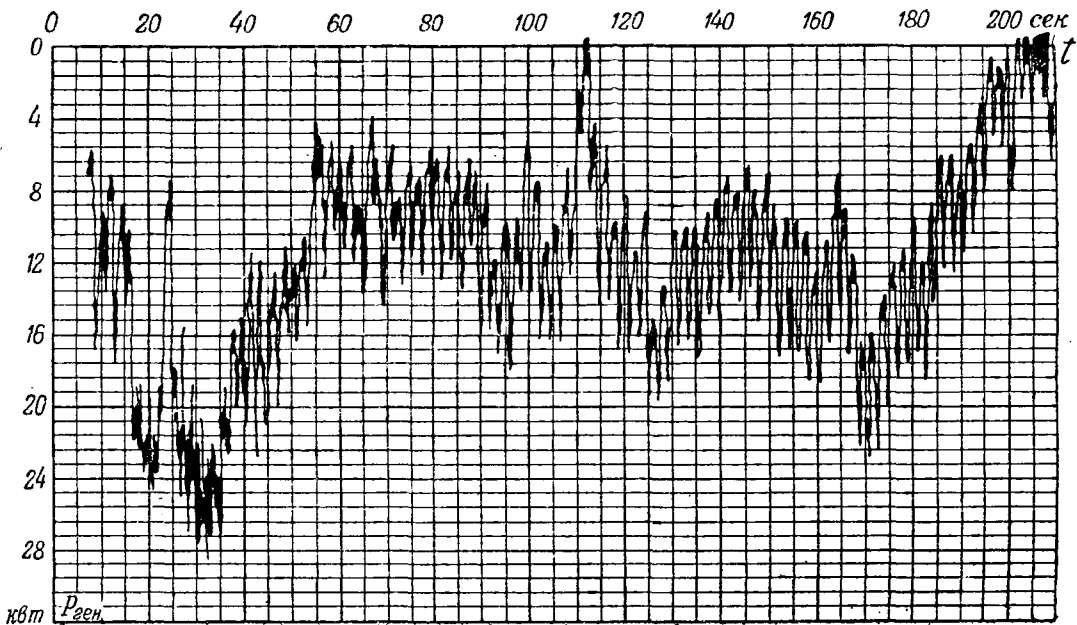


Рис. 3.

того, как был подан ток возбуждения. По-на осциллограмме можно различить все периоды: асинхронный режим, длившийся 0,6 сек; втягивание в синхронизм, длившееся 0,5 сек; работа машины в синхронном режиме. Осциллограмма (рис. 2,г) относится к случаю, когда после подачи возбуждения ротор был повернут на 180° (электрических). смещения ротора на одно полюсное деление составило около 0,6 сек. Наблюдавшиеся при

этом толчки тока достигали величины, равной 4,3 номинального значения.

Неблагоприятные ветровые условия летнего времени, в которых проводились опыты по синхронизации, не позволили всесторонне исследовать режимы параллельной работы. Параллельная работа осуществлялась при скорости ветра, не превышавшей 7 м/сек и часто спадавшей до 4,5 м/сек и ниже, когда ветроэлектрическая установка переходила на режим двигателя. Порывы

стость ветра также была незначительной. Ветро-двигатель работал в аэродинамических режимах, соответствующих вертикали, расположенной вблизи левой части его характеристики (общее передаточное число $t = 36$), что по соображениям устойчивости является весьма благоприятным [Л. 1]. В результате всего перечисленного имела место устойчивая работа ветроэлектрической станции.

Из графика отдаваемой в сеть мощности, снятого регистрирующим ваттметром (рис. 3), видно, что кроме плавных изменений мощности наблюдаются непрерывные пульсации ее в определенных пределах и с частотой, близко совпадающей с числом оборотов ветроколеса. О причинах возникновения этих пульсаций можно высказать ряд предположений. Прежде всего их можно связать с непрерывной пульсацией энергии ветра.

В [Л. 1] было установлено, что ротор, выведенный из состояния равновесия, ввиду большой массы ветроколеса приходит в состояние нового равновесия за время около 20 сек. Непрерывная пульсация ветра в течение этого времени может привести к возникновению биений угловой скорости ветроагрегата и, следовательно, к пульсации мощности генератора.

Пульсация мощности может быть вызвана также неуравновешенностью ветроколеса и несовершенством редукторной передачи.

При параллельной работе с электрической станцией неизмеримой мощности непрерывные пульсации мощности ветроэлектрической станции рассматривать как явление нежелательно. Кратковременность первых опытов не позволила собрать достаточного материала для окончательного суждения о причине этих пульсаций, поэтому исследования этого явления должны быть продолжены.

Выводы. Полученные в результате опытов материалы по вопросу о синхронизации ветроэлектрических станций показали неосновательность существовавших опасений и позволили утверждать приемы синхронизации ВЭС. Опыты подтвердили возможность использования метода самосинхронизации.

В отношении практического осуществления параллельной работы опыты позволили выявить лишь характер изменения и пульсации мощности генератора.

Литература

1. В. Н. Андрианов. Устойчивость синхронного генератора при работе от ветродвигателя на мощностях. *Электричество*, № 10, 1949.
2. Е. М. Фатеев. Ветрогенераторы и ветроустановки. Сельхозгиз, 1948.
3. Л. Г. Мамиконян и И. А. Сыроваткин. Включение синхронных генераторов на парную работу по методу самосинхронизации. *Электричество*, № 9, 1949.



Некоторые вопросы из теории динамических перенапряжений в электрических системах

Кандидат техн. наук Р. М. КАНТОР

Москва

Введение. Передача энергии от Куйбышевской и Сталинградской гидроэлектростанций будет производиться по сверхдальним линиям передачи переменного тока, обладающим огромной емкостью, в особенности в случае применения конденсаторов для серийной компенсации индуктивности линии. При определенных условиях на линиях передачи гидрогенераторам придется работать на почти чисто емкостную нагрузку в симметричном или несимметричном режиме. В этой связи большое значение приобретает теоретическое и экспериментальное исследование механизма возбуждения и формы динамических

При работе явнополюсной синхронной машины с замкнутой обмоткой возбуждения на роторе на симметричную или несимметричную емкостную нагрузку возможно самовозбуждение двоякого рода: синхронное и асинхронное. Дифференциальные уравнения переходных процессов составлены в форме, обобщающей на различные несимметричные режимы. Для полученных уравнений указан метод нахождения решений, которые отвечают тому или иному виду самовозбуждения, и из которых получены выражения условий самовозбуждения, коэффициентов нарастания колебаний, величины скольжения поля статора в функции параметров рассматриваемой электрической системы. Дан качественный анализ различных установившихся режимов. Дано объяснение результатов экспериментов, полученных при исследовании самовозбуждения синхронной машины.

перенапряжений, могут возникнуть в столь больших по мощности и тяжестиности электрических системах.

Явнополюсный синхронный генератор и его контуры статора образуют сложную многоконтурную колебательную систему (рис. 1), которой потокосцепление в машине, а следовательно и индуктивности, являются сложными функциями

положения ротора и протекающих токов. В подобной колебательной системе могут возникнуть незатухающие колебания значительной амплитуды, для возбуждения которых теоретически достаточно весьма

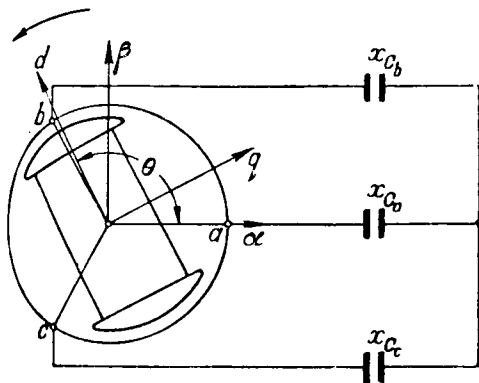


Рис. 1.

первоначальные токи в контурах си-

статора. Из проведенного в настоящей работе анализа следует, что в зависимости от соотношения межпараметрами системы может иметь место синхронное, либо асинхронное возбуждение. При синхронном возбуждении частота свободных колебаний в контурах статора строго на частоте вращения ротора. Возникновение колебаний этого рода связано с магнитной метрией синхронной машины (с условием $x_c < x_d$).

Энергетически возможность синхронного возбуждения зависит от способности синхронной машины развивать реактивный момент определенной величины.

При асинхронном самовозбуждении частота свободных колебаний в контурах статора выше частоты вращения ротора. Ротор вращается с определенным отрицательным скольжением относительно вращающегося поля статора, создаваемого свободными токами в статоре. Синхронная машина, следовательно, работает в режиме асинхронного генератора. Таким образом, асинхронное самовозбуждение синхронной машины зависит от ее способности развивать генераторный асинхронный момент, величина которого решающим образом зависит от активного сопротивления роторного контура. Условия, при которых оно может возникнуть, следующие:

в случае явнополюсной машины $x'_d < x_c < x_q$;

в случае машины с полной магнитной симметрией $x'_d < x_c < x_d$ ($x'_q = x'_d$, $x_q = x_d$).

Для принятия, что магнитные характеристики явнополюсного синхронного генератора $u_d = -i_d x_d$, $u_q = i_q x_q$, $u'_d = x'_d i'_d$ имеют вид, изображенный на рис. 2, то с математической стороны вопрос о самовозбуждении заключается в отыскании неустойчивых (неограниченно возрастающих) решений линейных дифференциальных уравнений, описывающих малые свободные колебания системы относительно ее состояния покоя (в окрестности начала координат на рис. 2) при отсутствии возбуждения.

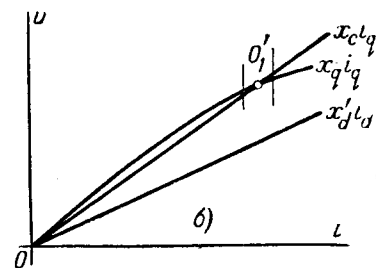
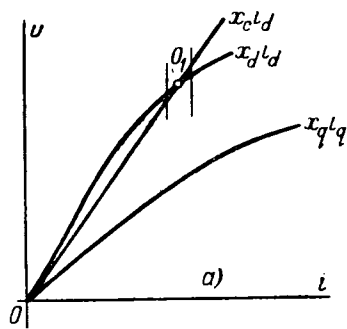


Рис. 2.

В большинстве прежних работ [Л. 2, 3, 6, 7], подвергавших анализу критерии самовозбуждения синхронных машин, авторы ограничились определением критериев Рауса-Гурвица для характеристического уравнения дифференциальных уравнений переходных процессов в осях d и q в случае трехфазной симметричной нагрузки. Результаты этих работ были получены в форме, лишенной непосредственной связи с физическими параметрами истинных колебательных процессов, вследствие чего в этих работах не было раскрыто различие между критериями синхронного (параметрического) и асинхронного самовозбуждения, которые различны по своей природе¹.

В настоящей же работе применяется другой метод анализа переходных процессов синхронного генератора [Л. 4], позволяющий получить искомые решения в явной форме с соответствующими коэффициентами нарастания и частотами колебания.

Однако вопрос о физической осуществимости того или иного вида самовозбуждения зависит в конечном счете от устойчивости соответствующего стационарного режима, устанавливающегося где-то вблизи точек O_1 и O_1' (рис. 2). Поэтому в работе представлен также краткий качественный анализ формы и устойчивости возможных в нашей системе установившихся колебаний.

Математическая часть работы целиком опирается на классические методы, разработанные Ляпуновым [Л. 1] и развитые позднее в ряде исследований советских авторов.

¹ Это привело к тому, что Левинштейн [Л. 2], которому удалось экспериментально добиться асинхронного самовозбуждения явнополюсного синхронного генератора, неправильно истолковал свои опыты, о чем пойдет речь ниже.

Постановка задачи о самовозбуждении.

Будем рассматривать свободные колебания в линейной системе, образуемой явнополюсным синхронным генератором, на роторе которого имеется лишь один замкнутый контур в виде обмотки возбуждения, и трехфазной емкостной нагрузкой C_a, C_b, C_c (рис. 1).

Принимая скорость вращения ротора постоянной ($\omega_r = \text{const} = 1$), получаем следующие исходные дифференциальные уравнения в системе относительных единиц:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{1}{s} + r \frac{di_a}{d\theta} + x_{c_a} i_a &= 0, \\ d^2 i_b + r \frac{di_b}{d\theta} + x_{c_b} i_b &= 0, \\ \frac{d^2 \psi_c}{d\theta^2} + r \frac{d\psi_c}{d\theta} + x_{c_c} i_c &= 0, \\ \frac{d\psi_r}{d\theta} + R i_r &= 0. \end{aligned} \right\} (1)$$

В практически важных случаях емкостные сопротивления несимметричной нагрузки таковы, что $x_{c_a} \neq x_{c_b} = x_{c_c}$. Ввиду этого произведем преобразование уравнений (1) к осям α, β , согласно которому при отсутствии составляющих нулевой последовательности $i_a = i_\alpha$,

$$\left. \begin{aligned} i_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}} (i_b - i_c) \text{ и т. д.}, \\ \frac{d^2 \psi_\alpha}{d\theta^2} + r \frac{d\psi_\alpha}{d\theta} + x_{c_\alpha} i_\alpha &= 0, \\ \frac{d^2 \psi_\beta}{d\theta^2} + r \frac{d\psi_\beta}{d\theta} + x_{c_\beta} i_\beta &= 0, \\ \frac{d\psi_r}{d\theta} + R i_r &= 0. \end{aligned} \right\} (2)$$

Для упрощения дальнейших выкладок предполагаем $r=0$, что для наших целей не имеет принципиального значения.

Если вместо соотношений

$$\left. \begin{aligned} \psi_\alpha &= i_\alpha \left(\frac{x_d + x_q}{2} + \frac{x_d - x_q}{2} \cos 2\theta \right) + \\ &+ i_\beta \frac{x_d - x_q}{2} \sin 2\theta + x_{ad} i_r \cos \theta, \\ \psi_\beta &= i_\alpha \frac{x_d - x_q}{2} \sin 2\theta + \\ &+ i_\beta \left(\frac{x_d + x_q}{2} - \frac{x_d - x_q}{2} \cos 2\theta \right) + x_{ad} i_r \sin \theta, \\ \psi_r &= \frac{3}{2} x_{ad} (i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta) + X_d i_r \end{aligned} \right\} (3)$$

(легко получаемых из известных выражений [Л. 3] для ψ_a, ψ_b, ψ_c через i_a, i_b и i_c) подставим в (2) обратные соотношения

$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= \psi_\alpha (b_1 + b_2 \cos 2\theta) + \\ &+ \psi_\beta b_\gamma \sin 2\theta - \psi_r b_3 \cos \theta, \\ i_\beta &= \psi_\alpha b_2 \sin 2\theta + \\ &+ \psi_\beta (b_1 - b_2 \cos 2\theta) - \psi_r b_3 \sin \theta, \\ i_r &= \frac{3}{2} b_3 (\psi_\alpha \cos \theta + \psi_\beta \sin \theta) + b_4 \psi_r \end{aligned} \right\} (4)$$

где

$$b_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d'} + \frac{1}{x_q} \right), \quad b_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_q} \right), \\ b_3 = \frac{x_{ad}}{X_d x_d'}, \quad b_4 = \frac{x_d}{X_d x_d'},$$

и введем функцию

$$\psi_r = x_{c_a} b_3 \psi_r,$$

то получим следующую систему линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \psi_\alpha}{d\theta^2} + \psi_\alpha (\omega_\alpha^2 + \eta_\alpha \cos 2\theta) + \\ + \psi_\beta \eta_\alpha \sin 2\theta - \psi_r \cos \theta &= 0, \\ \frac{d^2 \psi_\beta}{d\theta^2} + \psi_\beta (\omega_\beta^2 - \eta_\beta \cos 2\theta) + \\ + \psi_\alpha \eta_\beta \sin 2\theta - \psi_r \frac{x_{c_\beta}}{x_{c_a}} \sin \theta &= 0, \\ \frac{d\psi_r}{d\theta} + \rho_1 \psi_r - \epsilon (\psi_\alpha \cos \theta + \psi_\beta \sin \theta) &= 0. \end{aligned}$$

Здесь обозначены

$$\omega_i^2 = x_{c_i} \frac{x_d' + x_q}{2x_d' x_q}, \quad \eta_i = x_{c_i} \frac{x_q - x_d'}{2x_d' x_q}, \\ \rho_1 = \rho_0 \frac{x_d}{x_d'}, \quad \epsilon = x_{c_a} \rho_1 \frac{X_d}{x_d'} \\ (i = \alpha, \beta).$$

В случае симметричной нагрузки

$$x_{c_\alpha} = x_{c_\beta}, \quad \omega_\alpha = \omega_\beta = \omega, \quad \eta_\alpha = \eta_\beta = \eta$$

и т. д. При двухполюсном коротком замыкании на зажимах фаз b и c

$$x_{c_\beta} = \omega_\beta = \eta_\beta = 0 \text{ и } \psi_\beta = 0.$$

Решение задачи о самовозбуждении. Дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами могут быть решены лишь методом последовательных приближений, в частности так, как это сделано в приложении 1.

Из формулы (1.8) приложения 1 следует, что если при симметричной нагрузке $\omega < 1$, в явнополюсном синхронном генераторе возникает асинхронное самовозбуждение. При этом инкремент нарастания колебаний

$$\delta = \frac{\epsilon (1 - \omega)}{4\omega [\rho_1^2 + (1 - \omega)^2]},$$

частота колебаний в контурах статора

$$\nu = \omega - \frac{\epsilon \rho_1}{4\omega [\rho_1^2 + (1 - \omega)^2]},$$

а в контуре ротора

$$\sigma = \nu - 1,$$

где σ — частота скольжения ротора относительно полюса статора.

В приложении 1 искомые решения уравнений (5) определены лишь с точностью до

о приближения включительно, и поэтому терий асинхронного самовозбуждения в виде $\omega < 1$ также является лишь приближением той же степенью точности до точного критерия асинхронного самовозбуждения. В случае метричной нагрузки этим точным критерием асинхронного самовозбуждения является отрицательное значение четвертого определителя Гурвица² ($\Delta_4 < 0$) для приведенного в приложении 2 характеристического уравнения линейных дифференциальных уравнений переходных процессов в осях d и q .

Следовательно, полученные здесь выражения параметров ω , ϑ , ν и σ справедливы только в области $x_d < x_c < x_q$.

Из формул (1.9) — (1.12) приложения 1 следует, что при синхронном (параметрическом) самовозбуждении колебания в статоре и апероисский ток в роторе растут с инкрементом нарастания

$$\vartheta = -\rho_1 + \varepsilon \frac{\omega^2 + \rho_1^2 - 1}{\rho_1^2 + (\omega^2 + \rho_1^2 - 1)^2} > 0,$$

имеет место при $\omega^2 > 1$ в области $x_q < x_c < x_d$ согласно критерию $a_5 < 0$ для характеристического уравнения³ (2.1) приложения 2.

При несимметричной нагрузке, скажем при $x_2 = 0$, из формул (1.13) — (1.15) следует, что асинхронное самовозбуждение возникает, когда $(\rho_1^2) < 1$. Инкремент нарастания колебаний в этом равен

$$\vartheta = \frac{1 - (\omega_a^2 + \rho_1^2)}{4D_a},$$

зато

$$\vartheta = \omega_a - \frac{\varepsilon \rho_1 (1 + \rho_1^2 + \omega_a^2)}{4D_a},$$

$$D_a = [\rho_1^2 + (1 + \omega_a^2)] [\rho_1^2 + (1 - \omega_a^2)].$$

Согласно формуле (1.16), для синхронного самовозбуждения необходимо, чтобы

$$\vartheta = -\rho_1 + \varepsilon \frac{\omega_a + \rho_1^2 - 1}{2[4\rho_1^2 + (\omega_a^2 + \rho_1^2 - 1)^2]} > 0,$$

имеет место при $\omega_a^2 > 1$ в области $x_q < x_c < x_d$.

Из теории устойчивости линейных систем с постоянными коэффициентами известно [Л. 5], что в физических системах могут быть нарушены лишь последние условия Гурвица: $\Delta_{n-1} < 0$ и $a_n < 0$. При $\Delta_{n-1} < 0$ характеристическое уравнение имеет два комплексно сопряженных корня с положительной вещественной частью при $a_n < 0$ — с одним положительным вещественным. Естественно, что при $\Delta_{n-1} = 0$ уравнение имеет два чисто мнимых корня, а при $a_n = 0$ — один корень.

Из проведенного анализа условий самовозбуждения следует, что синхронное (параметрическое) самовозбуждение вследствие магнитной асимметрии $x'_d + x'_q$ (в области $x'_d < x'_c < x'_q$) возможно лишь при условии $\rho_0 \rightarrow 0$, в котором возможна асинхронное самовозбужде-

Установившиеся режимы. Для анализа возможных стационарных режимов в нашей системе необходимо в уравнениях (1) или (2) как-то учитывать нелинейные магнитные характеристики машины. Если попрежнему пользоваться понятиями о продольных и поперечных реактивных осях x_d , x_q , x_{ad} и X_d , являющихся теперь некоторыми функциями тока, то, преобразуя уравнения (1) или (2) к осям dq , получим уравнения

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\theta} (x_d i_d + x_{ad} i_r) + r i_d + x_q i_q + e_d &= 0, \\ \frac{d}{d\theta} (x_q i_q) + r i_q - (x_d i_d + x_{ad} i_r) + e_q &= 0, \\ \frac{d}{d\theta} \left(\frac{3}{2} x_{ad} i_d + X_d i_r \right) + R i_r &= 0, \\ \frac{de_d}{d\theta} + e_q - i_d (x_1 + x_2 \cos \theta) - i_q x_2 \sin 2\theta &= 0, \\ \frac{de_q}{d\theta} - e_q - i_d x_2 \sin 2\theta - i_q (x_1 - x_2 \cos 2\theta) &= 0, \\ \left(x_1 = \frac{x_{c_a} + x_{c_\beta}}{2}, x_2 = \frac{x_{c_a} - x_{c_\beta}}{2} \right) & \end{aligned} \right\} (6)$$

в которых реактивности могут представлять определенные функции токов i_d , i_q и i_r .

Линейная часть системы (6) эквивалентна системе (5), а в случае симметричной нагрузки ($x_2 = 0$) ее коэффициенты обращаются в постоянные величины, дающие характеристическое уравнение (2.1).

Вопрос о виде нелинейных членов уравнений (6) довольно сложен и требует специального рассмотрения. Попытаемся указать подход к решению этого вопроса при исследовании каждого стационарного режима в отдельности.

Симметричный синхронный режим ($x_2 = 0$). Все зависимые переменные принимают постоянные значения, отличные от нуля, за исключением $i_r = 0$. Очевидно, что реактивности машины x_d и x_q должны вследствие насыщения принять такие значения, отличные от тех значений, которые они имели вблизи начала координат, чтобы удовлетворялись уравнения:

$$\left. \begin{aligned} r i_d + (x_{q_1} - x_c) i_q &= 0, \\ (x_c - x_{d_1}) i_d + r i_q &= 0, \end{aligned} \right\} (7)$$

т. е.

$$r^2 + (x_c - x_{q_1})(x_c - x_{d_1}) = 0. \quad (8)$$

При малых отклонениях Δi_d , Δi_q , Δe_d , Δe_q и Δi_r от полученного состояния равновесия в „фазовом“ пространстве $(i_d, i_q, i_r, e_d, e_q)$ реактивности x_d и x_q можно представить под видом $x^q = x_{q_1} - a_q \Delta i_q$, $x_d = x_{d_1} - a_d \Delta i_d$.

Из уравнения (8) следует, что в характеристическом уравнении линейной части дифференциальных уравнений возмущенного движения

$$a_5 = p_5 = 0,$$

т. е. имеется один нулевой корень.

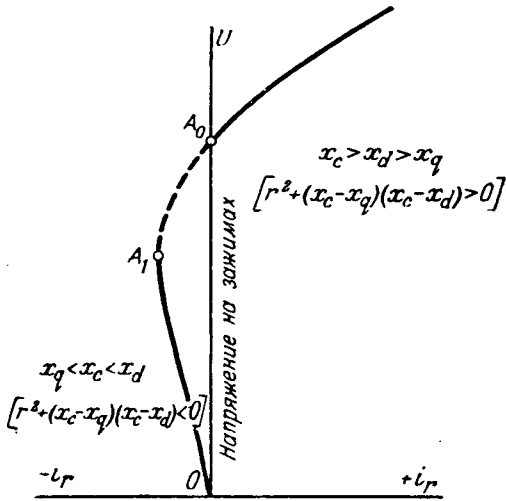


Рис. 3. Напряжение на зажимах явнополюсного генератора при неизменной емкостной нагрузке.

Физически уравнениям (7) отвечает работа явнополюсного генератора в точке A_0 на кривой зависимости напряжения на зажимах от тока возбуждения ротора (включая и фиктивный ток остаточного магнетизма), показанной на рис. 3. В теории и практике синхронных машин давно уже установлено, что участок A_1A_0 , включая и самую точку A_0 , соответствует неустойчивой области работы генератора⁴. Стабилизация симметричного синхронного режима возможна только при наличии внешней э. д. с. от постоянного тока возбуждения (или остаточного магнетизма).

Симметричный асинхронный режим ($x_2 = 0$). В явнополюсной машине в асинхронном режиме продольные составляющие токов и напряжений пульсируют с амплитудой, отличной от амплитуды поперечных составляющих, образуя эллиптическое вращающееся поле, которое можно рассматривать как результат деформации кругового поля симметричной машины, исследованной в приложении 3. Амплитуда этого эллиптического поля пульсирует с удвоенной частотой скольжения $2s$. Вследствие насыщения реактивные сопротивления, связанные с этим полем, также пульсируют вместе с амплитудой вращающегося поля. В установившемся режиме средние значения реактивностей определяются участком магнитной характеристики вблизи O' , где они удовлетворяют условию $\Delta_4 = 0$ [характеристическое уравнение (2.1) имеет два чисто мнимых корня $p_{1,2} = \pm j\sigma$].

Устойчивому стационарному режиму отвечает периодическое решение нелинейных уравнений (6) периода $\frac{2\pi}{s}$, где $s^0 = s$.

В фазных колебаниях статора имеют место биения с частотой $2s$.

Несимметричный синхронный режим (x_2). Характеристический показатель λ_5 для части системы (6) с периодическими коэффициентами равен нулю. Устойчивому режиму в этом случае соответствует периодическое решение нелинейной системы⁵ (6), где все переменные являются π -периодическими функциями Θ , средние значения которых (кроме отличных от нуля). Стабильность этого режима обусловлена наличием обратно-синхронного поля, пропорционального x_2 .

Несимметричный асинхронный режим (x_2). Линейная часть системы (6) имеет два чисто мнимых характеристических показателя $\lambda_{1,2} = \pm j\sigma$. Устойчивому режиму отвечает периодическое решение (6), где i_d, i_q, e_d, e_q, i_r — периодические функции Θ периода $\frac{2\pi}{s}$ и периода π и в симметричном режиме, s зависит от параметров колебательной системы и амплитуды колебаний. В фазных колебаниях статора будут иметь место биения с частотой $2s$.

Экспериментальное подтверждение теории. Развитая теория дает весьма простое и существенное объяснение большинству экспериментальных результатов, полученных Левинштейном [Л. 2, 3] при исследовании самовозбуждающейся модели явнополюсного синхронного генератора, работающего на емкостную нагрузку в симметричном и несимметричных режимах. В этих опытах до определенной степени вращения ротора не было никаких биений. Начиная с частоты f_2 , в колебаниях статора имеют место резкие биения частоты $2s$, а в культуре ротора индуктируются токи частотой s притом, чем больше сопротивление контура ротора, тем больше s . Совершенно очевидно, что частота f_2 есть не что иное, как нижняя граница синхронного самовозбуждения и верхняя граница асинхронного самовозбуждения. При несимметричных режимах имелось определенное критическое значение для сопротивления контура ротора, выше которого самовозбуждение не наступало в полном согласии с соответствующей фазой для $\theta = \lambda_5$. Левинштейн же неправильно объясняет происхождение биений периодическим нарушением и восстановлением условий самовозбуждения. Влияние постоянного тока возбуждения заключается не в нарушении магнитной связи между статором и ротором, а в переводе машины из области асинхронного самовозбуждения в область $x'_d < x'_q$.

Заключение. 1. Источником опасных динамических перенапряжений на сверхдальних линиях передачи с серьезной компенсацией могут быть процессы самовозбуждения явнополюсного синхронного генератора при работе как на симметричную, так и несимметричную емкостную нагрузку.

⁴ Неустойчивость точки A_0 означает опасность границы устойчивости $a_5 = 0$ в первом критическом случае Ляпунова [Л. 1,5].

⁵ Из соображений, высказанных выше, нелинейными в этом случае являются функции пульсирующих составляющих i_d, i_q и i_r .

2. В реальной машине с рассеянием энергии контурах статора и ротора при $x'_d < x_c < x_q$ имеет место асинхронное возбуждение, а при $x_c < x_d$ — синхронное возбуждение незатухающих колебаний значительной амплитуды.

3. Методы анализа, применяемые в настоящей работе, позволяют получить физически правильные выражения для инкрементов нарастания, затухания колебаний, скольжения поля статора относительно ротора и т. д. и объяснить продолжение той сложной формы, которую имеют собственные колебания в случае асинхронного самовозбуждения (биения с удвоенной частотой скольжения).

4. Полученные в работе теоретические результаты полностью подтверждаются результатами опытов по самовозбуждению вращающейся цепи явнополюсного синхронного генератора.

Приложение 1. (Решение дифференциальных уравнений самовозбуждения явнополюсного синхронного генератора). Рассмотрим сначала случай симметричной трехфазной нагрузки.

Представим уравнения (5) в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2\psi_\alpha}{d\theta^2} + \omega^2\psi_\alpha - \psi_\gamma \cos \theta &= \\ = -\mu\eta \{\psi_\alpha \cos 2\theta + \psi_\beta \sin 2\theta\}, \\ \frac{d^2\psi_\beta}{d\theta^2} + \omega^2\psi_\beta - \psi_\gamma \sin \theta &= \\ = -\mu\eta \{\psi_\alpha \sin 2\theta - \psi_\beta \cos 2\theta\}, \\ \frac{d\psi_\gamma}{d\theta} + \rho_1\psi_\gamma &= \mu\varepsilon (\psi_\alpha \cos \theta + \psi_\beta \sin \theta), \end{aligned} \right\} (1.1)$$

μ — произвольный параметр, который позже положим $\mu = \eta$ и ε — малые параметры. При $\eta = 0$ разложение сделать по ε вместо μ .

Частные решения (1.1), разыскиваемые под видом:

$$\psi_{ik} = e^{\lambda_k \theta} y_{ik}(\theta); \quad i = \alpha, \beta, \gamma, \quad k = 1, 2, \dots, 5 \quad (1.2)$$

ищем λ_k и y_{ik} по параметру μ

$$\begin{aligned} \lambda_k &= \lambda_k^{(0)} + \mu\lambda_k^{(1)} + \mu^2\lambda_k^{(2)} + \dots, \\ y_{ik} &= y_{ik}^{(0)} + \mu y_{ik}^{(1)} + \mu^2 y_{ik}^{(2)} + \dots, \end{aligned}$$

$$\lambda_1^{(0)} = +j\omega; \quad \lambda_{2,4}^{(0)} = -j\omega; \quad \lambda_5^{(0)} = -\rho_1 \quad (j = \sqrt{-1}).$$

Функции $y_{ik}^{(v)}$ должны удовлетворять условию периодичности

$$y_{ik}^{(v)}(\theta) = y_{ik}^{(v)}(\theta + 2\pi).$$

Положив (1.3) для $\lambda_1^{(0)} = j\omega$ в (1.1) и сравнив коэффициенты при одинаковых степенях μ , приходим к бесконечной последовательности линейных дифференциальных уравнений, из которой ограничимся лишь нулевым и первым приближениями.

Нулевое приближение:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 y_{\alpha 1}^{(0)} + 2j\omega \frac{dy_{\alpha 1}^{(0)}}{d\theta} - y_{\gamma 1}^{(0)} \cos \theta &= 0, \\ \rho_1 y_{\beta 1}^{(0)} + 2j\omega \frac{dy_{\beta 1}^{(0)}}{d\theta} - y_{\gamma 1}^{(0)} \sin \theta &= 0, \\ \frac{dy_{\gamma 1}^{(0)}}{d\theta} + (\rho_1 + j\omega) y_{\gamma 1}^{(0)} &= 0. \end{aligned} \right\} (1.4)$$

Единственное решение (1.4), удовлетворяющее условию периодичности, есть $y_{\alpha 1}^{(0)} = a_\alpha^{(0)}$, $y_{\beta 1}^{(0)} = a_\beta^{(0)}$, $y_{\gamma 1}^{(0)} = 0$, где a_i — постоянные.

Первое приближение:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 y_{\alpha 1}^{(1)}}{d\theta^2} + 2j\omega \frac{dy_{\alpha 1}^{(1)}}{d\theta} + 2j\omega \lambda_1^{(1)} a_\alpha^{(0)} - y_{\gamma 1}^{(1)} \cos \theta &= \\ = -\eta (a_\alpha^{(0)} \cos 2\theta + a_\beta^{(0)} \sin 2\theta), \\ \frac{d^2 y_{\beta 1}^{(1)}}{d\theta^2} + 2j\omega \frac{dy_{\beta 1}^{(1)}}{d\theta} + 2j\omega \lambda_1^{(1)} a_\beta^{(0)} - y_{\gamma 1}^{(1)} \sin \theta &= \\ = \eta (a_\beta^{(0)} \cos 2\theta - a_\alpha^{(0)} \sin 2\theta), \\ \frac{dy_{\gamma 1}^{(1)}}{d\theta} + (\rho_1 + j\omega) y_{\gamma 1}^{(1)} &= \varepsilon (a_\alpha^{(0)} \cos \theta + a_\beta^{(0)} \sin \theta). \end{aligned} \right\} (1.5)$$

Для того, чтобы $y_{\gamma 1}^{(1)}$ удовлетворяли условию периодичности, необходимо устранить вековые члены из решений первого приближения, приравняв нулю постоянные члены в первых двух уравнениях (1.5). Отсюда получаем:

$$\lambda_{1,3}^{(1)} = \varepsilon \frac{A_1 \mp jB}{A_2}, \quad (1.6)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \rho_1 (1 + \rho_1^2 + \omega^2) + j\omega [1 - (\rho_1^2 + \omega^2)], \\ B &= [\omega^2 - (1 + \rho_1^2) + 2j\omega\rho_1], \\ A_2 &= 4j\omega [\rho_1^2 + (1 + \omega^2)] [\rho_1^2 + (1 - \omega^2)]. \end{aligned} \right\} (1.7)$$

Таким образом, получаем:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1^{(1)} &= \varepsilon \frac{1 - \omega - j\rho_1}{4\omega [\rho_1^2 + (1 - \omega^2)]}, \quad (\lambda_1^{(1)})_D > 0 \text{ при } \omega < 1 \\ \lambda_3^{(1)} &= -\varepsilon \frac{1 + \omega - j\rho_1}{4\omega [\rho_1^2 + (1 + \omega^2)]}. \end{aligned} \right\} (1.8)$$

Для $\lambda_{2,4}^{(0)} = -j\omega$ значения для $\lambda_{2,4}^{(1)}$ будут комплексно сопряжены с $\lambda_{1,3}^{(1)}$.

Значению $\lambda_5^{(0)} = -\rho_1$ соответствует нулевое приближение:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_{\alpha 5}^{(0)}}{d\theta^2} - 2\rho_1 \frac{dy_{\alpha 5}^{(0)}}{d\theta} + (\omega^2 + \rho_1^2) y_{\alpha 5}^{(0)} - y_{\gamma 5}^{(0)} \cos \theta &= 0, \\ \frac{d^2 y_{\beta 5}^{(0)}}{d\theta^2} - 2\rho_1 \frac{dy_{\beta 5}^{(0)}}{d\theta} + (\omega^2 + \rho_1^2) y_{\beta 5}^{(0)} - y_{\gamma 5}^{(0)} \sin \theta &= 0, \\ \frac{dy_{\gamma 5}^{(0)}}{d\theta} &= 0, \end{aligned} \quad (1.9)$$

решением которого является

$$\left. \begin{aligned} y_{\alpha 5}^{(0)} &= \frac{a_{\gamma 5}^{(0)}}{(\omega^2 + \rho_1^2 - 1)^2 + 4\rho_1^2} \times \\ &\times [(\omega^2 + \rho_1^2 - 1) \cos \theta - 2\rho_1 \sin \theta], \\ y_{\beta 5}^{(0)} &= \frac{a_{\gamma 5}^{(0)}}{(\omega^2 + \rho_1^2 - 1)^2 + 4\rho_1^2} \times \\ &\times [2\rho_1 \cos \theta + (\omega^2 + \rho_1^2 - 1) \sin \theta], \\ y_{\gamma 5}^{(0)} &= a_{\gamma 5}^{(0)} = \text{const.} \end{aligned} \right\} (1.10)$$

Величину $\lambda_5^{(1)}$ определяем из условия периодичности решения уравнения

$$\frac{dy_{\gamma 5}^{(1)}}{d\theta} + \lambda_5^{(1)} y_{\gamma 5}^{(0)} = \varepsilon \{ y_{\alpha 5}^{(0)} \cos \theta + y_{\beta 5}^{(0)} \sin \theta \}, \quad (1.11)$$

откуда получаем:

$$\lambda_3^{(1)} = \epsilon \frac{\omega^2 + \rho_1^2 - 1}{(\omega^2 + \rho_1^2 - 1)^2 + 4\rho_1^2} \quad (1.12)$$

В случае несимметричной нагрузки поступаем аналогично. Например, при $x_{c\beta} = 0, \phi_\beta = 0$ нулевое приближение при $\lambda_{1,2}^{(0)} = \pm j\omega_a, \lambda_{3,4} = 0$ будет

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 y_{a1}^{(0)}}{d\theta^2} + 2j\omega \frac{dy_{a1}^{(0)}}{d\theta} &= y_{\gamma 1}^{(0)} \cos \theta, \\ \frac{dy_{\gamma 1}^{(0)}}{d\theta} + (\rho_1 + j\omega_a) y_{\gamma 1}^{(0)} &\approx 0, \\ y_{a1}^{(0)} &= a_a^{(0)}, y_{\gamma 1}^{(0)} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

а первое приближение будет

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 y_{a1}^{(1)}}{d\theta^2} + 2j\omega_a \frac{dy_{a1}^{(1)}}{d\theta} + \\ + 2j\omega_a \lambda_1^{(1)} a_a^{(0)} - y_{\gamma 1}^{(1)} \cos \theta &= 0, \\ \frac{dy_{\gamma 1}^{(1)}}{d\theta} + (\rho_1 + j\omega_a) y_{\gamma 1}^{(1)} &= a_a^{(0)} \cos \theta. \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

Решая (1.14), получим:

$$\lambda_1^{(1)} = -\epsilon \frac{(\omega_a^2 + \rho_1^2 - 1) + j\rho_1(1 + \rho_1^2 + \omega_a^2)}{[\rho_1^2 + (1 - \omega_a)^2][\rho_1^2 + (1 + \omega_a)^2]} \quad (1.15)$$

По аналогии с (1.12), можно сразу написать:

$$\lambda_3^{(1)} = \epsilon \frac{\omega_a^2 + \rho_1^2 - 1}{2[4\rho_1^2 + (\omega_a^2 + \rho_1^2 - 1)^2]} \quad (1.16)$$

Приложение 2. (Определение корней характеристического уравнения). Характеристическое уравнение линейной части (6) при $x_2 = 0$ есть

$$D(p) \equiv a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0, \quad (2.1)$$

где

$$a_0 = x'_d x_q, \quad a_1 = \rho_0 x_d x_q + r(x'_d + x_q), \quad (2.2)$$

$$a_2 = 2x'_d x_q + x_c(x'_d + x_q) + r\rho_0(x_d + x_q) + r^2,$$

$$a_3 = \rho_0[2x_d x_q + x_c(x_d + x_q)] +$$

$$+ r(2x_c + x'_d + x_q) + r^2 \rho_0,$$

$$a_4 = (x_c - x'_d)(x_c - x_q) + r\rho_0(2x_c + x_d + x_q) + r^2,$$

$$a_5 = [(x_c - x_d)(x_c - x_q) + r^2] \rho_0.$$

При $r = 0$ представим (2.1) в виде:

$$D(p) \equiv (p + \rho_1)[p^4 + 2p^2(1 + \omega^2) + (1 - \omega^2)^2 - \eta^2] -$$

$$-\epsilon \left(p^2 + \frac{x_c}{x_q} - 1 \right) = 0, \quad (2.3)$$

Здесь все коэффициенты имеют те же значения, что и в (5). Так как ϵ — всегда очень малый параметр, разложим корни уравнения (2.3) по ϵ при помощи обобщенной строки Лагранжа в форме, выведенной А. А. Горевым в [Л. 3].

Проделав соответствующие выкладки, получаем с точностью до первой степени ϵ следующие выражения для искомого корней:

$$\begin{aligned} p_{1,2} &= \pm j \sqrt{1 + \omega^2 - \sqrt{4\omega^2 + \eta^2}} \pm \\ &\pm j \frac{[2 + \eta - \sqrt{4\omega^2 + \eta^2}][\rho_1 \mp j \sqrt{1 + \omega^2 - \sqrt{4\omega^2 + \eta^2}}]}{4(\omega^2 + \rho_1^2 + 1 - \sqrt{4\omega^2 + \eta^2}) \sqrt{4\omega^2 + \eta^2} \sqrt{1 + \omega^2 - \sqrt{4\omega^2 + \eta^2}}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

и

$$p_3 = -\rho_1 + \epsilon \frac{\rho_1^2 + \frac{x_c}{x_q} - 1}{(\omega^2 + \rho_1^2 - 1)^2 + 4\rho_1^2 - \eta^2}$$

Если пренебречь η , то получаем:

$$p_{1,2} = \pm j(1 - \omega) + \epsilon \frac{1 - \omega \pm j\rho_1}{4\omega[\rho_1^2 + (1 - \omega)^2]}$$

$$p_3 = -\rho_1 + \epsilon \frac{\rho_1^2 + \frac{x_c}{x_q} - 1}{(\omega^2 + \rho_1^2 - 1)^2 + 4\rho_1^2}$$

Формулы (2.6) и (2.7) находятся в полном соответствии с выражениями из приложения 1 для $\lambda_{1,2}$ и λ_3 . В частности, так как $\rho_1 > 0$, то мнимая часть $p_{1,2}$, будучи частотой колебаний в цепи ротора, отличается от $J_m(\lambda_{1,2})$ на величину скорости вращения ротора ($\omega_r = 1$).

Приложение 3. (Уравнения симметричной машины). Дифференциальные уравнения в осях для переходных процессов в машине с симметричными продольным и поперечным контурами на цилиндровом роторе легко выводятся из уравнений (29.3) Горева [Г]. Их характеристическое уравнение:

$$D(p) \equiv a_0 p^6 + a_1 p^5 + a_2 p^4 + a_3 p^3 + a_4 p^2 + a_5 p + a_6 = 0,$$

где

$$a_1 = x'^2, \quad a_1 = 2x'r + 2x'x\rho_0,$$

$$a_2 = 2x_c x' + 2x'^2 + r^2 + (x\rho_0)^2 + 2r\rho_0(x' + x),$$

$$a_3 = 2(x_c + x')r + 2\rho_0[x_c(x' + x) + 2x'x] + 2r\rho_0 r^2 + 2r\rho_0^2 x,$$

$$a_4 = (x_c - x')^2 + 2\rho_0^2(x^2 + x_c x) +$$

$$+ 2r(2x_c + x' + x)\rho_0 + r^2(1 + \rho_0^2),$$

$$a_5 = 2(x_c - x')(x_c - x)\rho_0 + 2r^2\rho_0 + 2r\rho_0^2(x_c + x),$$

$$a_6 = [(x_c - x)^2 + r^2]\rho_0^2.$$

В данном случае всегда имеем $a_6 > 0; \Delta_3 < 0$, т. е. при условии $a_5 < 0$, которое при малом r равно $x' < x_c < x$.

Представим вышеупомянутые дифференциальные уравнения в векторной форме:

$$x \frac{di}{d\theta} + x_m \frac{di_r}{d\theta} + ri - jxi - jx_m i_r + e = 0,$$

$$(x - x') \frac{di}{d\theta} + x_m \frac{di_r}{d\theta} + \rho_0 x_m i_r = 0,$$

$$\frac{de}{d\theta} - je - x_c i = 0,$$

где

$$i = i_d + j i_q, \quad e = e_d + j e_q, \quad i_r = i_{rd} + j i_{rq}$$

Характеристическое уравнение третьего порядка (3.3) можно представить в виде:

$$D_1(p) \equiv (p + \rho_1)[(p - j)^2 + \omega^2] - \epsilon + r(p - j) \left(p \frac{x}{x'} + \rho_1 \right) = 0,$$

$$\omega^2 = \frac{x_c}{x'}, \quad \epsilon = \frac{x_c}{x'} \frac{x - x'}{x} \rho_1.$$

⁶ Отсюда вытекает возможность представления уравнения (3.1) в виде произведения двух сопряженных уравнений третьего порядка:

$$D(p) \equiv [A(p) + jB(p)][A(p) - jB(p)] = 0. \quad [Л. 7]$$

При $r=0$ асинхронному самовозбуждению отвечает жительное значение вещественной части корня

$$p_1 = -\rho_1 + \varepsilon \frac{\rho_1^2 + \omega^2 - 1 - j\rho_1}{[(\rho_1^2 + \omega^2 - 1)^2 + 4\rho_1^2]}. \quad (3.5)$$

Частота скольжения ротора

$$\sigma = \frac{\varepsilon\rho_1}{[(\rho_1^2 + \omega^2 - 1)^2 + 4\rho_1^2]}. \quad (3.6)$$

В стационарном режиме модули векторов i , e и i_r , скольжение σ должны иметь постоянные значения: $i = Ie^{j\omega t}$, $i_r = I_r e^{j\omega t}$, $e = Ee^{j\omega t}$. Но это круговое вращающее поле может являться решением уравнений (3.3) только в том случае, если вещественная часть корня p_1 равна нулю и реактивности машины имеют постоянное значение, не зависящее от токов в контурах. Следовательно, в стационарном режиме значения реактивности определяются по тем точкам магнитных характеристик, где коэффициенты a_k из (3.2) удовлетворяют условию $\Im a_k = 0$.

Условные обозначения.

- i_c — токи в фазах статора,
- i_c — потокосцепления фаз статора,
- i_β — токи в ортогональных контурах статора эквивалентной двухфазной машины,
- i_β — потокосцепления в контурах α и β ,
- i_r — ток в контуре ротора (возбуждения),
- i_r — потокосцепление контура ротора,
- i_r — приведенное потокосцепление контура ротора,
- r — активное сопротивление фаз статора,
- R — активное сопротивление контура ротора,
- x_d — синхронные реактивности машины в продольной и поперечной осях,

x_d' — переходная реактивность в продольной оси,
 x_{ad} — взаимная реактивность между фазами статора и контуром ротора.

$X_d = \omega_r L_{rd}$, L_{rd} — индуктивность контура ротора.

$\rho_0 = \frac{R}{X_d} = \frac{1}{T_0}$, T_0 — постоянная времени холостого хода машины (контура ротора),

$K_d = \frac{3}{2} \frac{x_{ad}^2}{X_d x_d}$ — коэффициент магнитной связи контуров статора с контуром ротора,

$\omega_r = 1$ — синхронная частота вращения машины,

ω_i — среднее значение собственной частоты контуров α и β ,

η_i — глубина модуляции ω_i , а также — амплитуда ($i = \alpha, \beta$) периодически меняющегося коэффициента связи между контурами α и β .

Литература

1. А. М. Ляпунов. Общая задача об устойчивости движения. Гостехиздат, 1950.
2. М. Л. Левинштейн. Явление параметрического резонанса при работе синхронной машины на емкостную нагрузку. Труды ЛПИ № 3, 1948.
3. А. А. Горев. Переходные процессы синхронной машины. Госэнергоиздат, 1950.
4. Р. М. Кантор. Теория динамических перенапряжений на линиях Куйбышевского гидроузла. Труды ВЭА, вып. 40, 1940.
5. Н. И. Баутин. Поведение динамических систем вблизи границ области устойчивости. Гостехиздат, 1949.
6. S. B. Crary. Two-Reaction Theory of Synchronous Machines. El. Eng., т. 56, стр. 27, № 1, 1937.
7. G. W. Butler и C. Concordia. Analysis of series Capacitor Application Problems. El. Eng. т. 56, стр. 975. № 8, 1937.

[25. 12. 1950]



Расчет ступеней пусковых реостатов для электроподвижного состава при изменяющемся пусковом токе

Б. А. ЛЕВИН

Ленинград

Расчет ступеней пусковых реостатов старых малоступенчатых систем управления электроподвижным составом, как известно, производится, исходя из заданного среднего пускового тока I_c , величина которого в течение всего времени пуска остается неизменной с колебаниями от $I_{мин}$ до $I_{макс}$. Средняя величина пускового ускорения также остается постоянной.

Современные системы управления электроподвижным составом—малоступенчатые и многоступенчатые—в целях повышения динамических свойств подвижного состава должны обеспечивать высокие значения пусковых ускорений. Старые малоступенчатые системы управления, учитывая значительные колебания пускового тока, могли обеспечить при двигательной тяге среднее ускорение не более $0,8 \text{ м/сек}^2$. Новые системы управления дают возможность в зависимости от числа ступеней получить среднее ускорение $1,3 \div 1,7 \text{ м/сек}^2$.

При этих высоких значениях средних ускорений необходимо для обеспечения плавного пуска постепенное увеличение ускорения с доведением его до максимума. Поэтому на первых ступенях пуска даются незначительные величины ускорений и соответственно пусковые токи с постепенным их нарастанием до максимальных значений.

Расчет ступеней пусковых реостатов в условиях нарастания ускорений и пускового тока при небольшом количестве ступеней может быть произведен обычно применяемым графическим методом. При многоступенчатом пуске применение графического метода затруднительно, кроме того, не обеспечивает достаточной точности. Существующий аналитический метод, предусматривающий постоянное значение пускового тока I_c для нарастающего пускового тока, неприменим, так как он предназначен для расчета ступеней при постоянном среднем пусковом

Предлагается аналитический метод расчета ступеней пусковых сопротивлений для электроподвижного состава при изменяющемся пусковом токе. Указывается область применения предлагаемого метода. Рекомендуются порядок расчета ступеней пусковых сопротивлений.

токе. Возникает необходимость нового аналитического метода расчета пусковых ступеней при изменяющемся пусковом токе, изложение которого

и является предметом статьи.

Предлагаемый аналитический метод расчета пусковых ступеней при изменяющемся пусковом токе может быть применен как при автоматическом, так и при неавтоматическом пуске любого числа пусковых ступеней. Метод может быть применен лишь в случае многоступенчатого автоматического пуска с сервоприводом, так как в этом случае сопротивления секций выбираются равными, а регулирование пускового тока достигается изменением скорости вращения серводвигателя вращающего контактные ролики или щетки.

Сущность предлагаемого аналитического метода расчета заключается в том, что аналитически выполняются те операции, которые обычно было бы провести при графическом методе расчета (рис. 1).

Введем обозначения (рис. 1): r_1, r_2, r_3 —сопротивления пусковых ступеней; прямая ab — $r = f_1(v)$ при $I = I_{1 мин}$; cd — $r = f_2(v)$ при $I = I_{1 макс}$; ef — $r = f_3(v)$ при $I = I_{2 мин}$; mn — $r = f_4(v)$ при $I = I_{2 макс}$ и т. д. $r'_0, r''_0, r'''_0, \dots, r_{0p}$ —расчетные сопротивления при токах $I_{1 мин}, I_{2 мин}, I_{3 мин}, \dots, I_{p мин}$; соответственно, $I_{1 макс}, I_{2 макс}, I_{3 макс}, \dots, I_{p макс}$; $v_1, v_2, v_3, \dots, v_p$ —скорости при $r = 0$; $r'_1, r'_2, r'_3, \dots, r'_{1p}$ —то же, но при токах $I_{1 макс}, I_{2 макс}, I_{3 макс}, \dots, I_{p макс}$; $v'_1, v'_2, v'_3, \dots, v'_{1p}$ —скорости при $r = 0$; $v''_1, v''_2, v''_3, \dots, v''_{1p}$ —то же, но при токах $I_{1 мин}, I_{2 мин}, I_{3 мин}, \dots, I_{p мин}$; $v_1, v_2, v_3, \dots, v_p$ —скорости в момент перехода на 2-ю, 3-ю, 4-ю, ... $p+1$ ступень сопротивления.

Для вывода формулы для расчета величины r n -ой ступени сопротивления пускового реостата напомним уравнения прямых (рис 1):

$$ab \quad r = r'_0 - \frac{r'_0}{v_2} v;$$

$$cd \quad r = r'_1 - \frac{r'_1}{v_1} v;$$

$$ef \quad r = r''_0 - \frac{r''_0}{v_2} v;$$

$$mn \quad r = r''_1 - \frac{r''_1}{v_1} v;$$

$$pq \quad r = r'''_0 - \frac{r'''_0}{v_2} v;$$

$$xy \quad r = r'''_1 - \frac{r'''_1}{v_1} v.$$

Как видно из рис. 1, если подставить в уравнение для ab $r = r'_1$, получим:

$$v = v_1; \quad r'_1 = r'_0 - \frac{r'_0}{v_2} v_1,$$

$$v_1 = (r'_0 - r'_1) \frac{v_2}{r'_0}.$$

Чтобы получить r_2 (вторая ступень сопротивления), нужно в уравнение для mn подставить $v = v_1$:

$$r_2 = r''_1 - \frac{r''_1}{v_1} (r'_0 - r'_1) \frac{v_2}{r'_0}.$$

Обозначив $a_1 = \frac{r''_1 v_2}{v_1 r'_0}$, можем написать $r_2 = r''_1 - a_1 (r'_0 - r'_1)$. Скорость v_2 получим, если в уравнение для ef подставим $r = r_2$:

$$r''_1 - a_1 (r'_0 - r'_1) = r''_0 - \frac{r''_0}{v_2} v_2,$$

отсюда

$$v_2 = (r''_0 - r''_1) \frac{v_2}{r''_0} + (r'_0 - r'_1) a_1 \frac{v_2}{r'_0}.$$

r_3 получим, если в уравнение для xy подставим $v = v_2$:

$$r_3 = r'''_1 - \frac{r'''_1}{v_1} \left[(r''_0 - r''_1) \frac{v_2}{r''_0} + (r'_0 - r'_1) a_1 \frac{v_2}{r'_0} \right],$$

обозначив $a_2 = \frac{r'''_1 v_2}{v_1 r''_0}$, можем

написать:

$$r_3 = r'''_1 - a_2 (r''_0 - r''_1) - a_1 a_2 (r'_0 - r'_1).$$

r_4, r_5 и т. д. можно найти аналогичным путем.

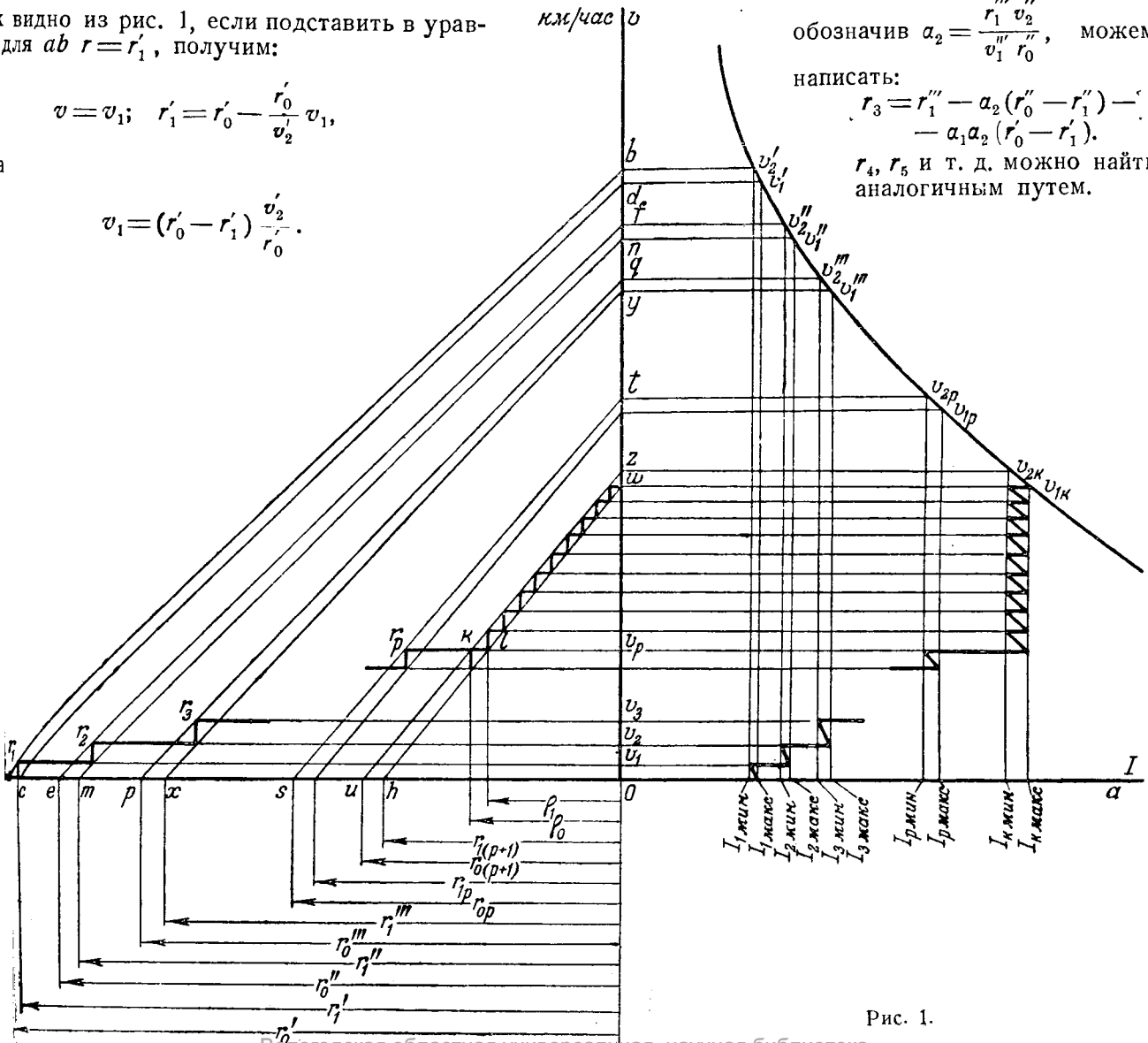


Рис. 1.

Таким образом, можно написать:

$$\begin{aligned}
 r_1 &= r'_1, \\
 r_2 &= r''_1 - a_1(r'_0 - r'_1), \\
 r_3 &= r'''_1 - a_1 a_2(r'_0 - r'_1) - a_2(r''_0 - r''_1), \\
 r_4 &= r''''_1 - a_1 a_2 a_3(r'_0 - r'_1) - a_2 a_3(r''_0 - r''_1) - a_3(r'_0 - r'_1), \\
 &\dots \\
 r_{k-1} &= r_{1(k-1)} - a_1 a_2 \dots a_{k-2}(r'_0 - r'_1) - \\
 &\quad - a_2 a_3 \dots a_{k-2}(r''_0 - r''_1) - \dots - \\
 &\quad - a_{k-2}[r_{0(k-2)} - r_{1(k-2)}], \\
 r_k &= r_{1k} - a_1 a_2 a_3 \dots a_{k-1}(r'_0 - r'_1) - \\
 &\quad - a_2 a_3 \dots a_{k-1}(r''_0 - r''_1) - \dots - \\
 &\quad - a_{k-1}[r_{0(k-1)} - r_{1(k-1)}],
 \end{aligned}$$

где

$$a_3 = \frac{r''''_1 v''_2}{v''_1 r''_0}$$

$$a_{k-1} = \frac{r_{1k} v_2(r_{k-1})}{v_{1k} r_{0(k-1)}}$$

Обозначим

$$\begin{aligned}
 c_{k-1} &= a_1 a_2 \dots a_{k-2}(r'_0 - r'_1) - \\
 &\quad - a_2 a_3 \dots a_{k-2}(r''_0 - r''_1) - \dots - \\
 &\quad - a_{k-2}[r_{0(k-2)} - r_{1(k-2)}],
 \end{aligned}$$

тогда

$$r_{k-1} = r_{1(k-1)} - c_{k-1}; \tag{1}$$

$$r_k = r_{1k} - a_{k-1} \{c_{k-1} + [r_{0(k-1)} - r_{1(k-1)}]\}. \tag{2}$$

Первое и третье слагаемые выражения в фигурных скобках (2) дают величину r_{k-1} согласно уравнению (1), поэтому окончательная формула для расчета любой ступени пускового реостата будет:

$$r_k = r_{1k} - a_{k-1}[r_{0(k-1)} - r_{k-1}], \tag{3}$$

где r_k — k -ая ступень, r_{k-1} — $k-1$ -ая ступень сопротивления.

Расчет ступеней реостата по (3) осуществляется следующим образом.

Задаваясь ускорением на соответствующих пусковых ступенях, находим силу тяги согласно уравнению движения экипажа

$$F = Ma + w, \tag{4}$$

где F — сила тяги;

M — приведенная масса экипажа;

a — среднее ускорение на соответствующей ступени;

w — сопротивление движению.

По тяговой характеристике $F = f(I)$ определяем ток на этих ступенях. Задаввшись коэффи-

циентом неравномерности k_n , определяем

$$I_{мин} \left(k_n = \frac{I_{макс} - I_{мин}}{2I} \right).$$

По формуле (3) находим величину сопротивления ступеней реостата. Вычисления свои в таблицу.

Пример. Требуется рассчитать ступени пускового реостата при изменяющемся пусковым токе для экипажа с тяговым двигателем ДК-201 Б, характеристики которого даны на рис. 2. Пуск — неавтоматический и ступенчатый коллекторный. Напряжение сети $U = 55$ В. Ток параллельной обмотки возбуждения при $i = 3,5$ а. Сопротивление двигателя $\Sigma R = 0,4$ о.м. Приведенная масса экипажа $M = 1280$ кг, $сек^2/м$. Сопротивление движению экипажа $w = 200$ кг. Начальное ускорение $a_{нач} = 0,30$ м/сек². Конечное ускорение экипажа $a_1 = 1,33$ м/сек². Приращение ускорения при переходе тактовой щетки с одной коллекторной пластины на другую реостата на другую (соседнюю) принимаем равным $0,04$ м/сек². Коэффициент неравномерности k_n . Ввиду малости колебаний пускового тока при $I_c =$

отношения $\frac{v'_2}{v'_1}, \frac{v''_2}{v''_1}, \frac{v'''_2}{v'''_1}$ и т. д. принимаем равными

единице. Согласно формуле (3) в приведенной ниже таблице произведен расчет пускового реостата при изменяющемся пусковым токе.

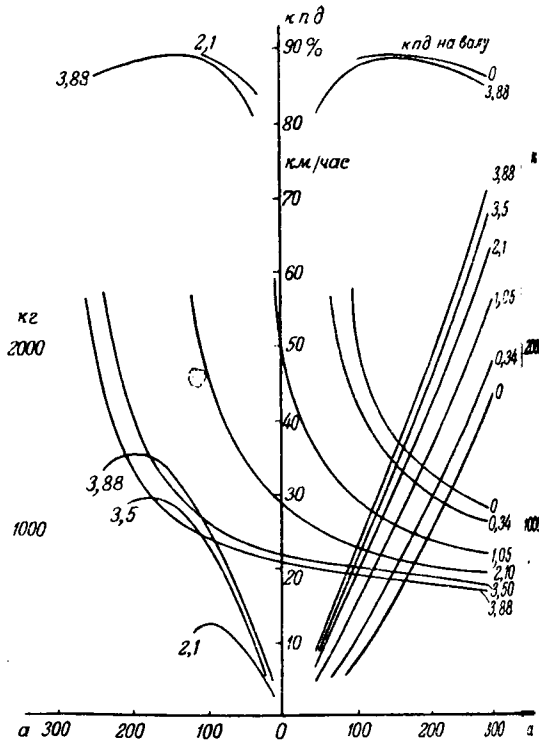


Рис. 2. Характеристики двигателя ДК-201Б.

Иногда приходится рассчитывать пусковые реостаты при заданном числе ступеней. В этом случае производится расчет следующий:

1. Рассчитываем величины сопротивлений между ступенями, т. е. ступеней, на которых средний пусковой ток не остается постоянным, указанным выше током (числом переходных ступеней задаемся, если не задано).

¹ Выбор величины приращения ускорения и коэффициента неравномерности обусловлен отсутствием измерительных устройств при многоступенчатом коллекторном пуске.

ступеней	$a, м/сек^2$	$F_c, кз$	$I_c, а$	$I_{макс}, а$	$I_{мин}, а$	$r_{1к}, ом$	$r_{0к}, ом$	α_{k-1}	$\frac{r_{0(k-1)}}{r_{1(k-1)}}$ ом	$r_k, ом$
1	0,30	584	75	75,8	74,2	7,050	7,200	—	—	7,050
2	0,34	635	80	80,8	79,2	6,610	6,740	0,917	0,133	6,472
3	0,38	686	85	85,9	84,1	6,200	6,340	0,919	0,246	5,954
4	0,42	737	90	90,9	89,1	5,850	5,970	0,922	0,356	5,494
5	0,46	790	95	96,0	94,0	5,520	5,650	0,926	0,441	5,089
6	0,50	840	100	101,0	99,0	5,240	5,360	0,928	0,521	4,719
7	0,54	890	105	106,1	103,9	4,980	5,090	0,929	0,595	4,385
8	0,58	942	111	112,1	109,9	4,710	4,810	0,923	0,651	4,059
9	0,62	994	116	117,2	114,8	4,490	4,580	0,934	0,702	3,788
10	0,66	1045	122	123,2	120,8	4,360	4,350	0,929	0,736	3,524
11	0,70	1096	127	128,3	125,7	4,080	4,170	0,938	0,775	3,305
12	0,74	1146	132	133,3	130,7	3,920	4,010	0,939	0,813	3,107
13	0,78	1198	137	138,4	135,6	3,770	3,860	0,940	0,849	2,921
14	0,82	1250	142	143,4	140,6	3,630	3,710	0,940	0,882	2,748
15	0,86	1300	147	148,5	145,5	3,500	3,580	0,943	0,907	2,593
16	0,90	1350	152	153,5	150,5	3,380	3,450	0,944	0,931	2,449
17	0,94	1400	157	158,6	155,4	3,270	3,340	0,947	0,949	2,321
18	0,98	1455	162	163,3	160,4	3,160	3,225	0,945	0,964	2,196
19	1,02	1505	163	169,7	166,3	3,020	3,105	0,943	0,968	2,072
20	1,06	1557	174	175,7	172,3	2,930	2,990	0,944	0,975	1,955
21	1,10	1610	180	181,8	178,2	2,825	2,885	0,944	0,977	1,848
22	1,14	1660	186	187,9	184,1	2,725	2,785	0,944	0,979	1,746
23	1,18	1710	192	193,9	190,1	2,635	2,690	0,946	0,983	1,652
24	1,23	1775	198	200,0	196,0	2,550	2,605	0,947	0,984	1,566
25	1,28	1840	204	206,0	202,0	2,470	2,520	0,948	0,985	1,485
26	1,33	1902	210	212,1	207,9	2,390	2,440	0,948	0,982	1,408

Находим скорость в момент перехода с последней ступени на следующую ступень v_p (рис. 1). Как видно из рис. 1, скорость v_p найдем, если вычтем прямой st

$$r = r_{0p} - \frac{r_{0p}}{v_{2p}} v$$

или $r = r_p$:

$$r_p = r_{0p} - \frac{r_{0p}}{v_{2p}} v_p$$

$$v_p = (r_{0p} - r_{1p}) \frac{v_{2p}}{r_{0p}}$$

уравнения прямых

$$uz \dots r = r_{0(p+1)} - \frac{r_{0(p+1)}}{v_{2(p+1)}} v, \quad (5)$$

$$hw \dots r = r_{1(p+1)} - \frac{r_{1(p+1)}}{v_{1(p+1)}} v. \quad (6)$$

Подставив в уравнения (5) и (6) $v = v_p$, получим (рис. 1):

$$r_0 = r_{0(p+1)} - \frac{r_{0(p+1)}}{v_{2(p+1)}} v_p, \quad (7)$$

$$r_1 = r_{1(p+1)} - \frac{r_{1(p+1)}}{v_{1(p+1)}} v_p, \quad (8)$$

где r_0, r_1 — расчетные сопротивления при токах соответственно $I_{кмин}$, $I_{кмакс}$ и при $v = v_p$.

Легко видеть, что дальнейший расчет сводится к расчету ступеней реостата при постоянном среднем пусковом токе с заданным числом пусковых ступеней. Все отличие расчета будет заключаться в том, что вместо прямых uz и hw необходимо рассматривать прямые kz и hw , относя их к осям $v_p v$ и $v_p r_p$.

Литература

1. В. А. Шевалин. Тяговые расчеты электрических железных дорог и трамваев. Кууоч, 1931.
2. Б. Н. Тихменев. Подвижной состав электрических железных дорог. Трансжелдориздат, 1939.
3. Ю. М. Галонен. Из истории русского трамвая. Электричество, № 6, 1949.

[3. 11. 1950]



Выбор автоматов для защиты машин главного привода прокатных станов

Инж. Б. Я. ПРИВАЛЬСКИЙ

Трест „Уралэлектромонтаж“

Для защиты машин постоянного тока больших мощностей, устанавливаемых в качестве электропривода реверсивных станов горячей прокатки, в настоящее время предусмотрены два типа автоматов — АВ-45 и ВАБ-2.

Номинальные данные автомата АВ-45 — 750 в, 6 000 а. Номинальные данные автомата ВАБ-2 — 1 500 в, 3 000 а. Автомат ВАБ-2 поляризованный, иначе говоря, его максимальная защита действует лишь при определенном направлении тока, на которое он настраивается. При другом направлении тока автомат не отключает.

Это свойство автомата вынуждает ставить для защиты электрических машин, в которых может иметь место любое направление сверхтока, двойной комплект автоматов, поляризованных в разных направлениях. По этой причине, а также вследствие меньшего, в сравнении с автоматом АВ-45, номинального значения тока автоматы типа ВАБ-2 мало применяются для защиты электрических машин главных приводов прокатных станов.

Однако автомат типа ВАБ имеет одно большое достоинство. Время действия автомата АВ-45, составляющее для его лучших образцов сотые доли секунды при напряжении 750—800 в, превосходит время действия автомата ВАБ-2 в 12—15 раз (тысячные доли секунды). Эти времена относятся к отключению цепей машин постоянного тока.

По нашему мнению, не считаясь с необходимостью удвоения комплекта, свойству быстродействия следует отдавать предпочтение по следующим соображениям:

В цепях машин постоянного тока вследствие малых индуктивностей в якорной цепи при возникновении короткого замыкания скорость нарастания тока составляет 3—5 млн. а/сек [Л. 4]. При больших мощностях машин максимальные зна-

Указано на неудовлетворительность защиты крупных машин постоянного тока прокатных установок, осуществляемой с помощью низковольтных автоматов медленного действия типа АВ-45 (А2080). Отмечена недопустимость применения этих автоматов в последовательном соединении в тех случаях, когда напряжение защищаемых машин значительно превышает напряжение автоматов. Выявлены большие преимущества быстродействующих поляризованных автоматов типа ВАБ-2 и необходимость включения в номенклатуру изготавливаемых автоматов, быстродействующих неполяризованных автоматов, необходимых для надежной защиты машин.

чения тока достигают нескольких сотен тысяч пер [Л. 1]. Примерная зависимость нарастания тока короткого замыкания от времени в цепях машин постоянного тока указана нами на рисунке.

При столь больших величинах скорости нарастания тока короткого замыкания каждая до-

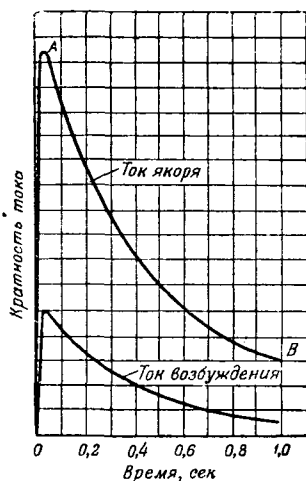
ля секунды, затраченная на отключение автомата, дает возможность току короткого замыкания увеличиться на 30—50 тыс. а. Таким образом, практически автомат со временем отключения в сотые доли секунды не ограничивает величину тока короткого замыкания и вызываемое им развитие аварии. Кроме того, сотые доли секунды значительно превышают время распространения кругового огня по коллектору, и автомат с таким временем действия не защищает машины от кругового огня — очень тяжелого вида аварии. Уместно отметить, что «особенно опасен круговой огонь для мощных высоковольтных машин, он весьма разрушителен [Л. 4].

Таким образом, две основные функции защиты — ограничение тока короткого замыкания и защита от распространения кругового огня никак не могут быть возложены на автомат АВ-45 вследствие значительного времени действия. Этот автомат является неудовлетворительным защитным аппаратом для машин больших мощностей.

Сравнительные испытания автомата А2080 — прототипа автомата АВ-45 — и автомата ВАБ-2 проводились еще в 1939 г. Результаты испытаний автомата А2080 привели к следующим заключениям [Л. 1]:

«В связи с этим (большим временем действия Б. П.) нет оснований утверждать, что автомат А2080 защищает установки от разрушительного действия динамических сил больших токов короткого замыкания».

«...испытываемый автомат (А2080, Б. П.)



Кратность тока короткого замыкания в зависимости от времени (М.П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть фиг. 355).

ет защищать машины постоянного тока от «огня».

Относительно автомата ВАБ-2, испытанного в различных условиях, дано такое заключение: «Ограничение тока короткого замыкания быстросрабатывающими автоматами (ВАБ-2. Б. П.) идет за собой:

а) облегчение процесса отключения и значительное уменьшение звукового и светового эффекта;

б) уменьшение электродинамических сил в аппаратах, машинах и проводах. Так, на автомате БДА вызывает в установках увеличение динамических сил в 6—7 раз, а на автомате ВАБ — в 40 раз по сравнению с теми условиями, которые могут возникнуть в установках, оснащенных автоматами А2080;

в) малое время отключения короткого замыкания быстросрабатывающими автоматами позволяет защищать при их наличии машины постоянного тока от кругового огня.

Все перечисленные обстоятельства привели в настоящей статье к убеждению, что для крупных промышленных установок постоянного тока от указанных выше разрушительных действий весьма больших токов короткого замыкания следует применять быстросрабатывающие автоматы» [Л. 1].

Весьма убедительные сравнительные испытания автоматов и опыт их эксплуатации заставляют считать автоматы АВ-45 совершенно необходимыми для защиты машин постоянного тока больших мощностей.

Впервые пришлось наблюдать, как при одной из аварий на блюминге НТМЗ, до отключения автоматов имело место полное развитие кругового огня на трех параллельно работающих коллекторах.

На научно-технических сессиях ВНИТОЭ по электрическим машинам (ноябрь 1946 г.) и по приводам (декабрь 1947 г.) указывалось

на острую необходимость разработки конструкций быстросрабатывающих автоматов на 3 000—6 000 а, годных для защиты электрических машин больших мощностей [Л. 2].

Учитывая неудовлетворительную работу автоматов АВ-45 и громоздкость установки поляризованных автоматов ВАБ-2 при защите машин, Свердловское проектно-конструкторское управление треста «Уралэлектромонтаж» еще в 1947 г. заказало на заводе «Уралэлектроаппарат» быстросрабатывающие автоматы, неполяризованные типа ВАБ-8Н, 1 500 в, 5 000 а, для машин главного привода рельсобалочного стана НТМЗ. В 1947 г., по чертежам автора — конструктора автоматов ВАБ инж. А. И. Голубева опытные образцы подобных автоматов были изготовлены, но их серийное производство налажено не было.

Таким образом, в настоящее время при проектировании установок машин постоянного тока большой мощности, как и 18 лет назад, приходится выбирать один из двух вариантов установки автоматов: АВ-45 либо поляризованный ВАБ-2.

При выборе автомата также следует учесть, что автомат АВ-45 выполняется по чертежам ранее выпускавшегося автомата А2080, номинальное напряжение которого 500 в. Испытания автомата А2080, результаты которых приведены выше, выполнялись при напряжении, не превышающем 500 в.

Между тем, при этом напряжении время гашения дуги, входящее в полное время отключения автомата, быстро растет с увеличением напряжения разрываемой цепи. В специальных работах о дуге [Л. 3] указывается для автоматостроения напряжение постоянного тока 500 в как порог, до которого не требуется каких-либо специальных мер для гашения дуги. Там же указывается, что при напряжении свыше 500 в применение специальных гасящих устройств является обязательным. Автомат А2080, а вместе с ним и автомат АВ-45, как неимеющий специальных дугогасящих устройств, относится, следовательно, к низковольтным и маркирован на 500 в номинального напряжения. Остается неясным, почему автомат АВ-45, выполняемый по чертежам автомата А2080, маркирован на напряжение 750 в.

В отечественной практике применяют для машин главного привода крупных прокатных станов напряжения 750, 800 и 920 в. Уже в этих случаях нельзя допускать установку низковольтных (500 в) автоматов, если сознательно не идти на значительное увеличение времени отключения автомата. Между тем, известны отдельные случаи, когда в конкретном проекте напряжение машин более высокого напряжения. В частности, в одном конкретном проекте напряжение машин главного привода составляло 1 260—1 400 в при токе 4 600 а.

В этом случае была применена установка в одном полюсе четырех поляризованных автоматов типа ВАБ-2—3 000/15, 1 500 в, 3 000 а в последовательно-параллельном соединении. Был предложен и другой вариант — установка

автоматов АВ-45 в одном полюсе в последовательном соединении.

При выборе авторы варианта установки двух последовательно соединенных автоматов АВ-45 исходили из того, что автоматы будут отключаться одновременно. В действительности имеется много оснований полагать, что в некоторых случаях может иметь место разрыв цепи только одним автоматом, тогда напряжения на дугах обоих автоматов будут обычно разными и лишь случайно одинаковыми.

Полное время отключения автомата складывается из собственного времени автомата и времени, потребного на разрыв дуги.

Собственное время зависит от конструкции выполнения автомата. Нет основания ожидать, что практически собственные времена обоих автоматов будут всегда равны.

Времена, потребные на разрыв дуги, будут одинаковыми только при равенстве разрываемых напряжений. Однако скорости нарастания напряжения на дуговых промежутках, определяющие величину напряжения в момент разрыва, обычно будут разными для обоих автоматов вследствие различного воздействия ряда факторов: температуры контактов, состояния их поверхностей, пути движения дуги, состояния поверхностей, размеров и расположения камер и др.

Таким образом, времена отключения обоих автоматов могут оказаться разными.

Наконец, разрыв цепи только одним автоматом может произойти вследствие расхождения в уставках тока трогания.

При погрешности максимальных реле в $\pm 10\%$ уставки на автоматах могут вместо заданных, например, в 15 000 а, оказаться: на одном автомате 15 000 — 10% — 13 500 а, на другом автомате — 15 000 + 10% — 16 500 а. При перегрузке в 14 000 а вполне понятно, что отключит первый автомат и не придет в действие максимальное реле другого автомата.

Подобное отключение одним автоматом может иметь место не только при полной противо-э. д. с. двигателя, но и при полном ее отсутствии или небольшом ее значении. К таким случаям можно отнести, например, захват «холодного» слитка валками с малой (почти нулевой) скорости или при захвате с малой скорости нормального по температуре слитка, но с недопустимым обжатием.

Подобное же недопустимое отключение при отсутствии противо-э. д. с. двигателя одним автоматом может иметь место и при аварийной потере или ослаблении возбуждения прокатного двигателя.

Таким образом, практически могут иметь место при установке двух последовательно включенных автоматов случаи недопустимого разрыва цепи одним автоматом.

В варианте установки четырех поляризованных автоматов ВАБ-2 разрыв цепи 1 260—1 400 в одним автоматом ВАБ-2 является во всех случаях вполне допустимым по номинальным данным автомата. Параллельно подключаемый автомат в этом варианте предусматривается лишь из

соображений разгрузки контактов по нагреву время работы вследствие того, что номинальный ток цепи превышает ток автомата.

Установка двух автоматов ВАБ-2, несмотря на громоздкость, будучи быстродействующей обеспечивает, следовательно, надежную защиту машин. Кроме того, в данном случае напряжение защищаемой цепи не превосходит номинальные напряжения автоматов.

Сторонники установки автоматов АВ-45 двигают против установки автомата ВАБ-2 верное положение, будто бы для защиты главного привода прокатных станов автоматы ВАБ-2 не могут быть применены, как не удовлетворяющие требованию большого числа включений. Следует отметить, что подобное требование может быть предъявлено к контактору, отнюдь не к автомату любой установки, включая и установки прокатных станов. Ни в каталогах ни в какой-либо другой литературе нет указания об ограничении обычно потребного числа включений и отключений автомата типа ВАБ-2. Более того, согласно информации завода-изготовителя 1) автомат ВАБ-2 в обесточенном состоянии удовлетворительно проходит кроме прочих испытаний по ГОСТ 2 000 отключений и включений по звонковой схеме; 2) практика эксплуатации около 100 автоматов ВАБ-2 на одном заводе в течение почти 10 лет показала, что, несмотря на ежедневные отключения нескольких автоматов при токе до 30 000 а (по осциллограммам за это время ни на одном автомате контакты не изменялись).

Это количество включений и отключений, допускаемых автоматом ВАБ-2 под током и без тока, с большим запасом покрывает необходимость в весьма редких отключениях автоматов, которые имеют место в прокатных установках.

Кстати, следует отметить, что согласно опыту наладки автоматов регулировка автомата АВ нарушается после нескольких следующих друг за другом отключений (до 10 отключений) и имеет место отказы в последующих включениях.

На основании изложенного следует сделать следующие выводы:

1. Необходимо включить в нормальную номенклатуру быстродействующих автоматов не поляризованных автоматов типа ВАБ 1500 5 000 а и 3 000 а.

2. Автомат АВ-45 допустимо использовать лишь в тех случаях, когда защищаемый объект не требует быстродействующей защиты, и напряжение защищаемого объекта не превышает 50 постоянного тока.

3. При наличии требования быстродействующей защиты машин следует устанавливать выпуск неполяризованного быстродействующего автомата двойной комплект поляризованных автоматов типа ВАБ-2 из нормальной существующей номенклатуры автоматов.

4. При напряжении защищаемого объекта значительно превосходящего 500 в, следует устанавливать не двойной комплект автоматов АВ-45, а двойной комплект поляризованных ав

ов ВАБ-2, до выпуска неполяризованных выключательных автоматов.

5. Заводы-изготовители автоматов ВАБ-2 жны провести испытания этих автоматов целью повышения допустимости для автомата ов нагрузки путем применения принудительной вентиляции.

Литература

1. О. Б. Брон, Л. Б. Гальперин. Опыты отключения весьма больших токов короткого замыкания.

Вестник Харьковского электромеханического завода им. Сталина, № 5, 1939.

2. А. Л. Игрицкий. Низковольтные автоматические выключатели и пути их развития. Электричество, № 10, 1948.

3. О. Б. Брон. Движение дуги в магнитном поле, Госэнергоиздат, 1944.

4. М. П. Костенко. Электрические машины. Специальная часть. Госэнергоиздат, 1949.

[28. 8. 1950]



О магнитной проницаемости при индукционном нагреве

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

Ленинградский политехнический институт
им. Калинина

Поверхностная удельная мощность (P_s) при этих устройствах для индукционного нагрева ферромагнитных металлов обычно либо задается, определяется в

Уточняется вопрос о расчете устройств для индукционного нагрева ферромагнитных металлов посредством количественного определения магнитной проницаемости μ не в зависимости от напряженности магнитного поля H , неизвестного заранее при проектировании, а в зависимости от поверхностной удельной мощности (P_s).

нений могут быть определены по общеизвестным полуэмпирическим формулам вида

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t + \beta t^2 \dots),$$

в процессе проектирования из технологических требований перед тем, как производить расчеты электрических и энергетических характеристик специальных электротермических устройств. Обычно определение магнитной проницаемости целесообразно производить не в зависимости от напряженности магнитного поля (H), неизвестного вначале проектирования, а в зависимости от поверхностной удельной мощности (P_s). Расчеты почти всех электротехнических устройств и в особенности тех из них, в которых имеет место наложение электромагнитных полей, должны выполняться только на основе известных физических свойств материалов, используемых в проектируемой конструкции. В устройствах для индукционного нагрева точное знание электрических свойств материалов является особенно необходимым, так как последние рассматриваются не только как элементы конструкции, но и как материалы, подвергаемые технологическим изменениям и от которых непосредственно зависят все электрические и энергетические характеристики соответствующего агрегата. К физическим свойствам металлов, знание которых особенно необходимо при индукционном нагреве, относятся такие, как удельное сопротивление (ρ), индуктивная проницаемость (μ). Эти свойства должны быть известными во всем диапазоне изменений в зависимости от таких переменных, как температура (t) и напряженность намагничивающего поля (H).

с учетом переменных температурных коэффициентов α , β , в зависимости от температуры (t) соответствующего химического состава сплава и его предшествующего нагреву структурного состояния. Однако несомненно большую точность расчетов и с наибольшей простотой можно достигнуть при пользовании опытными зависимостями $\rho(t)$. На рис. 1 показаны значения удельных сопротивлений многих сплавов на железной основе, чаще других подвергаемых индукционному нагреву. Характер зависимостей $\rho(t)$ оказывается в достаточной мере общим для всех марок сталей, что позволяет даже для неизвестного химического состава, зная начальное значение ρ_0 , определить с достаточным приближением его значение при любой температуре.

В отношении значений магнитных проницаемостей различных ферромагнитных металлов и сплавов, которые надлежит принимать при расчете электрических и энергетических характеристик устройств для индукционного нагрева, целесообразно предварительно рассмотреть зависимости $\mu(H)$ для многих из них. Такие зависимости $\mu(H)$ показаны (рис. 2) на основе литературных данных [Л. 1,2] и по собственным измерениям путем пересчета из основной кривой намагничивания. Приведенные графики зависимостей $\mu(H)$ дают наглядное представление об изменении μ не только от напряженности поля (H), но и от химического состава и от предшествующего нагреву структурного состояния. Характер зависимостей $\mu(H)$ позволяет судить о том, что значительное отличие в магнитных свойствах различных сплавов имеют

удельные сопротивления металлов и их сплавов и зависимость $\rho(t)$ без особых затруд-

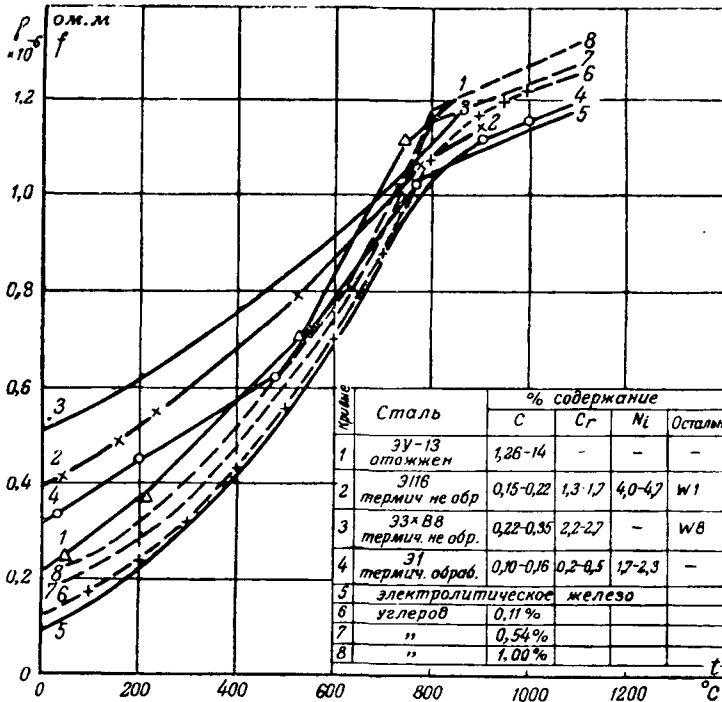


Рис. 1. Изменение удельного сопротивления ферромагнитных сплавов при нагреве.

только в области слабых полей и особенно в восходящей части кривой $\mu(H)$. С увеличением напряженности поля в пределах нисходящей ветви зависимости $\mu(H)$ отличие в магнитных свойствах различных сплавов все более и более уменьшается, и при значениях $H = 10^4$ а/м все кривые практически сходятся в одну.

Устройства для индукционного нагрева металлов характеризуются применением весьма значительных напряженностей полей, доходящих до сотен тысяч а/м, и использование при расчете характеристик общей для всех сплавов зависимости $\mu(H)$ является значительно облегчающим обстоятельством. Тем более оказывается возможным во всех расчетах устройств для индукционного нагрева принимать усредненную зависимость $\mu(H)$ для всех сплавов на железной основе, что численное значение μ почти во все формулы входит в половинной степени, отчего и погрешность такого усреднения еще более уменьшится.

Температурная зависимость магнитной проницаемости $\mu(t)$ при проектировании или эксплуатации устройств для индукционного нагрева ферромагнитных материалов, в свою очередь, существенно влияет на изменение электрических и энергетических характеристик. Графики зависимостей $\mu(t)$ для нескольких сортов сталей при значениях напряженностей поля от 2500 до 10^5 а/м, приведенные на рис. 3, показывают, что до температуры $500 \div 600^\circ\text{C}$ магнитная проницаемость остается почти постоянной и соответствующей значению H . Поэтому, зная зависимость $\mu(H)$ при начальной температуре, зависимость $\mu(t)$ при $H = \text{const}$, не представляет затруднений построить для исполь-

зования в практических расчетах аналогии с графиками рис. 3. Озвучив вопрос о количественной оценке эддистой магнитной проницаемости при индукционном нагреве, имея в виду совокупность наблюдаемых явлений в процессе нагрева ферромагнитных металлов в переменном магнитном поле, на высказанных выше соображениях, требуется специального рассмотрения. До настоящего времени в специальной литературе и в проектной практике по индукционному нагреву используются формулы, полученные из общей теории распространения электромагнитной энергии в ферромагнитных металлах при $\mu = \text{const}$. При этом, несмотря на очевидную зависимость $\mu(H)$, количественное значение μ принимается в конечных формулах электрических и энергетических характеристик устройств разными авторами при одинаковых условиях весьма различными. Так, например, при расчете плавильных печей в проектных спецификациях принимают $\mu = 4 \div 6$. При расчете устройств для поверхностной закалки, где напряженность поля много раз больше, чем в плавильных печах, тем не менее принимают $\mu = 100, 300$, а даже в несколько тысяч. Аналогичное положение имеет место и в печатных трудах, когда без всяких оснований принимают μ в самых широких пределах, вне зависимости от действительных значений μ с одновременным учетом зависимости $\mu(H)$ и $\mu(t)$. Еще более дезориентирующим следует признать положение, когда многие авторы в том числе и авторы учебной литературы, исходя из $\mu = \text{const}$, придают постоянные значения тем величинам, как глубина проникновения и относятся их значение к холодному и к горячему состоянию металла.

Трудности правильного количественного определения μ , подставляемого в формулы, выведенные из условия $\mu = \text{const}$, как при индукционном нагреве, так и во многих других случаях состоят в том, что, имея в виду явную зависимость $\mu(H)$ и некоторую приближенную зависимость $H(x)$, получаемую даже из условия $\mu = \text{const}$ (где x — текущая координата в направлении распространения электромагнитной волны), мы вынуждены считаться с зависимостью $\mu(x)$.

Многие авторы [Л. 3—5] предпринимали попытки определять среднее значение магнитной проницаемости тел, помещенных в переменное электромагнитное поле (μ_{cp}), методом последовательных приближений. При этом они исходили из среднего значения напряженности поля в сечении указанных тел. Но, к сожалению, этот метод оказался весьма громоздким и в практических расчетах никем не используется. Работы Л. Р. Неймана [Л. 6], основанная на решении уравнений электромагнитного поля с использованием зависимости $\mu(x)$ и дающая, следовательно, правильный ход зависимости $H(x)$, наиболее

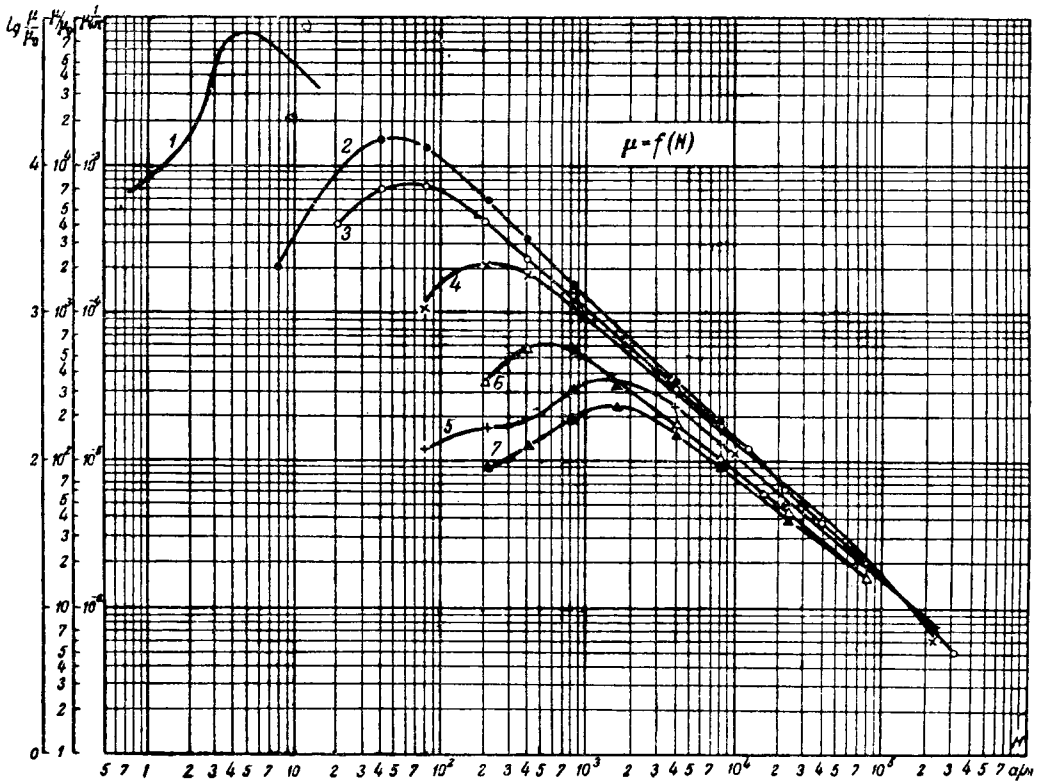


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости μ от температуры сталей t° (C) при напряженностях поля $H = 2 \cdot 10^3 \div 80 \cdot 10^3$ а/м.

рассматривает этот трудный с математической точки зрения вопрос. В то же время она наиболее простой ответ для практического пользования ее результатов. Л. Р. Нейман эмпирически показал обоснованность применяемыми нами много лет правила [Л. 7], согласно которому в формулы, выведенные, исходя из условия $\mu = \text{const}$, можно подставлять с достаточной для практических расчетов точностью некоторое значение μ , определяя последнее из любой кривой намагничивания для эффективного значения H на поверхности нагреваемого объекта. Однако и при этом условии определение μ в расчете электрических и энергетических характеристик устройств для индукционного нагрева представляется затруднительным, так как напряженность поля (H) в реальных устройствах не может оставаться постоянной за период выполнения технологического процесса. Почти во всех случаях для индукционного нагрева при их проектировании мощностью, заданной из технологических соображений, всегда оказывается, что поглощаемая из электромагнитного поля энергия, а не напряженность поля (H). в большинстве случаев энерговоспринимающая поверхность (S) нагреваемых тел, при заданной из технологических соображений мощности P можно найти значение поверхностной плотности мощности

$$P_s = \frac{P}{S}.$$

в самых разнообразных устройствах для индукционного нагрева выражение поверхностной

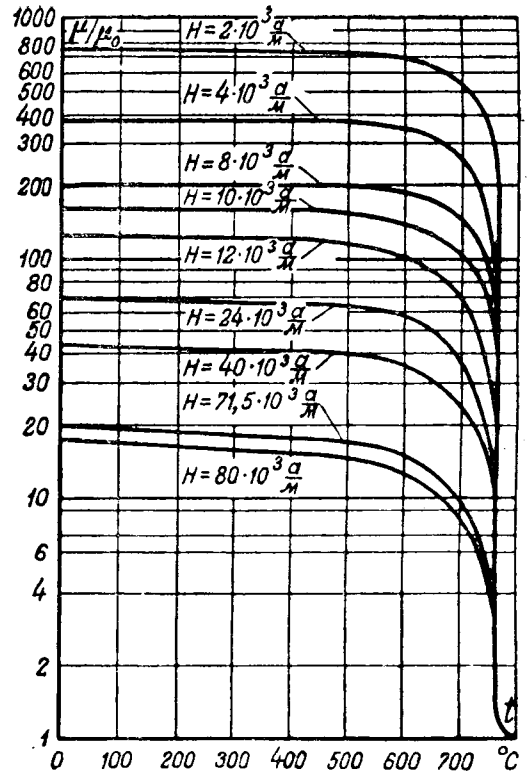


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости μ от напряженности поля H для металлов и сплавов.

1—пермаллой; 2—электролитическое железо плавненное в вакууме; 3—трансформаторная сталь; 4—сплавы $C = 0,23\%$; 5—сплавы $C = 1,78\%$ железо с углеродом в отожженном состоянии; 6—серый чугун отожженный; 7—чугун не отожженный.

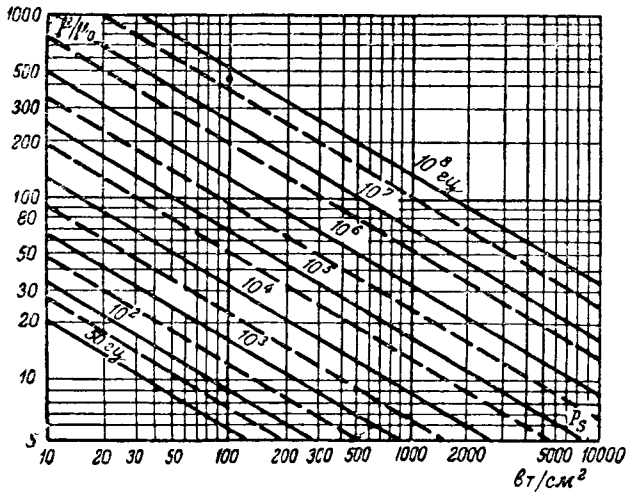


Рис. 4. Зависимость магнитной проницаемости μ от поверхностной удельной мощности P_S для разных частот тока при $\rho = 2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м (сплошная линия); $\rho = 6 \cdot 10^{-7}$ Ом·м (пунктирная линия).

удельной мощности (P_S) в общем виде может быть написано следующим образом:

$$P_S = \frac{P}{S} = kH^2 \sqrt{\rho \mu f},$$

где k — коэффициент, учитывающий геометрические соотношения в электромагнитной системе индуктор — нагреваемый металл; f — частота тока.

Это уравнение, несмотря на свою внешнюю элементарность применительно к нагреву ферромагнитных материалов, практически всегда является уравнением с двумя неизвестными, так как включает в себя напряженность поля во второй степени (H^2) и магнитную проницаемость (μ), являющуюся функцией H . Таким образом, воспользоваться приведенным уравнением для подсчета мощности, поглощаемой металлом, или для определения необходимой напряженности поля по формуле

$$H = \sqrt{\frac{P_S}{k \sqrt{\rho \mu f}}}$$

мы можем только тогда, когда знаем H и μ или P_S и ρ .

Для того, чтобы воспользоваться вышеприведенными уравнениями, на основании выска-

занных выше соображений нами предлагаем следующее графоаналитическое решение вопроса.

Исходя из усредненной зависимости μ согласно рис. 2, что совершенно справедливо, сделав применительно к устройствам для индукционного нагрева, и из выражения

$$H^4 \mu = \frac{P_S^2}{k^2 \rho f} = \Psi P_S^2,$$

мы легко можем получить графически зависимость значения $\mu(P_S)$, используя в качестве параметров значения удельных сопротивлений и частоты переменного электрического поля.

Такие графики зависимостей $\mu(P_S)$, для практически встречающихся частот и для наиболее существенных значений удельного сопротивления нагреваемого металла, показаны на рис. 4. В проектно-расчетной практике дают вполне достаточную ориентацию в определении численных значений μ при индукционном нагреве. Рекомендации по приближенному делению зависимостей $\rho(t)$, $\mu(t)$ и $\mu(H)$ или $\mu(P_S)$ оказываются приемлемыми еще и потому, что μ входят во все формулы в половинной степени, в связи с чем некоторая неточность не особо заметных погрешностей в конечных результатах, тем более, что относительные изменения μ в течение большинства электротермических процессов при индукционном нагреве достигают нескольких сот и даже тысяч процентов.

Литература

1. В. С. Мескин. Ферромагнитные сплавы. 0 1937.
2. Б. А. Садиков. Расчет магнитных свойств лезвуглеродистых сплавов. Сборник трудов МИС. 1 1107—8.
3. Е. Т. Марквардт. Вихревые токи в ферритных телах. Электричество, № 8, 1934.
4. С. Д. Марголин. Расчет магнитного эффекта в листовой стали. ЖТФ, т. XVIII, вып. 10.
5. Н. М. Родигин. Индукционный нагрев стальных изделий. Металлургия, 1950.
6. Л. Р. Нейман. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. Госэнергоиздат, 1949.
7. А. В. Донской. Исследование параметров электрических параметров индукционных печей. Диссертация ЛПИ, 1940.
8. А. В. Донской. К расчету индукционного нагрева ферромагнитных материалов. Электротермия, 1948.



Определение параметров электрической цепи трехфазной дуговой электропечи

Доц. Н. А. МАРКОВ

Куйбышевский индустриальный институт им. Куйбышева

Электрическая цепь дуговой электропечи может быть представлена схемой замещения, включающей активные и индуктивные сопротивления трансформатора, дросселя, электродов и пр.

Для установления оптимального режима работы печи, устранения явлений «мертвой» и «горючей» фаз и т. д.

Основным недостатком большинства известных методов определения параметров схемы является то, что они производятся не при рабочем режиме печи. Активное и особенно индуктивное сопротивление цепи электропечной установки зависят от тока в цепи, положения электродов, наличия высших гармонических токов, поэтому измерения при не рабочем режиме не дают необходимых для эксплуатации значений параметров. При несимметричной цепи определение параметров еще более затруднительно, так как связано с одновременными измерениями токов трех фаз и с определением смещения нейтрали печи. Между тем этот случай представляется для практики наибольший интерес.

Автор предлагает графоаналитический метод определения параметров цепи дуговой электропечи установки в рабочем режиме печи при несимметричной цепи и несимметричной нагрузке. Для определения измерений мощности, токов и напряжений производятся в первичной цепи трансформатора (рис. 1). При измерениях могут быть использованы приборы, установленные на щите измерения электропечной установки. Метод требует также измерения междуфазных напряжений дуг.

При рабочем режиме электропечи производится одновременное измерение следующих величин: 1) потребляемой мощности P_1, P_2, P_3 ; 2) токов фаз I_1, I_2, I_3 ; 3) междуфазных напряжений сети $U_{1-2}, U_{2-3}, U_{3-1}$; 4) междуфазных напряжений дуг $U_{o1-2}, U_{o2-3}, U_{o3-1}$.

Для установления оптимального режима работы дуговой электропечи необходимо знать параметры электрической цепи печи. Применяемые методы определения этих параметров сложны и не дают значений параметров при рабочем режиме работы печи. Излагается способ определения параметров цепи при рабочем несимметричном режиме печи с использованием имеющихся на электропечной установке электромеханических приборов нормальных типов.

Для получения правильных результатов отсчет показаний всех приборов следует производить одновременно. При сильно колеблющейся нагрузке печи для получения одновременных показаний приборов можно применить

фотографирование шкал приборов. Все измеренные токи и напряжения следует привести к одной ступени трансформации. Фазные напряжения дуг печи определяются графически по звезде токов и треугольнику междуфазных напряжений дуг (рис. 2). Активные сопротивления схемы замещения для каждой фазы цепи будут:

$$R_1 = \frac{P_1 - I_1 U_{o1}}{I_1^2};$$
$$R_2 = \frac{P_2 - I_2 U_{o2}}{I_2^2};$$
$$R_3 = \frac{P_3 - I_3 U_{o3}}{I_3^2}.$$

Формулы дают приближенные значения, так как распределение потерь мощности ($P_1 - I_1 U_{o1}, P_2 - I_2 U_{o2}, P_3 - I_3 U_{o3}$) по отдельным фазам цепи также определяются приближенно, ввиду наличия смещения между нулевой точкой электропечи и нулевой точкой трансформаторов напряжения, к которой присоединены обмотки напряжения ваттметров.

Индуктивные сопротивления фаз схемы замещения определяются из векторной диаграммы (рис. 3). Вычерчивается треугольник и звезда токов I_1, I_2, I_3 по значениям, полученным при измерениях. На векторах токов откладываются векторы напряжений дуг U_{o1}, U_{o2}, U_{o3} и активных падений напряжений в цепи $I_1 R_1, I_2 R_2, I_3 R_3$. Через концы этих векторов перпендикулярно векторам токов проводятся лучи, дающие направление векторов индуктивных падений напряжений цепи $I_1 x_1, I_2 x_2, I_3 x_3$.

Вырезается из картона треугольник, стороны которого равны в принятом масштабе междуфаз-

При условии соединения обмоток трансформатора цепь — треугольник.

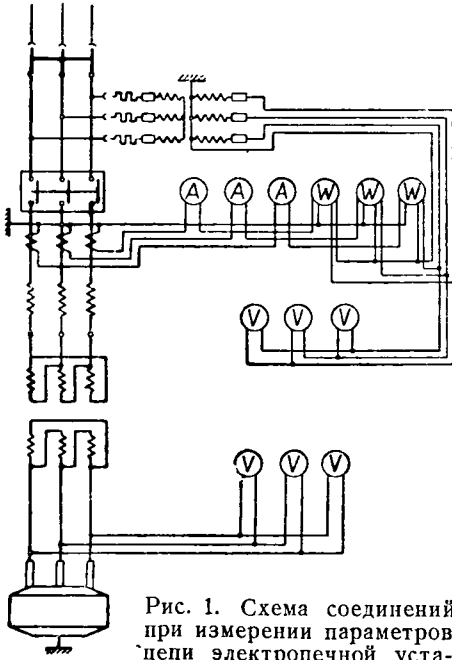


Рис. 1. Схема соединений при измерении параметров цепи электропечной установки.

ным напряжениям сети. Треугольник накладывается на векторную диаграмму таким образом, чтобы вершины треугольника расположились на лучах векторов индуктивных падений напряжений цепи. Отрезки AD , BE , CF дают в принятом масштабе значения индуктивных падений напряжений в каждой фазе цепи, по которым легко определить индуктивные сопротивления. При построении определяется также и смещение нулевой точки печи.

Значения активных сопротивлений цепи были определены приближенно, следовательно, индуктивные сопротивления и смещения нулевой точки также устанавливаются приближенно. Однако смещение нулевой точки в основном зависит от

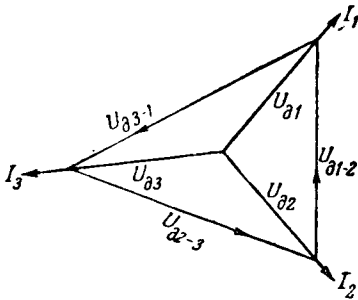


Рис. 2. Определение фазных напряжений дуг.

неравенства индуктивных сопротивлений цепи и сопротивлений дуг, и полученное положение нулевой точки на диаграмме почти совпадает с точным ее положением.

На векторной диаграмме токов и напряжений рис. 4 нанесены также векторы токов и напряжений, подводимых к ваттметрам. Мощности, измеренные ваттметрами в разных фазах, пропорциональны отрезкам QD , OE , OF ; мощности по-

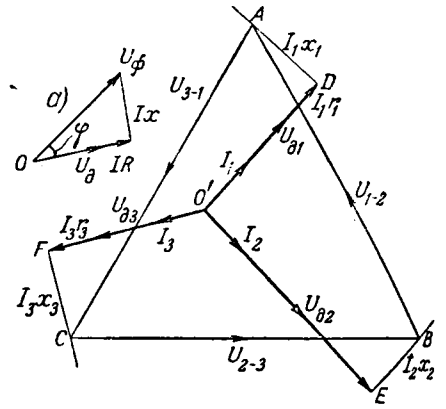


Рис. 3. Определение индуктивных сопротивлений цепи (а — определение сопротивлений симметричной цепи).

требляемые в каждой фазе цепи при принятом расположении нулевой точки, пропорциональны отрезкам $O'D$, $O'E$, $O'F$. Разность этих отрезков характеризует точность определения активных сопротивлений цепей при принятом положении нулевой точки печи.

Если эта разность значительна, можно взять другие значения активных сопротивлений и повторить построение диаграммы. В принимаемые для построения диаграммы значения активных сопротивлений цепи должны удовлетворять условиям:

$$P = P_{1n} + P_{2n} + P_{3n} + U_{d1}I_1 + U_{d2}I_2 + U_{d3}I_3$$

$$\frac{P_{1n}}{P_{2n}} = \frac{R_1 I_1^2}{R_2 I_2^2}; \frac{P_{2n}}{P_{3n}} = \frac{R_2 I_2^2}{R_3 I_3^2},$$

где мощности потерь P_{1n} , P_{2n} , P_{3n} , взятые вновь построенной диаграммы, а P , I_1 , I_2 , I_3 — данные измерений.

Если активные сопротивления отдельных фаз равны ($R_1 = R_2 = R_3$), то при определении параметров данным способом измерение мощности цепи можно производить при помощи трехфазного ваттметра или двух ваттметров. Потери мощностей в отдельных фазах цепи в этом случае определяются из уравнений:

$$P_{1n} + P_{2n} + P_{3n} = P - (U_{d1}I_1 + U_{d2}I_2 + U_{d3}I_3)$$

$$\frac{P_{1n}}{P_{2n}} = \frac{I_1^2}{I_2^2}; \frac{P_{2n}}{P_{3n}} = \frac{I_2^2}{I_3^2},$$

а активные сопротивления фаз из выражений

$$R = \frac{P_{1n}}{I_1^2} = \frac{P_{2n}}{I_2^2} = \frac{P_{3n}}{I_3^2}.$$

Для некоторых типов электропечных установок активные сопротивления цепи незначительны по сравнению с индуктивным, и можно ориентировочно считать активные сопротивления цепи равными нулю. В этом случае для быстрого ориентировочного определения индуктивных сопротивлений цепи достаточно измерить только токи и напряжения дуг в отдельных фазах и

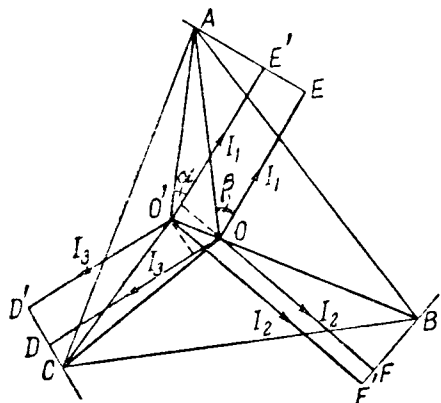


Рис. 4. Определение мощностей каждой фазы цепи при смещении нейтрали.

строить аналогичную приведенным выше векторную диаграмму. Если активные сопротивления цепи известны, то для определения индуктивных сопротивлений цепи можно применить этот же способ, производя измерения только токов и напряжений дуг.

При симметричной нагрузке и симметричной электропечной установке определение параметров цепи может быть произведено на основании измерения фазных мощностей, токов и напряжений дуг и сети. Векторная диаграмма для этого случая приведена на рис. 3,а.

Погрешности при определении параметров цепи, описываемым методом невелики и зависят от точности измерений и графических построений, которые обусловлены тем, что не учитывается несинусоидальность тока и напряжения дуги.

Погрешности измерений при применении обычных технических измерительных приборов не превышают 2—3%. Точность определения сопротивлений цепи по вычерченному векторным диаграммой (с учетом погрешности от повторных

построений диаграммы для определения активных сопротивлений цепи) составляет 1—2%. Погрешность, обусловленная неучетом несинусоидальности кривых тока и напряжения дуги, для печей средней производительности не превышает 3—5% [Л. 3, 4]. Таким образом, суммарная погрешность будет порядка 7—8%, что значительно меньше погрешностей, к которым приводит применяемое в настоящее время для анализа работы печей использование параметров, определенных при нерабочем режиме печи.

Выводы. Предлагаемый способ позволяет определить достаточно точно параметры цепи при рабочем режиме печи при несимметричной цепи и несимметричной нагрузке. Измерения производятся при помощи электронизмерительных приборов нормальных типов, обычно имеющих на установке. Включение приборов в цепь тока установки выполняется на первичной стороне трансформатора.

Предлагаемый способ прост, удобен и может иметь практическое применение в эксплуатации при определении и систематическом контроле параметров цепи электропечных установок.

При выполнении работы автор пользовался указаниями и советами доктора технических наук, проф. С. И. Тельного.

Литература

1. С. И. Тельный. К вопросу о построении круговых диаграмм и электрических характеристик электрометаллургической установки. Труды Днепропетровского металлургического института, 1940.
2. С. И. Тельный. Автоматическое регулирование трехфазных дуговых электропечей. Электричество, № 5, 1946.
3. С. И. Тельный. К теории трехфазной дуговой печи с непроводящей подиной. Электричество, № 12, 1948.
4. Ю. Е. Ефроймович. Инженерные методы расчета дуговых печей с учетом нелинейности, виссимой дуговым разрядом. Электричество, № 12, 1948.

[20. 10. 1950]



Реакция якоря в магнето

Кандидат техн. наук, доц. Г. Н. СЕНИЛОВ

Москва

Применение электрической аналогии к магнитной цепи дает возможность определить н. с. и энергию реакции якоря магнето, а также точку максимального размагничивания магнита.

Максимумы полезного потока и энергии реакции якоря, определенные из условий наибольшего размагничивания магнита н. с. трансформатора, близко совпадают между собой. Это совпадение и дает возможность в заводской практике выбирать конструкцию магнето по полезному потоку, хотя в действительности энергия искры зависит не от полезного потока, а от энергии реакции якоря магнето.

Предлагаемый метод расчета по реакции якоря показывает, что с увеличением коэрцитивной силы магнит целесообразно делать короче и что оптимальная проводимость напусков мало зависит от материала постоянного магнита.

Рабочий процесс и реакция якоря в магнето. Магнето отличается от всех электрических машин прежде всего тем, что реакция якоря здесь играет полезную роль — она используется для получения напряжения во вторичной цепи¹.

При вращении ротора магнето (рис. 1а) поток в сердечнике трансформатора, создаваемый постоянным магнитом, изменяется от значения $\Phi_e = \Phi_{e, \max}$ до $\Phi_e = 0$. Если контакты в первичной обмотке замкнуты, то возникающий от

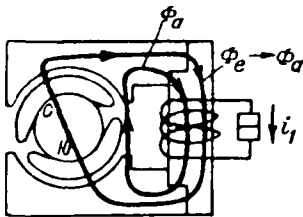


Рис. 1а.

уменьшения потока ток i_1 стремится по закону Ленца поддержать прежнее значение магнитного потока в трансформаторе за счет потока реакции

¹ Под термином реакция якоря в магнето принято понимать н. с. первичного тока трансформатора и ее воздействие на магнит.

Предлагается метод расчета магнитной цепи по реакции якоря, основанный на электрической аналогии.

якоря, сцепленного с магнитом. По мере поворота ротора поток холостого хода Φ_e в трансформаторе

заменяется потоком реакции якоря Φ_a . Чем быстрее вращается ротор магнето, тем больше значение $\frac{d\Phi_e}{dt}$ и ток i_1 , и соответственно тем больше энергия реакции якоря и вызванный ею поток Φ_a . Однако

ввиду наличия потерь всегда $\Phi_{a, \max} \leq \Phi_{e, \max}$ и поэтому

энергетически к моменту размыкания контактов в магнето при большой скорости вращения магнето поток в сердечнике трансформатора, становясь нулевым, является целиком потоком реакции якоря Φ_a , составляющим $\Phi_{a, \max} = 0,8 \div 0,9 \Phi_{e, \max}$. Наибольшее возможное

значение потока реакции якоря ($\Phi_{a, \max} = \Phi_{e, \max}$)

было бы при отсутствии сопротивления во вторичной цепи и при мгновенном повороте ротора на 180 электрических градусов от положения соответствующего значению $\Phi_{e, \max}$. В дальнейшем

в целях упрощения принимается это предельное значение $\Phi_{a, \max} = \Phi_{e, \max}$, вызывающее

наибольшее возможное размагничивание магнита. Получающиеся при этом предположении оптимальные размеры цепи, а также размагничивание магнита достаточно близки к экспериментальным данным.

Итак, разрывая контактами прерывателя первичный ток магнето, мы превращаем энергию реакции якоря в энергию колебательного тока. При этом происходит скачкообразное изменение магнитного потока в трансформаторе на $\Delta\Phi = \Phi_a - \Phi_e$ (рис. 1б) и передача с оптимальным к. п. д. энергии электромагнитного поля во вторичную цепь трансформатора и к сетке лампы.

Известно, что энергия на свече магнето выделяется за счет энергии первичного тока. Поэтому, если пренебречь потерями на рассеяние обмоток трансформатора и потерями на экранирование, и привести емкость экранированных проводов к первичной цепи, то получим, что

$$\frac{Li_1^2}{2} = \frac{CU_1^2}{2},$$

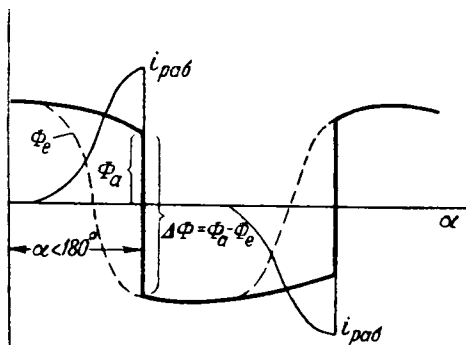


Рис. 16.

Максимально возможное напряжение во второй цепи на свече будет [Л. 4]

$$U_{2 \text{ макс}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} i_1 \sqrt{\frac{L}{C}},$$

k_2 — коэффициент трансформации;

C — суммарная емкость, приведенная к первичной цепи.

Сложно показать, что электромагнитная индукция $\frac{Li_1^2}{2}$ в приведенной схеме трансформатора действительно является энергией реакции якоря.

Подставляя в выражение $\frac{Li_1^2}{2}$ значения

$$L = 1,25 \cdot g_a \omega_1^2 \cdot 10^{-8},$$

$$i_1 = \frac{\Phi_a \omega_1}{L} = \frac{\Phi_a}{1,25 g_a \omega_1 10^{-8}},$$

получим после упрощения, что

$$\frac{Li_1^2}{2} = \frac{\Phi_a F_a}{2}, \quad (1)$$

F_a — поток реакции якоря в сердечнике трансформатора, вб;

$\frac{\Phi_a}{1,25 \cdot 10^{-8} g_a}$ — н. с. реакции якоря, а;

g_a — проводимость, см, для потока реакции якоря при положении ротора в момент разрыва тока.

Следовательно, наибольшее напряжение $U_{2 \text{ макс}}$ на свече получаются тогда, когда момент разрыва тока достигается наибольшее значение энергии, связанной с реакцией якоря

Еще одна причина, по которой изменение величины реакции якоря в магнето является интересом. Дело в том, что реакция размагничивает постоянный магнит и определяет кривую размагничивания начало так называемой прямой возврата, от которой зависит следующая работа магнето. В статье будет рассмотрен принцип учета размагничивающего действия реакции якоря, который может быть применен также и на другие машины с постоянными магнитами.

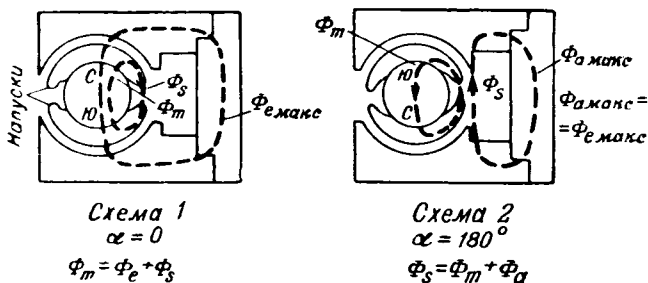


Рис. 2. Принципиальные схемы магнитной цепи магнето. Φ_m — поток в нейтральной зоне магнита; Φ_a — поток реакции якоря; Φ_s — поток рассеяния; Φ_e — поток в сердечнике трансформатора.

Электрическая аналогия магнитной цепи магнето. Принципиальные схемы магнитной цепи магнето для двух крайних положений ротора: а) начальный момент изменения потока и б) при повороте на 180° показаны на рис. 2, где условно показано $2p=2$. Весь процесс образования искры в каждом цилиндре укладывается в пределах этих двух положений постоянного магнита.

Из схемы 2 рис. 2 видно, что после поворота на 180° поток реакции якоря направлен против потока постоянного магнита и, следовательно, размагничивает его. Но так как оба потока Φ_m и $\Phi_{a \text{ макс}}$ продолжают в этом случае существовать, то они замыкаются по проводимости рассеяния, главным образом через ламелированные наконечники (напуски) ротора. Наличие напусков как бы защищает постоянный магнит от сильного размагничивания. В то же время большие напуски в первой схеме рис. 2 уменьшают поток холостого хода $\Phi_{e \text{ макс}}$ в сердечнике. Одна из задач правильного конструирования магнето состоит в нахождении оптимального значения напусков, что и будет рассмотрено ниже.

Магнитную цепь магнето (как и многих других аппаратов с постоянными магнитами) можно разделить на три основных проводимости:

1) проводимость самого магнита

$$g_m = \rho \frac{Q_m}{l_m},$$

где ρ — коэффициент возврата, Q_m, l_m — размеры магнита;

2) полезная проводимость сердечника трансформатора, обмотки и воздушного зазора, g_e ;

3) проводимость рассеяния g_s для многих типов магнето, состоящая в основном из воздушной проводимости между ламелированными напусками ротора. Например, для цилиндрического ротора, намагниченного поперек оси, $g_n = 0,85 g_s$.

Что касается проводимости реакции якоря g_a , то она образуется из двух последовательно включенных проводимостей g_e и g_s . Причем g_s снижается, если через нее проходит также и поток постоянного магнита.

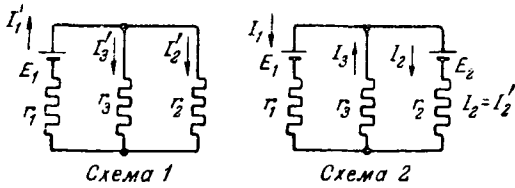


Рис. 3. Электрическая аналогия для магнитных цепей магнето.

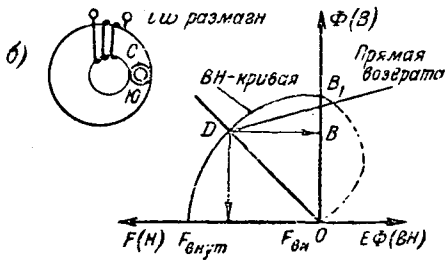
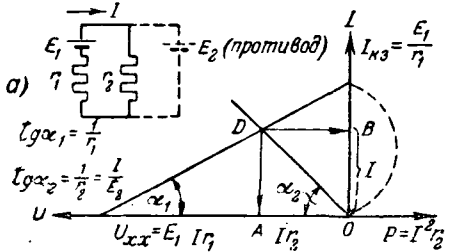


Рис. 4. Диаграммы простых электрической и магнитной цепей.

Дальнейший анализ удобно проводить, пользуясь аналогией между электрической и магнитной цепями. На рис. 3 приведены эквивалентные электрические схемы магнето для положений ротора $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$ (рис. 2).

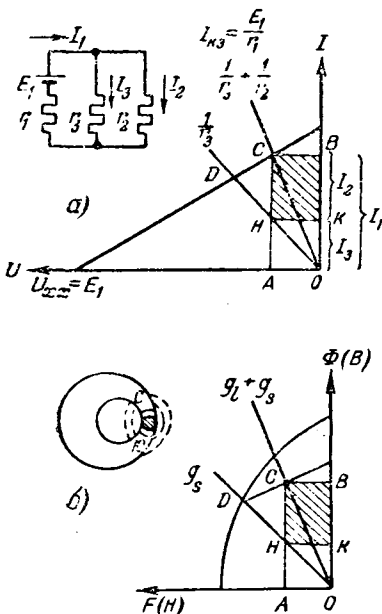


Рис. 5. Диаграммы разветвленных электрической и магнитной цепей.

На электрических схемах батареи E_1 изображают н. с. магнита и н. с. реакции я. Сопротивления приняты неизменными, ис из того, что магнитные цепи не сильно и щены, а проводимость рассеяния состоит, ным образом, из воздушной проводимости. сыщение напусков вносит в это допуш изменения в пределах ошибок расчета про мостей.

Для того чтобы производить все построения и расчеты не в координатах Φ и F , а в координатах BH -кривой (рис. 4, а, б), необходимо пользоваться так называемыми приведенными проводимостями, так как тангенсы углов на лучей проводимостей в координатах BH -кр могут быть выражены в виде

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B}{H} = \frac{\Phi}{Q_m} \frac{I_m}{F} = g \frac{I_m}{Q_m} = g',$$

где g' — приведенные проводимости.

Таким образом, сопротивления эквивалентных электрических схем будут:

$$r_1 = \frac{1}{g_m}; \quad r_2 = \frac{1}{g_e}; \quad r_3 = \frac{1}{g_s}.$$

Токи в электрических схемах эквивалентны магнитным потокам в соответствующих участках цепи.

Из электрических схем 1 и 2 (рис. 3) нетрудно определить, что:

$$I_2' = \frac{E_1 r_3}{\Delta},$$

$$I_2 = \frac{E_2 (r_1 + r_3) - E_1 r_3}{\Delta},$$

где $\Delta = r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_1 r_3$.

Выше было принято, что $\Phi_{a_{\max}} = \Phi_{e_{\max}}$, следовательно, $I_2 = I_2'$. Приравняв правые ча

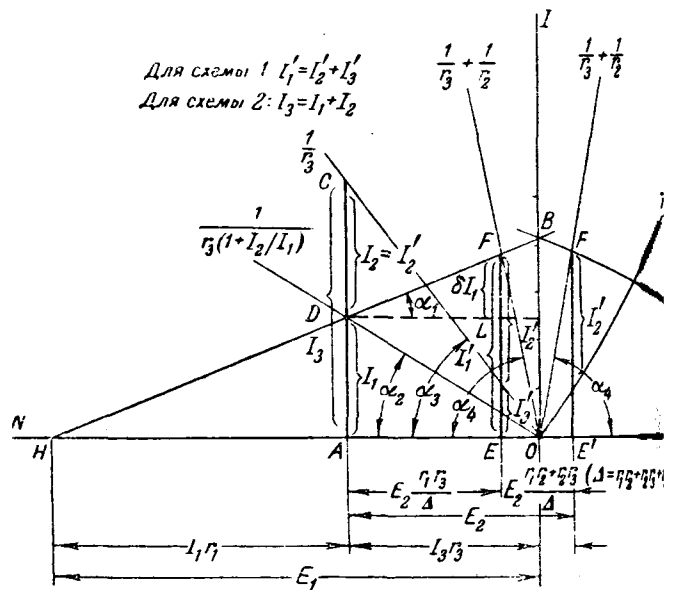


Рис. 6. Диаграмма эквивалентных электрических схем магнето.

ений (2) и (3), получаем значение максимальной возможной н. с. реакции якоря:

$$E_2 = E_1 \frac{2r_3}{r_1 + r_3}. \quad (4)$$

ким образом, оказывается, что н. с. реакция вполне определенным образом зависит от параметров магнитной цепи E_1 , r_1 и r_3 . Действительно, если бы это не имело места, то естественно большая н. с. вызвала бы значительное размагничивание ротора магнето, чего в действительности не бывает. В то же время естественно малая н. с. не могла бы сохранить свое направление потока в сердечнике трансформатора, которому при повороте ротора на противоположную сторону н. с. магнита.

Однако формула (4) еще не определяет н. с. реакции якоря; принятая нами эквивалентная н. с. магнита, в действительности не является таковой, а зависит от положения точки D на рабочей прямой (возврата) на BH -кривой, пока остается неизвестным. Поэтому для определения н. с. реакции якоря продолжим механическую аналогию на построение диаграммы.

Прежде всего заметим, что характеристика батареи E_1 с внутренним сопротивлением r_1 переменным внешним сопротивлением r_2 изображается в виде прямой, соединяющей точку короткого замыкания и холостого хода (рис. 4, а), прямая OD с тангенсом угла наклона, равным внешней проводимости $1/r_2$, делит эквивалентную внутреннее и внешнее падения напряжения $|r_1|$ и $|r_2|$.

Диаграмма для цепи постоянного магнита (рис. 4, б) аналогична диаграмме электрической цепи и отличается только наличием BH -кривой и рабочей прямой.

На рис. 5 а дана диаграмма для случая, когда цепь состоит из двух параллельных ветвей, где одна из них (с проводимостью g_e) является полезной. Энергия, затрачиваемая источником E_1 во внешней цепи, пропорциональна площади прямоугольника $AOBC$. Параллельно ветви с сопротивлением r_2 присоединено еще сопротивление r_3 или магнитная проводимость g_3 , и поэтому из энергии всей внешней цепи следует вычесть энергию рассеяния. Оставшаяся заштрихованная площадь $ECHK$ пропорциональна полезной энергии. Все сказанное относится также и к магнитной цепи (рис. 5, б).

Построим рабочую диаграмму магнето. После этих предварительных замечаний можно перейти к построению диаграмм эквивалентных электрических схем и магнитной цепи магнето, изображенных на рис. 6 и 7, с тем, чтобы с их помощью найти н. с. и энергию реакции якоря.

На рис. 6 прямая BH представляет характеристику эквивалентных электрических схем 1 и 2. Прямая OC соответствует падению напряжения в цепи одного только сопротивления r_3 .

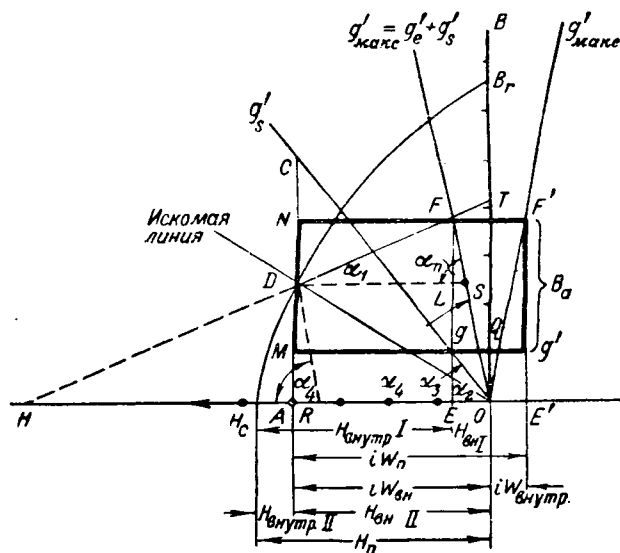


Рис. 7. Полная диаграмма магнитной цепи магнето для схем 1 и 2 и определение максимально возможного размагничивания (точка D) и энергии реакции якоря (площадь $MNF'g'$).

В действительности в схеме 1 параллельно r_3 включено сопротивление r_2 , соответственно с чем рабочей точкой для нее является точка F . Что касается схемы 2, то для нее сопротивление r_3 как бы увеличено вследствие того, что через него проходит также ток I_2 (эквивалентный потоку реакции якоря магнето), соответственно с чем рабочей точкой схемы 2 является точка D . В самом деле, падение напряжения на сопротивлении r_3 для схемы 2 можно было бы изобразить в виде

$$(I_1 + I_2)r_3 = I_1(1 + I_2/I_1)r_3,$$

где $(1 + I_2/I_1)r_3$ можно принять за новое сопротивление, большее r_3 .

Таким образом, н. с. реакции якоря, поддерживая поток в сердечнике постоянным, заставляет его проходить через ламелированные наконечники магнита (напуски) параллельно с основным потоком магнита. Происходящее при этом увеличение внешнего сопротивления² размагничивает магнит, переводя его из точки F в точку D . При этом очевидно, что поток реакции якоря не может проходить через тело постоянного магнита, имеющего противоположно направленную н. с.

Из диаграммы электрической цепи прежде всего можно определить, что отрезок AE' изображает полную н. с. реакции якоря (E_2), что следует непосредственно из уравнений схемы 2, а также из сложения отдельных отрезков, выраженных на рис. 6 через E_2 на основании уравнений (2) — (4). В самом деле, с учетом того, что из схем 1 и 2 следует

$$I_2 = I_2' = I_1' \frac{r_3}{r_2 + r_3},$$

² Увеличение сопротивления рассеяния, помимо фиктивного увеличения от потока реакции якоря, происходит также вследствие насыщения наконечников.

можно написать:

$$\begin{aligned} AE' &= AO + OE' = I_3 \operatorname{ctg} \alpha_3 + I_1' \operatorname{ctg} \alpha_4 = \\ &= I_3 r_3 + I_1' \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3} = I_3 r_3 + I_2 r_2 = E_2 = i_1 \omega_1. \quad (5) \end{aligned}$$

Иногда принято считать [Л. 2], что полная н. с. реакции якоря изображается отрезком OA (рис. 7), потому что именно такая размагничивающая и. с. необходима для перевода рабочей точки магнита из точки F в точку D . Формула (5) показывает ошибочность такого представления.

Для того чтобы понять физический смысл (5), обратимся снова к рис. 6 и 7. В самом деле, если в схеме 1 внешняя часть н. с. OE определяется линией сопротивления $\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_2}$, то в схеме 2 внешняя часть н. с. AO определяется линией $\frac{1}{r_3(1+I_2/I_1)}$. Эта внешняя часть н. с. AO магнита равна внешней части н. с. реакции якоря, так как обе н. с. в схеме 2 действуют параллельно на участке рассеяния (r_3).

Кроме внешней части AO , полная н. с. реакции якоря содержит также и внутреннюю часть OE' , затрачиваемую на проведение потока в armатуре, воздушном зазоре и сердечнике трансформатора. Соответственно принятому условию $\Phi_{a_{\max}} = \Phi_{e_{\max}}$, эта внутренняя часть OE' должна остаться той же, какой она была в схеме 1, т. е. OE . Это обусловлено тем, что поток в сердечнике трансформатора почти не изменился, а в схеме 1 поток в сердечнике поддерживался внешней частью н. с. магнита. Следовательно, на рис. 7 внутренняя часть $i_1 \omega_1$ равна внешней части н. с. для схемы 1 ($H_{\text{вн}1}$ на рис. 7). Таким образом, получаем, что

$$i_1 \omega_1 = AO + OE' = AE'.$$

Далее, диаграммы на рис. 6 и 7 и уравнения электрических цепей дают возможность определить аналитически и графически уменьшение магнитного потока в нейтральной зоне постоянного магнита вследствие реакции якоря. Это уменьшение

$$FL = I_1' - I_1 = \delta I_1 = \frac{E_2 r_3}{\Delta} = \frac{2r_3^2}{\Delta - r_3^2} I_1. \quad (6)$$

Наконец, диаграмма магнитной цепи позволяет найти рабочую точку D на BH -кривой с учетом реакции якоря и тем самым определить полезный поток в сердечнике трансформатора. Для этого согласно рис. 7 достаточно знать угол α_2 , под которым следует провести прямую OD , пересекающую BH -кривую так, чтобы $DC = F$; ($I_1' = I_2$).

Формула $\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{r_3(1+I_2/I_1)}$ не выражает угол непосредственно через проводимости. Для этой цели может быть предложен следующий способ

Из рис. 7 следует:

$$\begin{aligned} RO &= DS = FL (\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_4) = \\ &= AD \frac{2r_3^2}{\Delta - r_3^2} (\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_4), \end{aligned}$$

так как $I_1 = AD$.

Тогда искомым углом

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha_2 &= \frac{AD}{AO} = \frac{AD}{AR + RO} = \frac{AD}{AD \operatorname{ctg} \alpha_1 + RO} = \\ &= \frac{1}{\operatorname{ctg} \alpha_1 + \frac{2r_3^2}{\Delta - r_3^2} (\operatorname{ctg} \alpha_1 + \operatorname{ctg} \alpha_4)}, \end{aligned}$$

где α_4 — угол наклона линий приведенной полевой проводимости;

α_1 — угол наклона прямой возврата.

Линия OD , проведенная под углом α_2 , пересечет BH -кривую в искомой точке. Данный метод определения максимально возможного размагничивания применим к любому сорту стали, так как в выводах не участвовало уравнение BH -кривой, — в этом и состоит преимущество метода.

Определение параметров магнитной цепи к максимуму энергии реакции якоря. Полезная энергия реакции якоря W_a , которая сосредоточена к моменту разрыва тока в электромагнитном поле первичной обмотки, может быть изображена в виде половины площади прямоугольника $MNF'g'$, умноженной на объем магнита (рис. 7). Стороны прямоугольника равны полезной н. с. и потоку реакции якоря, приходящему соответственно на единицу длины и площади поперечного сечения магнита³

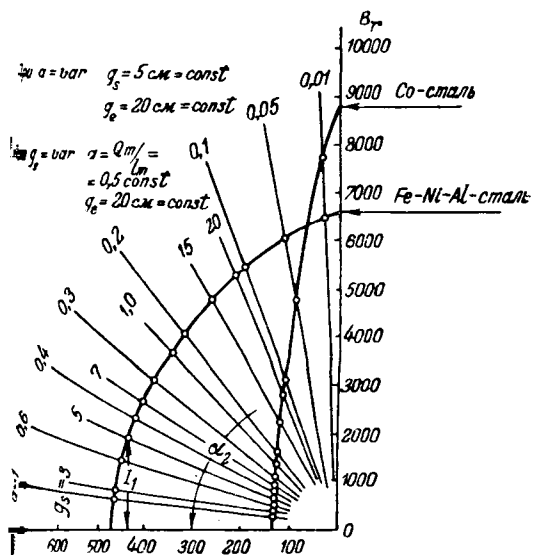
$$\begin{aligned} W_a &= \frac{1}{2} \frac{\Phi_a F_a}{4\pi} = \frac{B_a Q_m i \omega_n l_m}{8\pi} = B_a \omega_n \frac{V_m}{8\pi} [\text{эрг}] = \\ &= B_a i \omega_n \frac{V_m}{8\pi} \cdot 10^{-7} [\text{дж}], \end{aligned}$$

где $V_m = Q_m l_m$ — объем магнита.

Энергия реакции якоря W_a значительно больше полезной энергии постоянного магнита W_e и возникает целиком за счет энергии механического вращения ротора магнето. Полная энергия W_e (прямоугольник $FTQg$) служит лишь для создания энергии W_a и непосредственно в энергию искры не переходит, так и поток Φ_e не сцеплен с током i (на это обстоятельство неоднократно указывал В. С. Кулебаки).

Таким образом, конструирование магнето целесообразно производить с учетом получения максимальной энергии реакции якоря, варьированием полезной проводимости g_e , проводимости рассеяния g_s и размеров магнита $a = Q_m/l_m$.

³ Здесь и ниже размеры магнита и проводимости удобно выражать в сантиметрах, соответственно индукция выражена в гауссах, а поток в максвеллах. Кроме того, здесь $i \omega_n$ обозначает полную н. с. реакции якоря, отнесенную к длине l_m .



8. Определение точки максимального размагнивания $\text{tg } \alpha_2$ для различных сортов стали приравнивании размеров магнита a и проводимости рассеяния g_s .

стальные величины определяются форму-

$$r_1 = \frac{1}{g_m} = \frac{a}{\rho \frac{Q_m}{l_m}} = \frac{1}{\rho}; \quad r_2 = \frac{1}{g_e} = \frac{a}{g_e};$$

$$r_3 = \frac{1}{g_s} = \frac{a}{g_s}; \quad Q_m = \sqrt{V_m a},$$

$$\text{tg } \alpha_1 = \frac{\rho}{10}; \quad \text{tg } \alpha_2 - \text{см. (8);}$$

$$\text{tg } \alpha_3 = \frac{g_s}{10a}; \quad \text{tg } \alpha_4 = \frac{g_e + g_s}{10a}.$$

выражениях для $\text{tg } \alpha_1$ коэффициент 10 обуслов-

разными масштабами координат BH -кривой,

данными величинами являются: BH -кривая, ρ и объем магнита.

Параметры магнето определяются из ток I_1 по уравнениям, полученным из эк-

$$\Phi_e = Q_m I_2 = Q_m \frac{r_3 (r_1 + r_3)}{\Delta - r_3^2} I_1, \quad (10)$$

$$W_e = r_2 I_2^2 \frac{V_m}{8\pi} = r_2 r_3^2 \frac{(r_1 + r_3)^2}{(\Delta - r_3^2)^2} I_1^2 \frac{V_m}{8\pi}, \quad (11)$$

$$W_a = E_2 I_2 \frac{V_m}{8\pi} = \frac{2\Delta r_3^2 (r_1 + r_3)}{(\Delta - r_3^2)^2} I_1^2 \frac{V_m}{8\pi}. \quad (12)$$

в свою очередь, I_1 определяется из BH -кри-

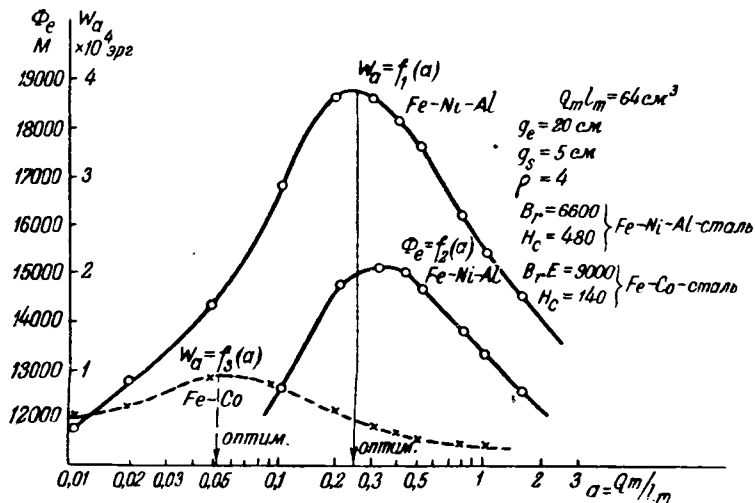
посредством прежде чем перейти к выбору размеров маг-

нитов и проводимости рассеяния. сделаем несколь-

замечаний об изменении полезной проводи-

мости. При увеличении g_e непрерывно возрастают

поток Φ_e и энергия реакции якоря W_a .



9. Определение оптимальных размеров магнита из условий размагничивания от реакции якоря при $V_m = \text{const}$.

Однако с увеличением g_e полезная энергия маг-

нита W_e уменьшается, о чем можно судить по сужению прямоугольника $FTQg$ по мере приближения линии OF к вертикали (рис. 7). Поэтому, если конструирование магнето вести из условия $w_e = \text{макс}$ [Л. 4]. то может показаться, что не следует добиваться высокой полезной проводимости. На самом деле рациональным оказывается конструировать магнето с учетом энергии реакции якоря W_a , а не энергии магнита W_e , и стремиться к получению максимально возможной полезной проводимости g_e .

Переходим к вопросу о выборе размеров, зависящих при постоянном объеме магнита $V_m = \text{const}$, от значения a и проводимости рассеяния g_s . На рис. 8. нанесены лучи, соответствующие различным значениям $\text{tg } \alpha_2$, определяемым по (8). Длинные лучи соответствуют изменению размеров a . Сравнительно короткие — изменению проводимости g_s . Нанесем BH -кривую для любого сорта стали. В точках пересечения ее с лучами $\text{tg } \alpha_2$ получаем значения $I_1 = B$, используемые затем для определения энергии реакции якоря и полезного потока по (10) и (12).

Для примера на рис. 9 построены кривые $W_a = f_1(a)$ и $\Phi_e = f_2(a)$ при $g_s = 5$. На рис. 10 изображены кривые $W_a = f_4(g_s)$ и $\Phi_e = f_5(g_s)$ при $a = 0,5$ для железо-никеле-алюминиевого сплава. В обоих случаях при определенных значениях a и g_s имеют место максимумы W_a и Φ_e . На рис. 9, 10 нанесены также аналогичные зависимости W_a для Fe—Co стали.

Если теперь, пользуясь формулами (8) и (12) и графиком на рис. 10, построить семейство кривых $W_a = f_1(a)$ при различных постоянных g_s или $W_a = f_4(g_s)$ при различных постоянных a , то можно найти оптимальные величины a и g_s , при которых W_a достигает максимально возможного значения.

Таким образом, метод расчета магнето сводится к вычислению таблиц по формулам (8) и (12) — одной для $a = \text{var}$ и другой для $g_s = \text{var}$.

Как видно из предыдущего, в данном методе расчета исключаются поиски точки на кривой размагничивания, соответствующей $(BH)_{\text{макс}}$, так как эта величина непосредственно не определяет энергии реакции якоря.

Экспериментальная проверка кривых рис. 10 даст для магнето БСМ значения Φ_e , несколько превосходящие теоретические, так как в действительности всегда $\Phi_{a, \text{макс}} \leq \Phi_{e, \text{макс}}$.

Если, помимо значения энергии реакции якоря W_a , построить таким же методом кривые для W_e и Φ_e , то можно было бы убедиться в близком совпадении максимумов Φ_e и W_a (максимумы Φ_e и W_e совпадают точно.) В заводской практике принято определять наиболее выгодные размеры магнита a и напусков магнето g_s по максимальному значению полезного потока $\Phi_{e, \text{макс}}$, измеряемому флюксметром, а не по значению энергии реакции якоря W_a , как это следовало бы согласно всем предыдущим рассуждениям. Близкое совпадение максимумов Φ_e и W_a показывает правильность заводского метода.

Второй вывод, вытекающий из данного метода расчета, касается влияния сорта стали на параметры магнитной цепи. Расчет может проводиться для любой BH -кривой, и для каждого сорта стали можно получить соответствующие оптимальные параметры. На рис. 8 вычисления и построения проделаны для кобальтовой и железо-никель-алюминиевой стали. Оказывается, что чем больше значение коэрцитивной силы H_c , тем магнит должен быть короче. Как известно, этот вывод целиком подтверждается практикой. Физически это означает, что н. с. магнита противостоящая н. с. трансформатора, возрастает с увеличением H_c . Из рис. 9 при заданном значении g_s имеем оптимальные значения для стали

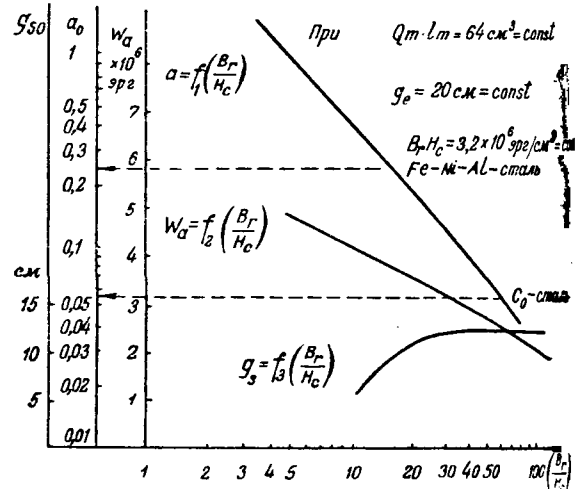


Рис. 11. Оптимальные значения размеров магнита $Q_m l_m$ и проводимости рассеяния g_s и соответствующие им максимальные значения энергии реакции якоря W_a в зависимости от B_r/H_c .

альнико $a_1 = 0,25$ и для кобальтовой стали $a_2 = 0,055$. Следовательно, при неизменном V для получения максимальной энергии иск магнит из альнико должен быть приблизительно в $\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} = 2,3$ раза короче, чем магнит кобальтовой стали.

В более общем виде зависимость основных параметров магнитной цепи от сорта стали и нита дана на рис. 11. В качестве переменной величины для гиперболических BH -кривых различных сортов стали принято отношение B_r/H_c .

Условно принято $(BH)_{\text{макс}} = 0,42 B_r H_c = 3,2 \times 10^6 \text{ эрг/см}^3 = \text{const}$, что имеет место для Fe—Ni—Al стали.

Из рис. 7 и 8 легко видеть, что при этих условиях рост $(EH)_{\text{макс}}$ равносителен увеличению масштаба для W_a . Значит энергия правильно сконструированного магнето пропорциональна энергии стали $(EH)_{\text{макс}}$. При этом абсолютные значения энергии магнето для Fe—Ni—Al стали и для Со-стали они должны быть уменьшены в отношении произведений $B_r H_c$ для этих материалов.

Помимо оптимальных соотношений размеров магнита a для разных сортов стали, кривые рис. 11 указывают на незначительную зависимость оптимальной проводимости рассеяния от сорта стали и на увеличение энергии магнето W_a при уменьшении отношения B_r/H_c , если $B_r H_c = \text{const}$.

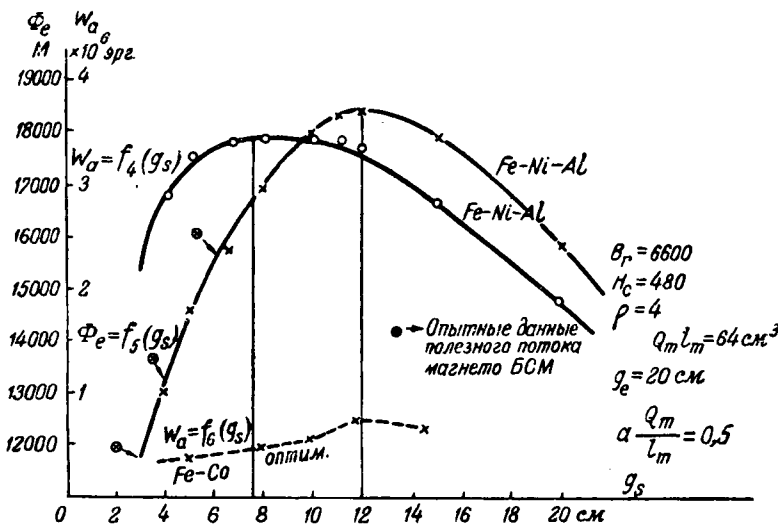


Рис. 10. Определение оптимального рассеяния из условий размагничивания реакцией якоря при $V_m = \text{const}$.

Независимость оптимального значения g_{so} от стали объясняется тем, что при $a = \text{const}$, α_1 приблизительно считать и $\alpha_1 = \text{const}$, потери прямоугольников W_a будут практически подобны для всех сортов стали при одном том же значении g_{so} .

Литература

1. А. М. Сенкевич. Постоянные магниты. Изд. АИИ им. Жуковского, 1946.

2. А. С. Кантер. Реакция якоря в электрических машинах с постоянными магнитами. Электричество, № 3, 1937.

3. Г. Н. Сенилов. К расчету магнето. Электричество, № 3, 1937.

4. С. Н. Чуваев. Расчет постоянных магнитов с максимальным использованием энергии. Электричество, № 6, 1937.

5. Д. Э. Брускин. Электрооборудование самолетов. Гл. VIII. Электрическое зажигание авиационных двигателей. Госэнергоиздат, 1948.

[6. 7. 1950]



Экспериментальное исследование коммутационной реакции якоря в машинах постоянного тока

Инж. В. В. ФЕТИСОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Коммутационная реакция якоря возникает в машине тогда, когда коммутация в ней отклоняется от прямолинейной и становится замедленной или опережающей. В нейтраль-

Изложены методы экспериментального определения коммутационной реакции якоря, позволяющие исследовать явление коммутационной реакции как в установившихся, так и в переходных режимах работы машины. Приведены некоторые результаты исследования, произведенного в лаборатории электрических машин ЛПИ, подтверждающие пригодность изложенных методов.

стоянии щеточного аппарата и, если необходимо, щетки подгоняются к щеткодержателям и притшлифовываются к коллектору. Производится установка щеток в нейтраль-

ное положение по отношению к вспомогательной катушке. Обмотка возбуждения оставляется разомкнутой. Первый способ определения коммутационной реакции якоря заключается в следующем. Через якорь испытуемой машины, вращаемый с постоянной скоростью вспомогательным двигателем, пропускается ток от постороннего источника тока и с помощью флюксметра, присоединенного к катушке $a-a$, или путем осциллографирования

коммутационной реакции якоря, возникающей продольная н. с. коммутационных токов, размагничивающая при замедленной и намагничивающая при ускоренной коммутации машины в случае работы ее в качестве генератора. Коммутационная реакция якоря оказывает значительное влияние на работу машины в режимах перегрузки, в переходных процессах и при работе с ослабленным полем. В этих случаях значение коммутационной реакции якоря имеет большое значение. Однако теоретические расчеты [Л. 2] представляют большие трудности и нуждаются в экспериментальной проверке. Методы опытного определения коммутационной реакции якоря недостаточно разработаны. Изложенная до сих пор методика опытного определения коммутационной реакции якоря [Л. 3] является достаточно совершенной и не пригодна для определения коммутационной реакции якоря при больших перегрузках и при переходных режимах работы машины. В статье предлагаются методы, позволяющие исключить указанные недостатки, и приводятся некоторые результаты нового исследования коммутационной реакции якоря, произведенного автором в лаборатории электрических машин ЛПИ.

Первый способ опытного определения коммутационной реакции. В воздушном зазоре испытуемой машины, строго под серединами смежных добавочных полюсов, помещается вспомогательная катушка $a-a$ (рис. 1), состоящая обычно из 1—2 витков¹. Проверяется со-

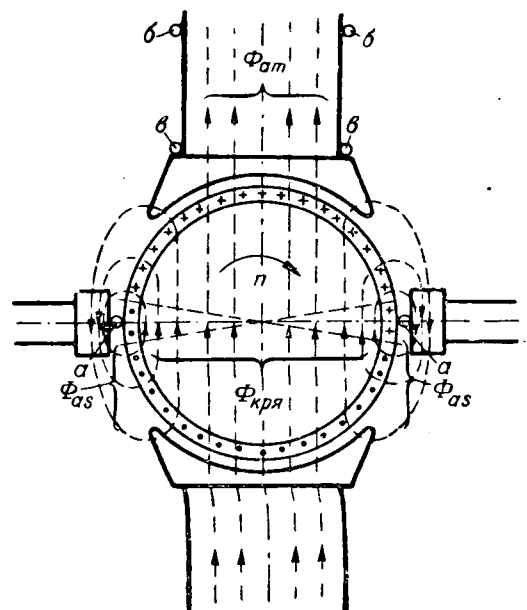


Рис. 1. Продольное поле якоря при действии продольной н. с. коммутационных токов.

¹Для получения более высокой точности желательно иметь вспомогательные катушки под всеми полюсами.

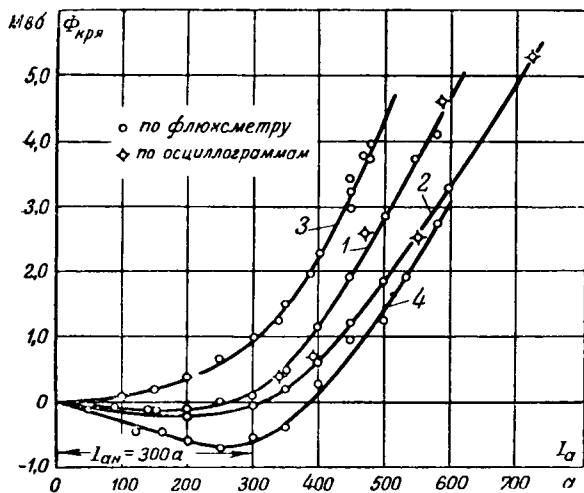


Рис. 2. Экспериментальные кривые потока коммутационной реакции якоря $\Phi_{к.р.я} = f(I_a)$.

1, 2 — при установке щеток на нейтрали и $n = 960$ об/мин (1) и 500 об/мин (2); 3 — при небольшом сдвиге щеток с нейтрали и $n = 960$ об/мин; 4 — то же, что 3, но при изменении направления вращения якоря.

ния измеряется продольный поток коммутационной реакции якоря $\Phi_{к.р.я}$, возникающий в машине при замедленной или ускоренной коммутации вследствие действия н. с. коммутационных токов $F'_{к.м}$. Вместо потока $\Phi_{к.р.я}$ можно также измерять с помощью катушки $v-v$ (рис. 1) продольный поток $\Phi_{ам}$, входящий в главный полюс.

Включая в якорь ток различной величины при неизменной скорости вращения, можно получить зависимость $\Phi_{к.р.я} = f(I_a)$ при $n = \text{const}$, а изменяя скорость и питая якорь одним и тем же током, можно найти зависимость $\Phi_{к.р.я} = f(n)$ при $I_a = \text{const}$.

В качестве иллюстрации упомянутые выше зависимости, полученные при исследовании коммутационной реакции якоря машины GM-282, 118 квт, 440 в, 300 а, 1000 об/мин, приведены на рис. 2 (кривая 1 и 2) и рис. 3.

Для компенсированной машины поток $\Phi_{к.р.я}$ приблизительно пропорционален вызывающей его н. с. коммутационных токов $F'_{к.м}$, так как значения потока $\Phi_{к.р.я}$ сравнительно невелики и соответствуют начальной прямолинейной части кривой намагничивания машины. Поэтому кривые потока коммутационной реакции $\Phi_{к.р.я} = f(I_a, n)$, аналогичные кривым рис. 2 и 3, в случае компенсированной машины представляют в некотором масштабе также и зависимости н. с. коммутационных токов $F'_{к.м} = f(I_a, n)$.

В случае некомпенсированной машины на величину потока $\Phi_{к.р.я}$ оказывает влияние поперечный поток якоря (поперечная реакция якоря), нарушающий пропорциональность между н. с. $F'_{к.м}$ и потоком $\Phi_{к.р.я}$. Поэтому для определения по кривым $\Phi_{к.р.я} = f(I_a, n)$ н. с. коммутационных токов $F'_{к.м}$ нужно построить семейство кривых

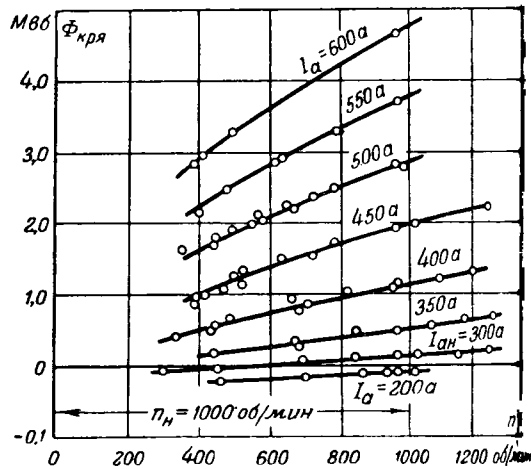


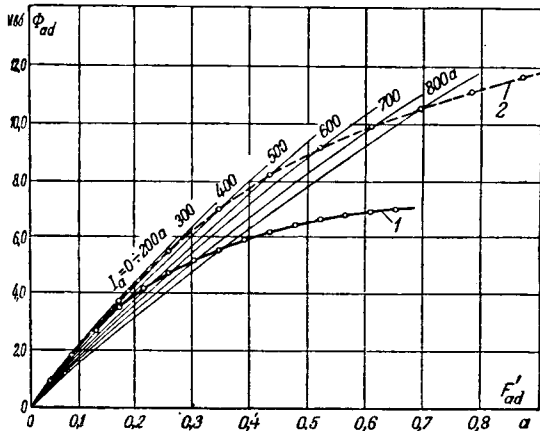
Рис. 3. Экспериментальные кривые потока коммутационной реакции якоря $\Phi_{к.р.я} = f(n)$.

намагничивания машины от продольной н. с. якоря при различных значениях тока в якоре. Для этого необходимо проделать следующий опыт: сдвинув щетки (или точки питания якоря) если подвод тока осуществлен непосредственно к петушкам коллектора, что дает большую точность) на определенное расстояние по коллектору β , нужно пропустить через неподвижный якорь ток различной величины и измерить продольный поток машины $\Phi_{ад}$ флюксметром, присоединенным к той же катушке $a-a$ (или $a-a'$). Распределение поля в машине при этом получается такое же, как и в случае возникновения коммутационной реакции при замедленной коммутации (рис. 1). В результате измерений потока $\Phi_{ад}$ для различных сдвигов щеток с нейтральной линии строятся зависимости $\Phi_{ад} = f(F'_{ад})$, где продольная н. с. якоря $F'_{ад}$, выраженная в масштабе тока возбуждения, определяется по формуле:

$$F'_{ад} = \frac{\beta}{\beta_k} \cdot \frac{\omega_s I_a}{a \omega_f}$$

здесь ω_s — число витков в секции;
 ω_f — число витков на полюс обмотки возбуждения;
 β_k — коллекторное деление.

На рис. 4 приведены кривые 1 и 2, дающие зависимость $\Phi_{ад} = f(F'_{ад})$ при сдвиге точек питания якоря $\beta = \beta_k$ и $\beta = 2\beta_k$. Если теперь соединить точки кривых 1 и 2, соответствующие одинаковому току в якоре, плавными линиями с началом координат, то получится семейство кривых намагничивания машины $\Phi_{ад} = f(F'_{ад})$ при заданных значениях тока I_a . Построенным таким образом кривые учитывают влияние поперечной реакции якоря на продольный поток $\Phi_{ад}$. В случае компенсированной машины семейство кривых $\Phi_{ад} = f(F'_{ад})$ получится кривая $\Phi_{ад} = f(F'_{ад})$, близкая к прямой.



4. Экспериментальные кривые намагничивания магн. от продольной н. с. якоря при разомкнутой обмотке возбуждения.

Основная $\Phi_{ад} = f(F'_{ад}) = f_1(I_a)$ при сдвиге щеток с нейтральной $\kappa = 7,7$ м.м.; 2 — $\Phi_{ад} = f(F'_{ад}) = f_2(I_a)$ при сдвиге щеток с нейтральной $\beta = 2\beta_{\kappa} = 15,4$ м.м.; 3 — семейство кривых $\Phi_{ад} = \varphi(F'_{ад})$ при различных токах в якоре.

Далее, имея кривые $\Phi_{ад} = \varphi(F'_{ад})$ и зная величины I_a и $\Phi_{к.р.я}$, из рис. 2 (или 3) можно определить значения н. с. коммутационных токов, выраженные в масштабе тока возбуждения, кривые $\Phi_{к.р.я} = f(I_a)$ перестроить в виде кривых $F'_{км} = f(I_a)$ (рис. 5). Нетрудно заметить, в случае некомпенсированной машины при больших токах I_a н. с. $F'_{км}$ растет несколько быстрее, чем увеличивается поток $\Phi_{к.р.я}$, вследствие явления насыщения зубцовой зоны поперечным полюсом якоря. В остальных кривых $F'_{км} = f(I_a)$ подобны кривым $\Phi_{к.р.я} = f(I_a)$ рис. 2.

Из рассмотрения экспериментальных кривых 2, 3 и 5 можно сделать некоторые выводы. Из рис. 2 и 5 видно, что для данной машины при токе I_a , не превышающем номинального значения, коммутационная реакция невелика, причем при токе $I_a = 260$ а и скорости $n = 960$ об/мин (кривая 1) коммутация оказывается линейной, при меньшем токе — ускоренной, при большем — замедленной. При увеличении I_a свыше номинального значения правильная коммутация нарушается, появляется значительное искрение под щетками, коммутационная реакция резко возрастает и достигает сравнительно больших величин. Например, при токе $I_{ан} = 600$ а и скорости $n = 960$ об/мин по $\Phi_{к.р.я} = 4,7$ Мвб $\approx 0,16\Phi_{ан}$ и н. с. $F'_{км} = 1,7a \approx 0,14i_{jo}$, где поток и ток возбуждения, соответствующие номинальному напряжению при этом ходе машины $\Phi_{ан} = 29,0$ Мвб и $i_{jo} = 125$ а.

При перегрузках машины уменьшение скорости, как видно из рис. 3, снижает действие коммутационной реакции якоря.

Необходимо сделать следующие замечания, касающиеся выполнения опытов. В случае затормо-

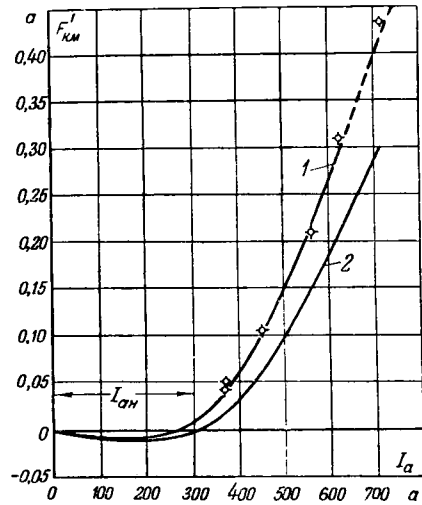


Рис. 5. Экспериментальные кривые н. с. коммутационных токов $F'_{км} = f(I_a)$ при $n = 960$ об/мин (1) и $n = 500$ об/мин (2).

женного якоря при включении машины на напряжение порядка 110 в ток в якоре достигает больших значений, превышающих номинальное в 8—9 раз. В случае включения невозбужденной машины, вращаемой с номинальной скоростью, на то же самое напряжение ток в якоре не превосходит $750a$ (2,5-кратного значения). Это объясняется тем, что при сильно замедленной коммутации н. с. коммутационных токов образует значительный поток по продольной оси машины, который индуктирует во вращающемся якоре э. д. с., направленную встречно приложенному напряжению. Испытуемая машина при этом начинает работать в двигательном режиме и стремится увеличить свою скорость, под щетками возникает сильное искрение, и переходное падение напряжения от щеток к коллектору значительно возрастает. При дальнейшем увеличении напряжения в момент включения тока на коллекторе появляются вспышки кругового огня.

Для уменьшения погрешности от действия продольной реакции якоря при проведении опытов необходимо очень тщательно устанавливать щетки на нейтрали и возможно чаще проверять правильность их установки, так как щетки легко смещаются с нейтрали под действием ряда причин (плохое касание щеток коллектора, перекося щеток в щеткодержателе, вызываемый трением о коллектор, подгорание сбегающего края щеток от сильного искрения). Опыт определения зависимости $\Phi_{к.р.я} = f(I_a)$ необходимо начинать с включения небольших токов в якоре, а после включения больших токов необходимо для контроля результатов и правильности установки щеток на нейтрали проделать снова опыт включения небольшого тока. Необходимо также контролировать результаты при получении кривых $\Phi_{к.р.я} = f(n)$ при $I_a = \text{const}$, так как изменение скорости может вызвать некоторое смещение щеток с нейтрали и иногда может получиться, что точки, снятые, например, при уменьшении ско-

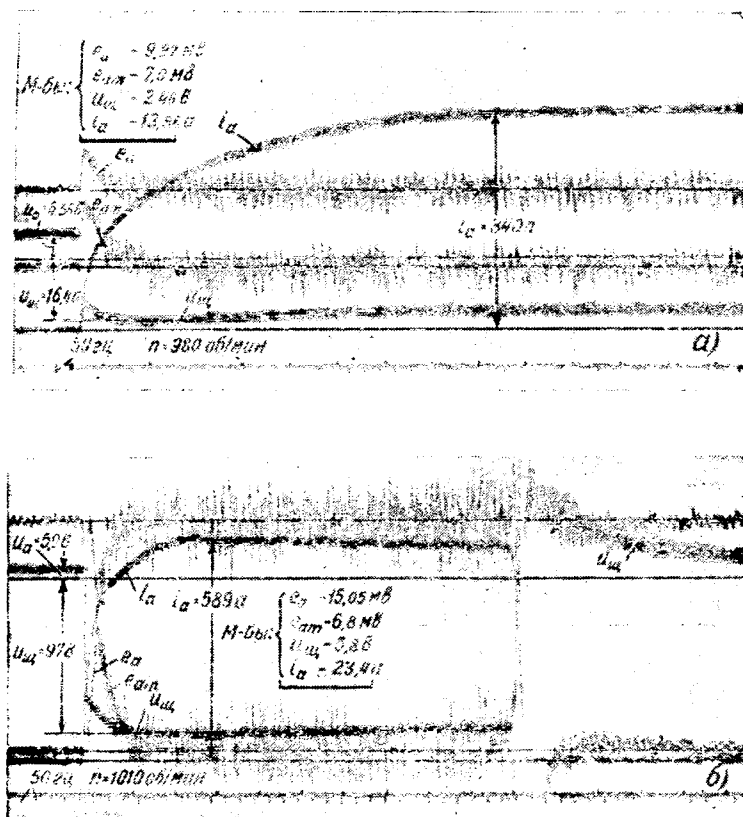


Рис. 6. Осциллограммы включения тока во вращаемом якоре при разомкнутой обмотке возбуждения для определения коммутационной реакции якоря.

рости, не согласуются с точками, снятыми при увеличении скорости.

С целью контроля результатов и выяснения влияния продольной реакции якоря весьма полезно снять кривую $\Phi_{к.р.я} = f_1(I_a)$ сначала при одном направлении вращения якоря, а потом изменить направление вращения и, проверив предварительно установку щеток на нейтрали, снять другую кривую $\Phi_{к.р.я} = f_2(I_a)$. Так как знак продольной реакции якоря при изменении направления вращения не меняется, а знак коммутационной реакции изменяется, то, если щетки не были строго расположены на нейтрали, обе кривые $\Phi_{к.р.я} = f_{1,2}(I_a)$ не совпадут (кривые 3 и 4 рис. 2). Тогда средняя по отношению к этим кривым линия приблизительно даст зависимость $\Phi_{к.р.я} = f_0(I_a)$ при положении щеток на нейтрали. В дальнейшем контроль установки щеток на нейтрали можно производить, используя полученную зависимость $\Phi_{к.р.я} = f_0(I_a)$, добиваясь такого положения щеток на коллекторе, чтобы при заданных скорости n и токе I_a значения потока $\Phi_{к.р.я}$, измеренного флюксометром, соответствовали исходной кривой $\Phi_{к.р.я} = f_0(I_a)$.

Для определения потока $\Phi_{к.р.я}$ осциллографическим путем необходимо заснять на осциллограмме э. д. с. e_a , индуктируемую во вспомогательной катушке $a-a$ (или $v-v$) при включении тока во вращаемом якоре, и затем про-

извести вычисленные площади фигуры ограниченной кривой $e_a = f(t)$ и абсцисс, выражающей в некотором штабе поток $\Phi_{к.р.я}$. Однако в данном случае петля осциллографа не дает плавной линии, а совершает также быстрые колебания, вызванные пульсирующим током от коммутационных токов, и вычисление площади указанной фигуры ограниченной сильно размытой кривой э. д. с. $e_a = f(t)$, оказывается затруднительным. Поэтому рекомендуется при осциллографировании применять рассчитанный надлежащим образом фильтр (например, простейший, состоящий из емкости и индуктивности), не пропускающий коммутационные колебания в цепь регистрирующей петли и не влияющий на величину основного всплеска э. д. с. e_a .

На рис. 6 приведены осциллограммы э. д. с. e_a и e_{am} , индуктируемых в катушках $a-a$ и $v-v$ при включении тока в якоре $I_a = 340$ а и $I_a = 589$ а. На осциллограммах также записано напряжение на щетках машины. Быстрые колебания петли, записывающей э. д. с. e_a , несколько ограничивались (но недостаточным образом) фильтром. Вторая петля, регистрирующая э. д. с. e_{am} , работающая без фильтра, так как влияние пульсаций тока для катушки $v-v$, расположенной на главном полюсе, меньше вследствие демпфирования потока вихревыми токами в станине. Скорость вращения якоря измерялась с помощью отметчика скорости вращения, подключенного к петле, вычерчивающей внизу осциллограммы прямую линию, прерываемую один раз за каждый оборот якоря в тот момент, когда на петлю через отметчик подается напряжение.

Значения потока $\Phi_{к.р.я}$, определенные на осциллограммах при $n \approx 1000$ об/мин и $n \approx 540$ об/мин, нанесены на график рис. 2. С падением нанесенных точек с ранее построенными кривыми получилось хорошее.

Осциллографическое исследование коммутационной реакции якоря имеет то преимущество, что оно позволяет изучить действие коммутационной реакции в переходных режимах. Например, из осциллограмм рис. 6 видно, что в случае включения тока в якоре поток $\Phi_{к.р.я}$, а следовательно, и н. с. $F'_{к.м}$ достигают своего максимума ранее, чем ток в якоре успевает достигнуть установившегося значения. Это объясняется следующим: при включении тока в главной зоне машины поперечное поле якоря в коммутационной зоне, замыкаясь по путям рассеяния добавочных полюсов добавочных полюсов через рассеянные части машины, успевает следовать за вращающимся током в якоре. Но поле добавочных полюсов сильно демпфируется вихревыми токами в массивных станине и сердечниках добавочных

юсв и отстает от тока в главной цепи. Поэтому в начальный момент коммутирующее поле оказывается опрокинутым, коммутация — очень замедленной даже при включении новых токов в якорь, а коммутационная реакция с увеличением тока резко возрастает. В последующее время вихревые токи затухают, коммутирующее поле приобретает свой естественный знак (если только ток в якоре достиг того предела, когда коммутирующее поле вообще опрокинуто), условия коммутации улучшаются и, несмотря на возрастание тока, коммутационная реакция якоря может несколько выиграться.

Следует отметить, что при переходных режимах коммутационную реакцию может оказать влияние трансформаторная э. д. с., возникающая в короткозамкнутых секциях при быстром изменении основного потока машины, например, при внезапном включении в сеть вращающегося двигателя или при форсировании возбуждения машины независимого возбуждения. Однако, за исключением редких случаев, влияние трансформаторной э. д. с. невелико, как постоянная времени группы коммутационных секций во много раз меньше постоянной времени параллельной обмотки возбуждения. Например, для исследуемой машины в 60 раз меньше постоянной времени первой секции от вихревых токов (в 6—7 раз). Поэтому какие-либо изменения основного потока машины воспринимаются, главным образом, обмоткой возбуждения и частично массивной статорной обмоткой, вызывая в них токи, демпфирующие основной поток машины, и дополнительный ток в короткозамкнутых секциях от трансформаторной э. д. с. получается незначительным.

На осциллограмме рис. 6,б заснят также процесс выключения тока в якоре. Интересно отметить, что сразу же после разрыва цепи якоря напряжение на щетках не становится равным э. д. с. E_0 , индуцируемой потоком остаточного магнетизма, как это было до выключения тока, а достигает величины, превосходящей несколько раз э. д. с. E_0 , и потом довольно быстро затухает и приближается к э. д. с. E_0 . Это также объясняется влиянием вихревых токов в массивных частях магнитной цепи добавочных полюсов. После выключения тока в якоре коммутирующее поле под добавочным полюсом не исчезает, а даже в первый момент несколько инвертируется, так как противодействующий основной поток якоря пропадает сразу, а исчезновение потока добавочного полюса задерживается демпфирующим действием вихревых токов в станине и сердечниках добавочных полюсов. В короткозамкнутых секциях при движении в магнитном поле под добавочными полюсами возникает ток, который вызывает поток, совпадающий по направлению с потоком от остаточного магнетизма (аналогично случаю сильно инвертированной коммутации). В результате этого в начальный момент после выключения тока обмотке якоря индуцируется э. д. с. E , пре-

вышающая э. д. с. E_0 от остаточного магнетизма. Вместе с затуханием вихревых токов в станине и сердечниках добавочных полюсов, поддерживающих поток в коммутационной зоне, затухает и э. д. с. E , достигая через некоторое время значения E_0 .

Следует отметить, однако, что описанный выше осциллографический способ, являясь вполне точным для определения коммутационной реакции якоря при установившемся режиме, для переходных процессов в случае машин с массивной станиной дает некоторую погрешность, так как демпфирующее действие вихревых токов в станине вызывает отставание изменения потока $\Phi_{к.р.я}$ от быстроменяющейся н. с. $F'_{к.м}$. Поэтому описанный метод определения коммутационной реакции якоря в переходных режимах является вполне пригодным только для машин с расслоенной станиной, что встречается лишь в редких случаях. Указанный недостаток устраняется в следующем способе определения коммутационной реакции якоря, полностью пригодном и для машин с массивной станиной.

Второй способ. В этом исследовании коммутационной реакции якоря обмотка возбуждения замыкается накоротко и при пропускании тока через вращаемый якорь осциллографируется также и ток i_f , вызываемый в обмотке возбуждения действием возникающего продольного потока $\Phi_{к.р.я}$. Щетки предварительно устанавливаются на нейтрали обычным индуктивным методом. Так как демпфирующее действие обмотки возбуждения по отношению к основному потоку машины превосходит в 10—15 раз демпфирующее действие вихревых токов в станине, то в этом случае влиянием вихревых токов можно пренебречь. Тогда для обмотки возбуждения можно написать следующее уравнение:

$$L_f \frac{di_f}{dt} + M \frac{dF'_{к.м}}{dt} + i_f r_f = 0, \quad (2)$$

где $F'_{к.м}$ — н. с. коммутационных токов, выраженная в масштабе тока возбуждения;

r_f — сопротивление обмотки возбуждения;

L_f — индуктивность обмотки возбуждения,

равная сумме взаимоиндуктивности

M обмотки возбуждения с коротко-

замкнутыми коммутируемыми секциями

и индуктивности S_f от полей рас-

сеяния главных полюсов. Индуктив-

ность M можно приближенно при-

нять равной постоянной величине, так

как поток $\Phi_{к.р.я}$ невелик (его вели-

чина ослабляется демпфирующим дей-

ствием обмотки возбуждения), а влия-

нием поперечного потока якоря мож-

но пренебречь (поперечная реакция

якоря при небольшом продольном по-

токе $\Phi_{к.р.я}$ невелика). Приближенно

взаимную индуктивность M можно

определить по начальной части харак-

теристики холостого хода известным

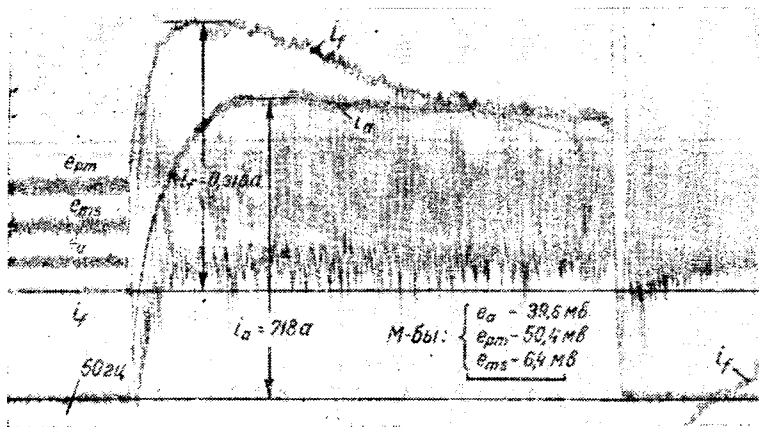


Рис. 7. Осциллограмма включения тока во вращаемом якоре ($n = 990 \text{ об/мин}$) при замкнутой накоротко обмотке возбуждения для определения коммутационной реакции якоря.

методом. Индуктивность S_f также можно принять равной постоянной величине, так как потоки рассеяния главных полюсов замыкаются через воздух.

Уравнение (2) можно переписать в следующем виде:

$$L_f di_f + MdF'_{км} = -r_f i_f dt. \quad (3)$$

Процесс нарастания н. с. $F'_{км}$ происходит очень быстро. Поэтому при интегрировании уравнения (3) промежуток времени, в течение которого величина $F'_{км}$ достигает установившегося значения, невелик, и правая часть уравнения дает незначительную величину, которой в первом приближении можно пренебречь, предполагая сверхпроводимость обмотки возбуждения. В таком случае, интегрируя уравнение (3) и приравняв постоянную интегрирования нулю, получим:

$$F'_{км} = -\frac{L_f}{M} i_f = -\left(1 + \frac{S_f}{M}\right) i_f = -K \cdot i_f. \quad (4)$$

Отсюда следует, что всплеск тока в обмотке возбуждения при включении тока во вращаемом

якоре изображает в некотором масштабе изменение н. с. коммутационных токов. Таким образом, данный метод позволяет исследовать коммутационную реакцию якоря при переходных процессах.

На рис. 7 приведена осциллограмма полученная согласно изложенному методу при включении тока $I_a = 718 \text{ а}$ в вращаемом якоре ($n \approx 990 \text{ об/мин}$) при замкнутой накоротко обмотке возбуждения. На осциллограмме также записаны э. д. с. e_a , e_{fm} , индуцируемые в вспомогательных катушках $a-a$, $b-b$ (рис. 1) и э. д. с. e_{ms} , индуцируемая потоком рассеяния сердечника главного полюса в соединенных встречно катушках $b-b$.

На рис. 8,а приведены в обработанном виде кривые i_a и $i_f = f(t)$, полученные при осциллографировании по второму методу для случая включения различных токов в якоре.

Коэффициент пропорциональности K в уравнении (4) в первом приближении можно принять постоянным и вычислить по формуле:

$$K = \frac{L_f}{M} = 1 + \frac{S_f}{M},$$

где коэффициенты самоиндукции L_f и S_f обмотки возбуждения определяются расчетным или опытным путем. Однако к определению коэффициента K можно подойти и иначе. Для этого необходимо произвести осциллографирование процесса включения тока в заторможенном якоре при замкнутой накоротко обмотке возбуждения сдвинув предварительно щетки (или точки питания якоря) с нейтрали на определенное расстояние например на одно коллекторное деление в направлении вращения якоря. Желательно при этом, чтобы ток в якоре достигал того же установившегося значения и через такой же промежуток времени, что и в опыте определения коммутационной

реакции якоря. Тогда, определяя значения токов i_a и i_f по осциллограмме для выбранных промежутков времени t и найдя по формуле (1) значения продольной н. с. $F'_{ад}$, можно для каждого момента времени t вычислить коэффициент K по следующей формуле:

$$K = \frac{F'_{ад}}{i_f}.$$

На рис. 8,б приведены кривые i_a и $i_f = f(t)$, полученные при осциллографировании по вышеописанному способу при сдвиге щеток с нейтрали на одно коллекторное деление, и постро-

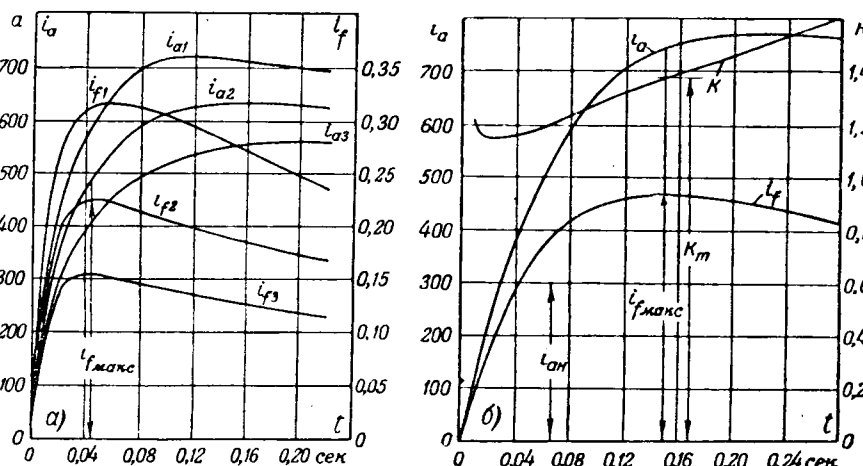


Рис. 8. Экспериментальные кривые, полученные путем осциллографирования при включении тока в якоре.

а — в случае вращения якоря ($n = 960 \text{ об/мин}$) и установки щеток на нейтрали; б — при неподвижном якоре и сдвиге щеток с нейтрали ($\beta = \beta_K$).

вая коэффициент $K = f(t)$, подсчитанного по формуле (6). Из рис. 8,б видно, что коэффициент K остается постоянным, а несколько изменяется с течением времени. Это объясняется несколькими причинами: а) в самый начальный момент, повинуясь, сказывается все же демпфирующее действие вихревых токов в станине, несколько выходящее величину тока i_f ; б) в последующие моменты оказывает влияние омическое сопротивление r_f обмотки возбуждения, вызывающее затухание тока i_f и, тем самым, возрастание коэффициента K ; в) кроме того, сами величины M [уравнение (5)] с возрастанием тока i_a несколько изменяются, вызывая также некоторое отклонение коэффициента K .

При расчете нарастания н. с. коммутационной индукции якоря $F'_{км}$ по кривым $i_f = f(t)$ рис. 8,а по формуле (4) можно взять некоторое среднее начальное промежуток времени значение коэффициента K ; при определении максимальной индукции н. с. $F'_{км}$ можно взять коэффициент K , соответствующий максимальному значению тока обмотки возбуждения по рис. 8,б ($K_m = 0,38$). Погрешность при таких расчетах получается не более 10—15%, что уже является значительным достижением при исследовании такого сложного явления, каким является коммутационная реакция якоря в переходных процессах.

Очень полезным оказывается сравнение осциллограмм рис. 8,а и 8,б, полученных двумя способами: в случае возникновения только коммутационной и в случае возникновения только индукционной реакции якоря. Например из рис. 8,а видно, что в первом случае ток i_f достигает максимума значительно раньше, чем во втором, тот ток в якоре успевает достигнуть только 65% от установившегося значения. Из рис. 8,а видно, что н. с. $F'_{км}$ в первый момент включения тока в якоре резко возрастает, достигая 70—85% от установившегося значения, а ток i_a достигает максимума и далее изменяется относительно незначительно (несколько уменьшается).

Из данных осциллограмм вычислены максимальные значения н. с. $F'_{км}$ для нескольких случаев включения тока в якоре, вращаемом со скоростью $n \approx 990$ об/мин, и нанесены на график рис. 7. Точки расположились вблизи ранее определенной кривой $F'_{км} = f(I_a)$.

Из осциллограмм замечено, что при выключении тока в якоре, ток i_f в обмотке возбуждения резко меняет свое направление, достигая сравнительно большой величины, а затем, впоследствии, затухая, приближается к нулю (на осциллограмме рис. 7 виден лишь последний участок кривой тока i_f). Здесь сказывается то же действие вихревых токов на

поток в коммутационной зоне, которое было описано ранее.

В заключение можно отметить, что результаты опытов по второму методу можно еще улучшить, если применить компенсацию омического сопротивления обмотки возбуждения, например, по способу М. П. Костенко, включением в цепь возбуждения последовательной коллекторной машины. В этом случае изменение коэффициента K при включении тока в якоре с течением времени будет меньше, так как демпфирующее действие вихревых токов в станине по отношению к потоку $\Phi_{к.р.я}$ понизится, и, кроме того, затухание тока i_f в обмотке возбуждения уменьшится.

Выводы. 1. Предложенные методы опытного определения коммутационной реакции якоря дают хорошие результаты. Первый способ особенно пригоден при изучении коммутационной реакции в установившихся режимах при больших перегрузках, второй способ — при изучении коммутационной реакции в переходных режимах работы машины. Описанные методы могут быть применены и в случае исследования коммутационной реакции при подпитке добавочных полюсов от постороннего источника тока.

2. Для нормальных машин, подобных исследованной машине ГМ-282, при нормальных условиях работы коммутационная реакция якоря невелика. Но она резко возрастает при перегрузках машины. С увеличением скорости вращения машины коммутационная реакция также возрастает.

3. При переходных режимах на коммутационную реакцию якоря оказывают существенное влияние вихревые токи в станине и сердечниках добавочных полюсов, демпфирующие поток добавочных полюсов и вызывающие опрокидывание или ослабление коммутирующего поля при включении или резком увеличении тока в главной цепи (замедление коммутации) и усиление его при выключении и.и. резком уменьшении тока (ускорение коммутации). При включении тока во вращаемом якоре в начальный момент времени коммутационная реакция быстро возрастает, достигает максимума раньше, чем ток в якоре успевает достигнуть установившегося значения, и затем несколько уменьшается. Это показывает, что влияние коммутационной реакции якоря в переходных режимах гораздо больше, чем в установившихся.

Литература

1. В. Т. Касьянов. Реакция якоря машин постоянного тока. ВЭП, № 2, 1940.
2. Н. П. Ермолин. Расчет ампервитков токов коммутации в машинах постоянного тока. Электричество, № 3, 1949.
3. М. И. Алябьев. Опытное определение реакции коммутационных токов в машинах постоянного тока. Электричество, № 5, 1950.

[4. 8. 1950]



Влияние взаимоиנדукции в цепях машин постоянного тока и определение взаимоиנדуктивности цепей

Кандидат техн. наук Л. М. ШИЛЬДИНЕР

Москва

Электрические машины постоянного тока в схемах автоматического регулирования и в установках с ионными преобразователями работают значительную часть времени в условиях неустановившегося процесса. Общеизвестно значение этих схем электрических приводов для важнейших отраслей народного хозяйства — металлургической, металлообрабатывающей, угольной и др.

Глубокое исследование переходного режима электрических машин постоянного тока требует как можно полное изучение всех параметров, от которых зависят характерные особенности неустановившегося режима. Без подведения прочного фундамента из достоверных, экспериментально установленных параметров невозможно точно предопределить изменение тока, момента и скорости электрических машин во время переходного процесса. Это справедливо не только для машин постоянного тока небольших мощностей, не имеющих компенсационной обмотки. В самом деле, при коротком замыкании между разнополюсными щетками компенсационная обмотка оказывается выключенной и своей функцией не выполняет.

Здесь подвергается исследованию влияние взаимоиנדуктивности обмоток якоря и возбуждения главных полюсов в шунтовых машинах постоянного тока и определяется коэффициент взаимоиנדуктивности этих контуров M .

Следует отметить, что даже в сравнительно недавно опубликованных работах, посвященных изучению переходных процессов машин постоянного тока, пренебрегают влиянием взаимоиנדуктивности и принимают $M=0$. Лишь в одной недавно опубликованной работе Фроста учитывается влияние взаимоиנדуктивности [Л. 1]. Линвилль [Л. 2] скептически оценивает это место статьи Фроста, отмечая, что параметры, объясняющие явления взаимоиנדуктивности, „трудно определить численно или измерить опытным

Предлагаются два метода — экспериментальный и аналитический — определения взаимоиנדуктивности электрических цепей машин постоянного тока. Приводятся экспериментальные данные.

путем“. Но Фрост не учитывает, в противоположность большинству следователей, переход

режимов машин постоянного тока, индуктивности цепи якоря L_a , принимая $L_a=0$.

Также следует отметить ошибочность метода расчета взаимоиנדуктивности машин постоянного тока, предложенного Гессом [Л. 3]. Он выводит M подобно тому, как это принято для трансформаторов. Индуктивностью обмотки якоря L_a принимается значение, обусловленное не речным потоком реакции якоря и всеми последовательно соединенными витками обмотки якоря w_a . В действительности взаимоиנדуктивность машин постоянного тока зависит от витков якоря, сцепленных только с продольным потоком, или от числа „продольных“ витков обмотки якоря.

Известно, что взаимоиנדуктивностью M можно пользоваться только в случае, когда излучающийся поток охватывает одновременно или больше электрических контура. Кроме того, полагая M неизменным, делается допущение, что магнитный поток изменяется пропорционально н. с. контура, которые сцеплены с этим потоком. Применительно к шунтовой машине постоянного тока следует считать обмотку возбуждения главных полюсов одним контуром и „продольные“ витки обмотки якоря другим контуром. Хорошо известно, что „продольные“ витки обмотки якоря появляются при сдвиге щеток относительно магнитной нейтрали, либо при воздействии поперечной реакции якоря, которая деформирует магнитный поток главных полюсов и изменяет проводимость магнитной цепи машины. В том и другом случае конечный эффект одинаков.

С целью выявления действия взаимоиנדуктивности обмотки якоря на обмотку возбуждения были произведены опыты, при которых якорь заторможенного двигателя с *закорочен*

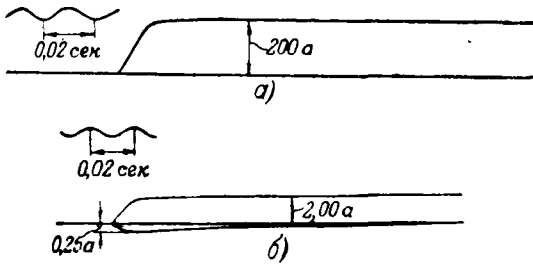


Рис. 1.

откой возбуждения главных полюсов при-
чался к сети и осциллографировался ток в
ях якоря и обмотке возбуждения.

Осциллограмма *a*, рис. 1 была получена при
ановившемся токе включения в якорь $i_{ay} =$
 200 a и при щетках, установленных на нейт-
ри. При таком же установившемся токе $i_{ay} =$
 200 a , но со щетками, сдвинутыми с нейтрали
одно коллекторное деление (8 электрических
полюсов), снималась осциллограмма *б*, рис. 1.
Осциллограммы видно, что, несмотря на срав-
тельно небольшой сдвиг щеток, вследствие
яния взаимоиндуктивности максимум тока в
отке возбуждения главных полюсов дости-
л $0,25 \text{ a}$ (26% номинального значения).

Номинальный ток якоря $i_{ан} = 50 \text{ a}$ и номи-
нальный ток возбуждения главных полюсов
 $= 0,95 \text{ a}$.

Еще была снята осциллограмма *a*, рис. 2 так-
же при щетках, установленных на нейтрали, но
десятикратном токе включения $i_{ay} = 500 \text{ a}$.
Максимум всплеска тока i_s не превышал 15%.
Ось щеток не совсем точно совпала с
нейтралью. При токе $i_{ay} = 200 \text{ a}$ максимум до-
полнительного тока в цепи возбуждения вследствие
яния взаимоиндуктивности весьма незначи-
телен.

Осциллограммы *б* и *в* рис. 2 снимались при
включении обмоток возбуждения заторможенного
двигателя от аккумуляторной бата-
реи номинального значения $i_{в.н} = 0,95 \text{ a}$.
При возбуждении был включен до присоеди-
нения к сети.

На осциллограмме *б* $i_{ay} = 185 \text{ a}$, в осцилло-
грамме *в* $i_{ay} = 400 \text{ a}$. Максимум всплеска тока
возбуждения был равен соответственно $i_{s \text{ макс}} =$
 $0,13 \text{ a}$ и $i_{s \text{ макс}} = 1,3 \text{ a}$, 63% и 137% номиналь-
ного тока возбуждения. Щетки находились в
нейтральной позиции.

Эти опыты подтверждают, что продольные
токи якоря, если щетки не смещаются с нейт-
рали, могут появиться лишь при наличии маг-
нитного потока, создаваемого предварительным
включением тока возбуждения и, следовательно,
при существовании предпосылок для изменения
проводимости потока главных полю-
сов главным потоком.

В тех случаях, когда нет потока, созданного
предварительным включением тока возбуждения,
не происходит реакции поперечной н. с. якоря не об-

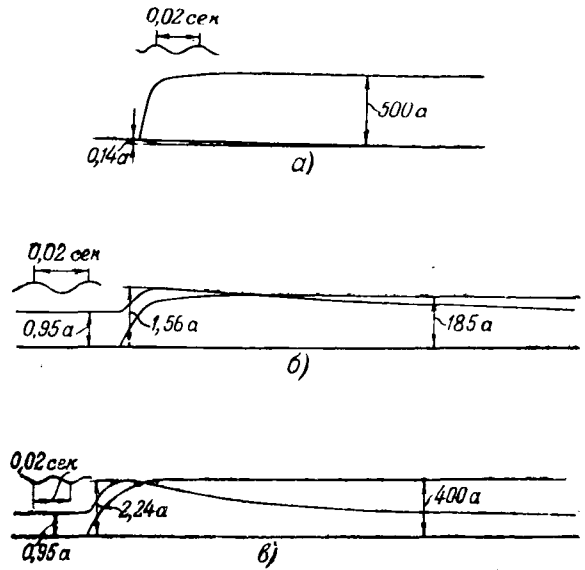


Рис. 2.

наруживается в цепи возбуждения даже при
8—10-кратном установившемся токе включения
в цепи якоря.

Следует признать, что при изучении переход-
ных процессов в машинах постоянного тока, у
которых возбуждается главный поток до воз-
никновения большого толчка тока якоря, вызы-
вающего переходный процесс, нельзя пренебре-
гать добавочным током в цепи возбуждения. До-
бавочный ток является результатом влияния
взаимоиндуктивности тока включения якоря i_a ,
что видно из осциллограмм *б* и *в*, рис. 3 и
также из рис. 1, 2 и 3, где сплошные кривые —
опытные, а пунктирные получены вычислением.

Опытная кривая рис. 3 взята из осцилло-
граммы *в*, рис. 2. Опытные кривые рис. 4 и 5
получены при режиме пуска шунтового двига-
теля с предварительным возбуждением главного
потока током $i_{в.н} = 0,95 \text{ a}$. Кривая рис. 4 отно-
сится к случаю прямого пуска без добавочного
сопротивления в цепи якоря. Максимум тока
якоря был равен $i_{a \text{ макс}} = 660 \text{ a}$. Кривая рис. 5
получена при включенном добавочном сопро-
тивлении в цепи якоря и при максимуме тока
в цепи якоря $i_{a \text{ макс}} = 320 \text{ a}$.

Расчетные (пунктирные) кривые построены
по уравнениям, вывод которых базируется на
учете влияния взаимоиндуктивности между
обмотками возбуждения главных полюсов и
якоря.

Переходим к рассмотрению этого вопроса.
Сначала напишем уравнение равновесия на-
пряжения и э. д. с. цепи обмотки возбуждения

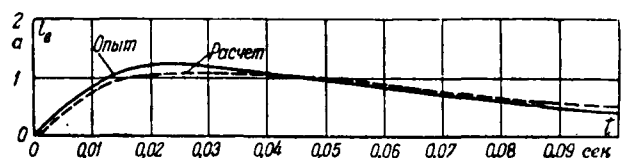


Рис. 3.

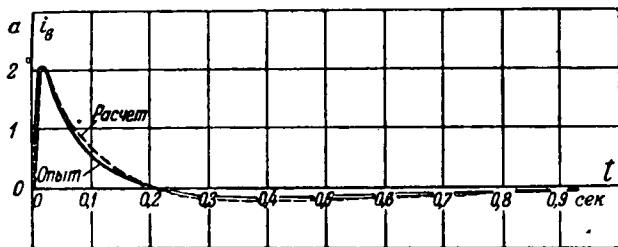


Рис. 4.

только для изменяющейся составляющей тока возбуждения

$$L_{s_1} \frac{di_s}{dt} + r_s i_s - M \frac{di_a}{dt} = 0, \quad (1)$$

$$r_s i_{s.н} = U \text{ и } \frac{di_{s.н}}{dt} = 0,$$

где L_{s_1} — индуктивность обмотки возбуждения;

U — напряжение, приложенное к обмотке возбуждения главных полюсов;

r_s — активное сопротивление цепи возбуждения.

Знак минус перед э. д. с. взаимоиндуктивности взят потому, что эта э. д. с. направлена встречно э. д. с. индуктивности. Окончательный выбор знака M производится в результате интегрирования уравнения (1).

Приближенное решение (1) можно найти, если воспользоваться такой подстановкой:

$$i_a = \frac{U}{r_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right). \quad (2)$$

Такое допущение о характере изменения тока включения i_a , как известно, верно при неизменной постоянной времени цепи якоря T_a . В (2) r_a — активное сопротивление обмотки якоря; t — время.

Определив производную тока i'_a из (2) и полагая, что при $t=0$ $i_s=0$, находим путем интегрирования

$$i_s = \frac{K_1}{\frac{1}{T_a} - K_2} \left(e^{-K_2 t} - e^{-\frac{t}{T_a}} \right), \quad (3)$$

где

$$\frac{MU}{L_a L_{s_1}} = K_1 \text{ и } \frac{r_s}{L_{s_1}} = K_2.$$

Суммарная индуктивность, обусловленная всем изменяющимся потоком главных полюсов, вычислена по общепринятому методу

$$L_{s_1} = 2pw_s \lambda \cdot 10^{-8}, \quad (4)$$

где p — число пар полюсов;

w_s — число витков шунтовой катушки одного полюса;

λ — магнитная проводимость главного потока;

L_a — индуктивность обмотки якоря, обусловленная поперечным потоком.

Расчетные кривые добавочной части тока возбуждения рис. 4 и 5 получены несколько более сложным путем.

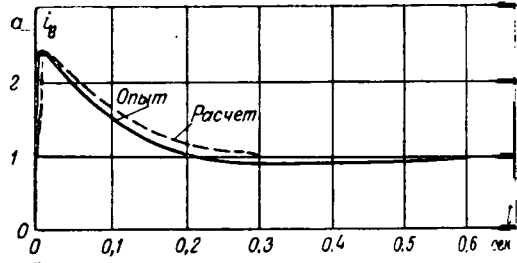


Рис. 5.

Процесс пуска двигателя делится на две части. В первой части ток включен в цепь якоря, но якорь еще не достиг заметной скорости. Он успевает в первой части нарасти примерно до своего максимального значения $i_{a \text{ макс}} \approx i_{ay}$ (принимается постоянное добавочное сопротивление в цепи якоря). Во второй части пуска ток якоря начинает убывать вследствие наличия увеличивающейся противо-э. д. с. вращения.

Для первой части периода пуска добавочный ток возбуждения i_s подсчитывается по вышеуказанному методу для заторможенного двигателя, так как скорость вращения якоря мала. В другую часть периода пуска принимается, что ток якоря убывает по показательной функции

$$i_a = i_{ay} e^{-\frac{t}{T_m}},$$

где T_m — механическая постоянная времени вращающихся масс системы.

Определяем первую производную тока i'_a из (5) и подставляем в (1).

Сейчас принимаем начальные условия $t=0$ $i_s = i_{s_0}$, где i_{s_0} — величина добавочной составляющей тока возбуждения, когда ток включения якоря достигает приблизительно максимального значения.

Интегрируя дифференциальное уравнение добавочного тока возбуждения в другой период пуска, получим:

$$i_s = \left(i_{s_0} + \frac{K_3}{K_2 \frac{1}{T_m}} \right) e^{-K_2 t} - \frac{K_3}{K_2 - \frac{1}{T_m}} e^{-\frac{t}{T_m}},$$

где

$$\frac{Mi_{ay}}{L_{s_1} T_m} = K_3 \text{ и } \frac{r_s}{L_{s_1}} = K_2.$$

Переходим к изложению метода экспериментального определения M .

Снова напишем уравнение (1), выражающее равновесие э. д. с. и напряжения цепи возбуждения для момента включения тока в якорь и заторможенного двигателя, и интегрируем его:

$$M \int_{t=0}^{t=\infty} di_a = L_{s_1} \int_{t=0}^{t=\infty} di_s + r_s \int_{t=0}^{t=\infty} i_s dt$$

при $t=0$, $i_a=0$, $i_s=0$; при $t=\infty$, $i_a=i_{ay}$, $i_s=0$

Первый интеграл правой части равен $i_{ay} M$ и, следовательно,

$$M = \frac{r_s F}{i_{ay}},$$

$$F = \int_{i=0}^{i=\infty} i_a dt.$$

Этот интеграл определяется по осциллограмме возбуждения любым методом приближенного интегрирования [Л. 4]. За нулевую линию вымается $i_{a,n}$.

Подсчетная по осциллограмме ν , рис. 2 площадь $F_1 = 0,109$. Установившийся ток $i_{ay} = 400$ а. Главное сопротивление обмотки возбуждения $= 200$ а.

По осциллограмме β , рис. 2 $F_2 = 0,0748$ и $i_{ay} = 185$ а.

При этих условиях экспериментально найдены конечные значения взаимоиндуктивности следовавшей машины:

$$M_1 = \frac{200 \cdot 0,109}{400} = 0,0545 \text{ гн},$$

$$M_2 = \frac{200 \cdot 0,0748}{185} = 0,081 \text{ гн}.$$

Взаимоиндуктивность цепей машин постоянного тока можно определить численно по следующему методу. Согласно формуле (4) статьи [4]

$$F = \frac{\varphi_p 2p\omega_a \cdot 10^{-8}}{r_a}.$$

Этому равенство (7) переписывается так:

$$M = \frac{\varphi_p 2p\omega_a \cdot 10^{-8}}{i_{ay}},$$

$\Phi_p = \Phi_0 - \Phi_a$ — уменьшение главного потока вследствие размагничивающего влияния реакции якоря;
 Φ_0 — поток холостого хода;
 Φ_a — действующий поток с учетом размагничивающего действия поперечной реакции якоря, соответствующий i_{ay} ; Φ_a находят по внешней характеристике.

В случае многократных перегрузок можем использовать следующий метод [Л. 5].

По кривой внешней характеристики, данной на рис. 5, находим для $i_{ay} = 400$ а, $\varphi_{p1} = 210\,000$; для $i_{ay} = 185$, $\varphi_{p2} = 300\,000$.

Численные значения вычисленных взаимоиндуктивностей будут:

$$M_1 = \frac{4 \cdot 1\,900}{400} 210\,000 \cdot 10^{-8} = 0,086 \text{ гн},$$

$$M_2 = \frac{4 \cdot 1\,900}{185} 300\,000 \cdot 10^{-8} = 0,057 \text{ гн}.$$

Согласно сравнению между опытным и расчетным значениями M дает ошибку всего лишь в 10%.

Влиянием взаимоиндуктивности, говоря, влиянием изменения тока возбуждения в цепи обмотки якоря можно пренебречь. Это подтверждается данными соответ-

ствующей обработки осциллограммы ν , рис. 2. Результаты обработки сведены в таблицу:

Время, сек	Ток якоря i_a, a	Скорость изменения тока $\frac{di_a}{dt}$	Ток возбуждения i_b, a	Скорость изменения тока возбуждения $\frac{di_b}{dt}$
0,0025	—	—	0,107	71,5
0,0125	52	23 900	0,308	115
0,0175	113	22 700	0,580	114
0,0240	186	16 100	0,824	84
0,0365	234	12 400	1,000	56
0,0540	286	7 900	1,150	36
0,0765	317	6 000	—	—
0,1000	345	5 150	—	—
0,1350	360	3 520	—	—
0,1750	372	2 070	—	—
0,2200	380	1 240	—	—

Из таблицы видно, что для наибольших значений $\frac{di_a}{dt}$ и $\frac{di_b}{dt}$ отношение этих производных равно 200 и для наименьших 35.

Поэтому погрешность, обусловленная пренебрежением влиянием взаимоиндуктивности в цепи обмотки якоря при рассмотренных условиях восьмикратного тока якоря, не превышает 3%.

Выводы. 1. Изменение добавочной составляющей тока в обмотке возбуждения i_b весьма значительно. Следует учесть это явление для более полного изучения переходных процессов машин постоянного тока с посторонним возбуждением.

2. Рассмотренный метод позволяет без каких-либо специальных измерительных устройств, и не разбирая машины, экспериментально определить для разных нагрузок якоря конечную величину взаимоиндуктивности M . Этот метод может быть применен и для компаундных машин постоянного тока.

3. Также сравнительно легко определяется взаимоиндуктивность цепей машин постоянного тока по предложенному автором аналитическому методу.

4. Использование рассмотренных методов в случае необходимости более тщательного исследования переходных процессов поможет избежать погрешностей, которые связаны с пренебрежением влияния взаимоиндуктивности в машинах постоянного тока.

Литература

1. G. E. Frost. Характеристики короткого замыкания генераторов постоянного тока. Transactions AIEE, стр. 396, 1946.

2. T. M. Linville. Ток и крутящий момент в машинах постоянного тока при коротком замыкании. Transactions AIEE, стр. 956, 1946.

3. H. Hess. Токи короткого замыкания и защита крупных генераторов постоянного тока. A.f.E., стр. 468, № 7, 1933.

4. Л. М. Шильдинер. Экспериментальное исследование размагничивающего действия реакции якоря. Электричество, стр. 54, № 6, 1949.

5. Л. М. Шильдинер. Аналитический метод учета размагничивающего действия поперечной реакции якоря при больших нагрузках. Электричество, стр. 46, № 10, 1949.

Электrokeramika и свойства ионных кристаллов

Доктор техн. наук Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ, кандидат техн. наук И. Д. ФРИДБЕРГ

Ленинград

Керамическая технология приобрела исключительное значение для изделий из самых различных материалов, диэлектриков, полупроводников и металлов. Порошковая металлургия, с одной стороны, и электrokeramika — с другой — стали новыми важными отраслями промышленности, основанными на процессах спекания. В частности, электrokeramika получила широкое применение в современной радиотехнической и измерительной аппаратуре, а также в вакуумных приборах. Вновь созданные за последние годы керамические материалы по своему составу очень далеки от состава фарфора, содержащего глинистое вещество, кварц и полевой шпат. Электrokeramika представляет собой в основном чистые поликристаллические образования, являющиеся либо окислами металлов — Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , La_2O_3 , BeO , либо соединениями окислов, как, например, муллит ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), форстерит ($2MgO \cdot SiO_2$), перовскит ($CaO \cdot TiO_2$). Основные свойства этих новых керамических материалов зависят от свойств главной кристаллической фазы, а добавки посторонних веществ обусловлены обычно соображениями об удобствах технологии или служат для нейтрализации вредных примесей, например щелочных окислов.

Исходя из электрических свойств, целесообразно разделять электrokeramiku на группу материалов с линейной зависимостью поляризации от приложенного напряжения, куда входит большинство известных керамических материалов, и группу материалов с нелинейной зависимостью поляризации от напряжения, свойственной, например, титанату бария [Л. 1]. Ниже рассматриваются свойства только первой группы материалов, получивших практическое значение для изготовления изоляторов и высокочастотных конденсаторов.

Зависимость электрических свойств керамики от структуры и химического состава устанавливается прежде всего на основании значений диэлектрической проницаемости ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ материала. Удельное объемное сопротивление достаточно определенно характеризует качество керамики лишь при высоких температурах, а электрическая прочность зависит в первую очередь от макроскопических дефектов — степени плотности черепка, отсутствия в нем закрытых пор.

В керамическом черепке наряду с кристаллической фазой содержится аморфная прослойка в количестве от 5...10% до 60...70% в зависимости от вида керамики. Диэлектрические потери этой аморфной прослойки чаще всего связаны со структурной поляризацией хаотически расположенных слабо закрепленных ионов. Таким обра-

Дана классификация электrokeramiki на основании особенностей электрических свойств кристаллической фазы. Показано, что электрические свойства электrokeramiki должны рассматриваться в связи со свойствами поликристаллов-диэлектриков и поликристаллов электронных полупроводников. Приведены характеристики высококачественных керамических деталей и материалов, полученных на основе новых кристаллообразований.

зом, диэлектрические потери керамического черепка при разных соотношениях кристаллической и аморфной фаз имеют различный механизм накопления и в чисто кристаллическом веществе

дуют различать не один, а несколько принципиально отличающихся между собой механизмов диэлектрических потерь:

1. Структурные потери, обусловленные неупорядоченной упаковкой ионов в кристаллической решетке, когда имеются уровни энергии иона, отличающиеся его фиксированное положение. Эти потери в известной мере аналогичны структурным, свойственным аморфному веществу [Л. 2].

2. Потери, обусловленные природой ионного кристалла как электронного полупроводника [Л. 3].

3. Потери сквозной электропроводности [Л. 4].

Как известно, потери сквозной электропроводности могут быть выявлены очень просто на основании соотношения

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{12} \gamma}{\epsilon f},$$

где γ — электропроводность при постоянном напряжении.

Структурные потери возможно отличить от потерь за счет электронных полупроводников тем измерением электрических характеристик образцов после обжига их в резко различных средах, например, в атмосфере кислорода и атмосфере водорода или окиси углерода, а также, исследуя воздействия примесей, являющихся металлическими окислами.

Исследование свойств кристаллической фазы керамического черепка требует исключительного влияния аморфной фазы. Общеизвестно, что ионы щелочных металлов в составе неорганического стекла особенно неблагоприятно сказываются на величине диэлектрических потерь.

Сопоставление составов радиофарфора и ультрафарфора показывает, что в первом щелочных окислов до 0,6%, тогда как во втором до 1%. Между тем, диэлектрические потери радиофарфора, как известно, не меньше, а больше, чем ультрафарфора.

Минералогический состав этих материалов различен: радиофарфор характеризуется наличием муллита в качестве основной кристаллической фазы, тогда как ультрафарфор содержит α -глинозем (корунд). Любопытно, что радиофарфор, изготовленный не на минеральном сырье, а на чистых окислах, с содержанием щелочных окислов менее 0,2%, отличается $\operatorname{tg} \delta$ не меньшим, чем минеральный радиофарфор. На рис. 1 показаны температурные зависимости $\operatorname{tg} \delta$ исследованных материалов. На том же рис. 1 сопостав-

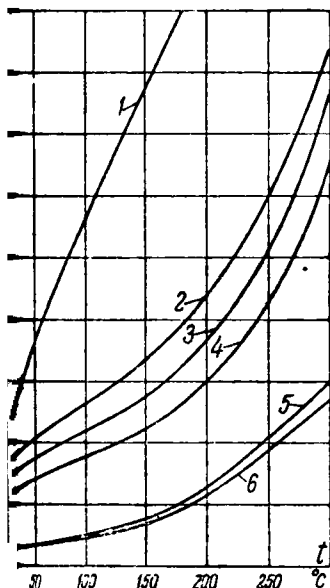


Рис. 1. Температурная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ радиофарфора, ультрафарфора, каолина и часовьярской глины; $f=1 \cdot 10^6$ гц.

1—часовьярская глина; 2—глуховецкий каолин; 3—радиофарфор на чистых окислах; 4—радиофарфор на техническом сырье; 5—ультрафарфор на чистых окислах; 6—ультрафарфор на техническом сырье.

электрические потери спеченных образцов часовьярской глины (с содержанием щелочных слов 2,5—3%) и образцов каолина (с содержанием щелочных окислов менее 0,2%).

Все эти данные убедительно показывают, что электрические потери керамики в отличие от юл нельзя предопределять по количественно-содержанию щелочных окислов, если этих слов меньше 1,5—2%.

Можно сделать вывод, что на величину $\operatorname{tg} \delta$ амических материалов в этом случае большее яние имеет кристаллоидная фаза, чем стек-идная.

Это положение было нами проверено посред-изучения электрических свойств чистых сталлообразований, в частности муллита, об-ющего, как указывалось выше, основу ра-фарфора, а также глины и каолина в спечен-состоянии. Температурная зависимость електрических потерь чистого муллита приве-на рис. 2.

ысокое начальное значение $\operatorname{tg} \delta$ и резкое воз-ание его с температурой объясняют неблаго-пные характеристики спеченного каолина, кже повышенное значение $\operatorname{tg} \delta$ радиофарфора. енения газовой среды при тепловой обра-е муллита и примеси в исходных материалах азываются на его электрических характери-ях. Также следует отметить прекрасную вос-зводимость величины $\operatorname{tg} \delta$ и объемного со-звещения технических видов керамики на е муллита в разных партиях образцов, по-ных из различных партий сырьевых мате-ов и обожженных при разных тепловых мах. Таким образом, муллит необходимо ти к кристаллам со структурными по-ми.

ругим кристаллообразованием с резко выра-ными структурными потерями является кор-нт $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$.

емпературная зависимость диэлектрических рь синтезированного на чистых окислах кор-пта представлена на том же рис. 2.

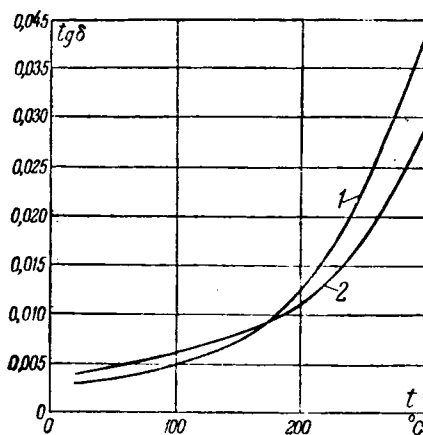


Рис. 2. Температурная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ муллита и кордиерита при $f=1 \cdot 10^6$ гц.

1—муллит; 2—кордиерит.

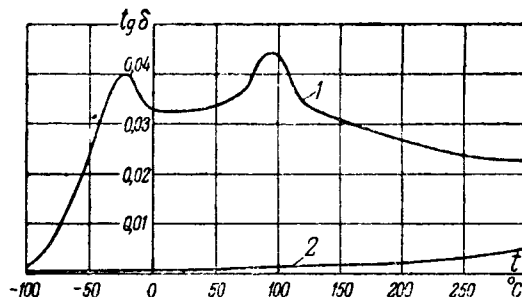


Рис. 3. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для образцов алюминоксида, обожженных в различных газовых средах; $f=1 \cdot 10^6$ гц.

1—обжиг в окислительной среде; 2—обжиг в восстановительной среде.

Совершенно иную группу кристаллов пред-ставляют поликристаллические рутил или корунд [Л. 5]. Еще в старых работах (1937 г.) нами было показано, что керамика на основе корунда (алюминоксид) с высоким содержанием кристаллической фазы не давала устойчивых значений угла диэлектрических потерь. Причина этого явления тогда была недостаточно ясна. Угол ди-электрических потерь изменялся в зависимости от партии образцов от долей минуты до граду-сов. На рис. 3 и 4 приведены температурные зависимости поликристаллических α -глинозема и рутила в зависимости от газовой среды при обжиге; образцы представляли собой диски диа-метром 20..40 мм и толщиной 1...2 мм, получен-

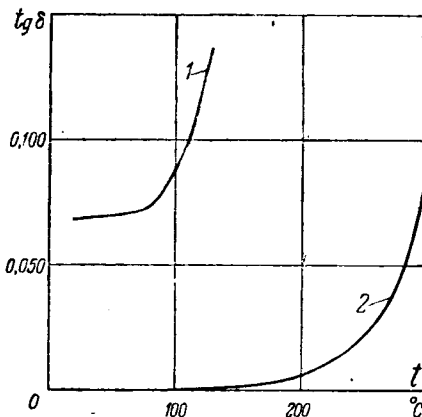


Рис. 4. Темпера-турная зависи-мость $\operatorname{tg} \delta$ поли-кристаллического рутила при разных газовых средах об-жига; $f=1 \cdot 10^6$ гц.

1—обжиг в окислительной среде; 2—обжиг в нейтральной среде.

ные путем спекания порошков Al_2O_3 и TiO_2 технической чистоты с примесями до 1,5% при температурах соответственно 1650...1750° и 1450...1500° С.

Из графиков рис. 3 и 4 следует, что обжиг данной группы керамики следует рассматривать как сложный физико-химический процесс, в котором не только температура, но и реакции с окружающей газовой средой имеют первостепенное значение.

Электрические свойства глиноземистой керамики снижаются лишь при воздействии окислительной газовой среды в процессе обжига и, в отличие от титаносодержащей, оказываются особенно высокими при условии обжига в резко восстановительной газовой среде. Надо полагать, что в опытах Хартмана [Л. 3], определившего Al_2O_3 как полупроводник восстановления, результат был искажен какими-то вторичными явлениями. Что касается отрицательного влияния на электрические свойства TiO_2 восстановительной газовой среды, то здесь не вызывает сомнения переход титана в другие валентности с образованием закисных форм, например, Ti_3O_5 и др.

Можно предполагать, что аномальные электрические потерь технических диэлектриков на основе корунда и рутила объясняются их природой электронных полупроводников. Особенностью этих диэлектриков является высокое объемное сопротивление, значительно большее, чем у обычных полупроводников. Фактором, благоприятно сказывающимся на величине объемного сопротивления керамики, является наличие в черепке хотя бы незначительного количества стекла, разделяющего отдельные кристаллики. Аномальные электрические свойства керамических материалов, относящихся к группе электронных полупроводников, тем слабее выражены, чем в большем количестве в них содержится аморфная прослойка и чем активнее эта аморфная прослойка захватывает в свою решетку неблагоприятные примеси. Указанная закономерность находит, конечно, техническое использование.

В случае обжига образцов из корундовой керамики в восстановительной среде аморфная фаза образуется легче в связи с тем, что, например, закисное железо, как известно, является плавнем. Наоборот, если рассматриваемые окислы подвергаются обжигу в виде порошков, а не заготовок изделий, то наблюдаются особенно низкие электрические свойства при неблагоприятной газовой среде в процессе обжига, так как содержание аморфной фазы в порошке очень невелико; табл. 1, в которой приведены электрические свойства порошка глинозема, обожженного в окислительной среде, иллюстрирует сказанное.

Таблица 1

Температура, °С	Удельное объемное сопротивление, ом·см	Тангенс угла диэлектрических потерь при $f=1 \cdot 10^6$ гц
100	$3 \cdot 10^{10}$	0,0270
200	$2 \cdot 10^9$	0,0180
300	$2 \cdot 10^8$	0,0400

Отдельную группу минералообразователей представляют собой периклаз MgO , благородный шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$, форстерит $2MgO \cdot SiO_2$, клиноэнстатит $MgO \cdot SiO_2$, которые, как показывает опыт, характеризуются очень высокими электрическими свойствами, независимо от режимов обжига и партий сырья. Повидимому, такого рода материалы относятся к классу кристаллов истинных диэлектриков, к которым принадлежат и щелочно-галлоидные кристаллы. Лишь объяснительное наличие аморфной прослойки в некоторых видах керамики данной группы обуславливает разницу между фактически наблюдаемыми диэлектрическими потерями и потерями, рассчитанными по данным о сквозной электрической проводности.

Резюмируя изложенные выше положения можно классифицировать ряд известных минералообразований, могущих быть использованными в керамической технологии так, как это представлено в табл. 2.

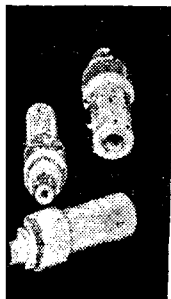
Развитые здесь взгляды направляют практическую работу по изысканию керамических материалов, отличающихся самыми разносторонними свойствами, например, исключительно высокой механической прочностью или высокой нагревостойкостью, или очень высокими электрическими показателями.

Соображения о механической прочности требуют наличия в керамическом материале большого количества кристаллической фазы и незначительного количества стекловидной фазы. Подтверждением этих соображений явился полученный в самое последнее время керамический материал, отличающийся временным сопротивлением изгиба до 6000 кг/см^2 (при цилиндрической форме образцов), величиной $\text{tg} \delta$ до 0,0004 и диэлектрической проницаемостью 8...8,5. Механическая прочность этого нового керамического материала в 5...7 раз превосходит прочность изоляторов фарфора и имеет порядок прочности конструкционных сталей.

Обязательным условием для широкого технического освоения электрокерамики, как показывает опыт, является простота технологии — температура обжига не выше 1380...1400° С; жесткая пластичность массы и достаточно широкий температурный интервал спекания. Этим требованиям вполне отвечает упомянутый выше материал керамики в отличие от известного ранее керамического материала с огромной механической прочностью — алюминоксида.

В настоящее время представляется возможным решить задачу обеспечения автo- и авиоинженерии высококачественными изоляторами для запальных свечей, применяя для этой цели вновь разработанную керамику. На рис. 5 показаны изоляторы для автосвечей, выполненные из этой керамики. Механическая прочность этих изоляторов при испытании на типовом маяковом копре соответствует углу отклонения маяка 140...180°.

Новые виды установочной керамики весьма эффективно используются для изготовления высоковольтных высокочастотных изоляторов



5. Изоляторы для свечей зажигания двигателя внутреннего сгорания, выполненные из нового вида механически прочной керамики.

требуются значительная механическая прочность, малые диэлектрические потери, а также нагревостойкость (в связи с горячей пайкой). На рис. 6 показан ряд конструкций изоляторов на рабочее напряжение $U_{эф}$ до 30 кВ при частотах до 10 мГц.

Исключительно высокие показатели керамики были обнаружены при использовании в качестве основы шпинели, форстерита, периклаза и перовскита. Конечно, важнейшее значение для получения технических материалов имеет правильный выбор минерализаторов — незначительных добавок определенных веществ, которые не образуют химических соединений ни с исходными материалами, ни с конечными продуктами реакции, но снижают температуру реакции.

На рис. 7 показан боеночный конденсатор керамики на основе перовскита реактивной мощностью 50 кВА при рабочем напряжении $U = 10...12$ кВ сравнительно со слюдяным та же реактивной мощности и на такое же напряжение высокой частоты. Преимущества боеночных конденсаторов можно оценить сопоставлении их с ранее освоенными в производстве конденсаторами из тиконда, реактивная мощность которых при тех же габаритах не исходит 5...6 кВАр.

Отличаясь исключительно высокой удельной реактивной мощностью, высокой удельной емкостью и простой технологией, боеночные конденсаторы имеют ограниченную емкость в изделии, превышающую 100 пФ. Это вызывает необхо-

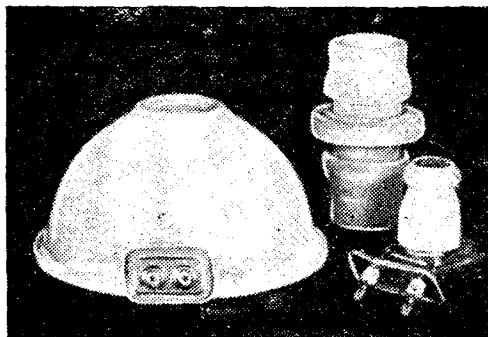


Рис. 6. Образцы высоковольтных высокочастотных изоляторов, выполненные из механически прочной, теплостойкой электрокерамики.



Рис. 7. Новый тип (справа) высоковольтного боеночного конденсатора, равноценного по реактивной мощности слюдяному конденсатору.

Таблица 2

Наименование кристаллической фазы керамики	Название минерала (поликристалла)	Химический состав	Кристаллическая система при 20°C	Электрические свойства технических видов керамики при $t = 20^\circ\text{C}$		
				$\text{tg } \delta$ при радиочастотах	удельное объемное сопротивление, Ом·см	
Поликристаллы-диэлектрики	а) Структурной поляризации нет	Периклаз Шпинель Форстерит Клиноэстатит	MgO $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	Кубическая Ромбическая Моноклинная	$< 0,0003$ $< 0,0003$ $< 0,0003$ $< 0,0003$	$> 10^{18}$ $> 10^{18}$ $> 10^{18}$ $> 10^{18}$
	б) Структурная поляризация резко выражена	Муллит Кордиерит	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$	Ромбическая	0,0020 0,0040	$10^{13} \dots 10^{14}$ $10^{15} \dots 10^{16}$
Поликристаллы-электронные полупроводники	Корунд Рутил	Al_2O_3 TiO_2	Гексагональная Тетрагональная	В зависимости от газовой среды и примесей 0,0002... 0,0200	$10^{10} \dots 10^{18}$ $10^7 \dots 10^{15}$	
Поликристаллы-сегнетоэлектрики	Типа перовскит	BaTiO_3 (точка Кюри при $T \approx 390^\circ\text{K}$)	Тетрагональная	0,0160	$10^{13} \dots 10^{14}$	

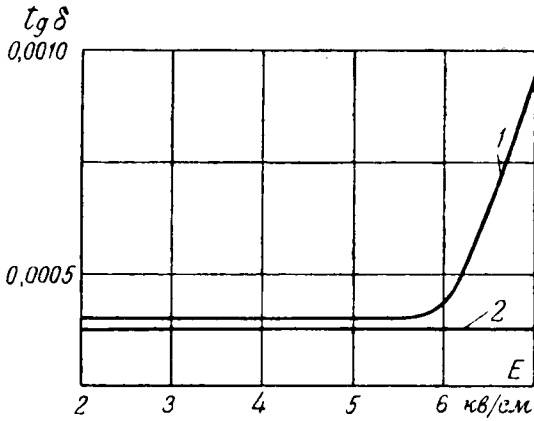


Рис. 8. Зависимость $\text{tg } \delta$ керамических конденсаторов от напряженности поля при разных методах изготовления; $f = 1 \cdot 10^6$ гц (по данным ЛЭТИ им. Ульянова-Ленина).

1 — заметная закрытая пористость; 2 — плотная структура.

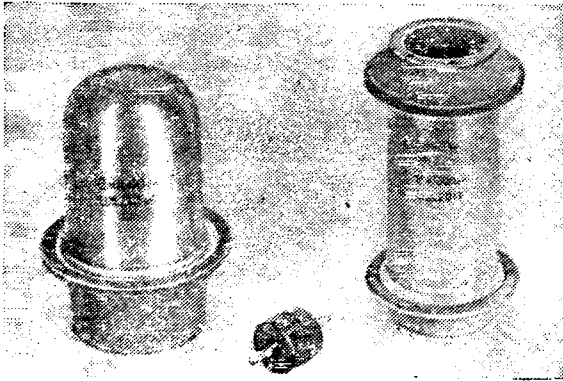


Рис. 9. Новые типы высоковольтных керамических конденсаторов с повышенной электрической прочностью — горшковый и цилиндрический емкостью по 1 000 пф и боченочный (в середине), опрессованный в пластмассу, емкостью 500 пф и $U_{исп} = 15$ кв.

димостью в ряде случаев включать параллельно большое число отдельных элементов. Конденсаторы на большие емкости в единице выполняются горшкового или цилиндрического типов. Однако при обычной технологии изготовления таких изделий путем формовки, протяжки в материале наблюдается заметно выраженная закрытая пористость, обуславливающая низкую электрическую прочность, в особенности при высоких частотах. Так, например, пробивная напряженность на радиочастоте тиконда при изготовлении конденсаторов указанными методами составляет всего лишь 4—5 кВ/мм. С другой стороны, конденсатор из материала с резко выраженной закрытой пористостью ограничен по допустимой реактивной мощности при длинных волнах вследствие ионизации газа в порах, обуславливающей возрастание $\text{tg } \delta$ конденсатора,

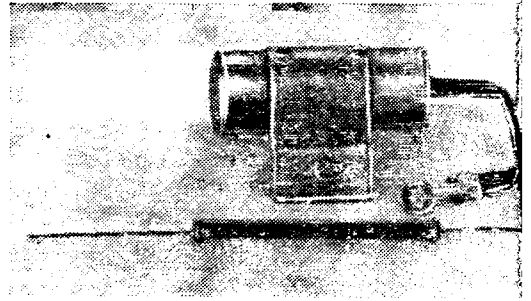


Рис. 10. Трубочатый керамический конденсатор емкостью 80 000 пф (внизу), заменяющий искрогасительный бумажный конденсатор.

начиная с некоторой напряженности поля рис. 8 показана зависимость $\text{tg } \delta$ от напряженности поля керамических конденсаторов, изготовленных двумя разными методами. Как видно из рис. 8, в случае плотной структуры материала $\text{tg } \delta$ не зависит от напряженности поля вплоть до 8—10 кВ/см, и соответственно реактивная мощность этого конденсатора превышает в 4 раза реактивную мощность конденсатора, закрытого порами. На рис. 9 показаны горшковый и цилиндрический конденсаторы, изготовленные по новейшей технологии, обеспечивающей высокую плотность материала.

В последнее время керамические конденсаторы приобретают все более широкое промышленное применение не только для цепей высокой частоты, но и для цепей низкой частоты, повышенного напряжения и для импульсных цепей, заменяющих бумажные конденсаторы. Значительная диэлектрическая проницаемость современных конденсаторных керамических материалов — в пределах от 150 до 7 500, что позволяет изготовление миниатюрных конденсаторов. На рис. 10 показан трубочатый керамический конденсатор емкостью 80 000 пф, рассчитанный на рабочее напряжение 250 в и предназначенный для замены искрогасительного бумажного конденсатора.

Таким образом, керамические материалы на основе новых кристаллообразований обеспечивают самые разнообразные требования электротехники.

Литература

1. Б. М. Вул. Вещества с высокой и сверхвысокой диэлектрической проницаемостью. Электричество, 1946.
2. Г. И. Сканиви и А. И. Демешина. Вид диэлектрической поляризации и потеря в диэлектрических диэлектриках. ЖЭТФ, № 1, 1949.
3. Ф. Ф. Волькенштейн. Электропроводящие полупроводников. Гостехиздат, 1947.
4. Н. П. Богородицкий и В. Н. Мамонтов. Диэлектрические потери в кристаллах. ЖТФ, т. IV, 1938.
5. Н. П. Богородицкий и Л. И. Кадинов. Изолурующий материал для техники высокой частот. ИЭСТ, № 3, 1937.



К теории многофазных умножителей частоты

Кандидат техн. наук Л. Л. РОЖАНСКИЙ

Харьковский политехнический институт и.м. Ленина

Многофазные умножители частоты осуществляются в виде группы m насыщенных однофазных трансформаторов, заземленных от m -фазной системы напряжения, первичные обмотки которых соединены в звезду, а вторичные — в разомкнутый многоугольник. На концы многоугольника возникает напряжение m -кратной частоты по отношению к основной (рис. 1). Такие умножители частоты работают без возбуждения стали постоянным током и позволяют повышать частоту в нечетное число раз.

Графические методы их расчета были предложены Штейном [Л.1,4]. Однако, теория Штейна приводит к сложным уравнениям, которые должны решаться графически. Решение дано лишь в частном случае умножения частоты втрое. Помимо практической сложности такой метод исследования неудобен тем, что позволяет разделить характеристики уже сконструированных умножителей, но не дает основания для выбора параметров умножителя по заданным условиям работы.

Ниже излагается разработанный нами метод аналитического расчета многофазных умножителей частоты, пригодный для любой кратности умножения и любой нагрузки. Этот метод может быть упрощен для практических расчетов. В упрощенном виде он позволяет получить необходимые соотношения для рационального проектирования умножителей, в том числе и удвоителей частоты, по заданным параметрам нагрузки [3,6].

В основу метода положено выражение кривой намагничивания уравнением гиперболического синуса.

$$H = a \operatorname{sh} \beta B. \quad (1)$$

Коэффициенты a и β могут быть определены по кривой намагничивания, снятой на постоянном токе, или по кривой холостого хода данного трансформатора. В последнем случае коэффициенты определяются методом, изложенным в [2].

Излагается аналитический метод расчета многофазных умножителей частоты при различной кратности умножения; кривая намагничивания выражается уравнением гиперболического синуса. Предложенная методика позволяет с достаточной точностью рассчитать внешнюю характеристику умножителя для различных видов нагрузки и определить эффективное значение первичного тока. Приводятся результаты расчета для утроителя частоты и для умножителя частоты в пять раз.

Составим уравнения магнитного равновесия для каждого из трансформаторов умножителя и сложим их¹. Вторичный ток считаем чисто синусоидальным. Зависимость между током и напряжением высокочастотной стороны будет иметь вид (приложение 1):

$$m\omega_m \sqrt{2} I_m = a l \left[\operatorname{sh} R_m \sum_{k=0}^{k=m-1} \operatorname{ch} \left(R_a \cos k \frac{2\pi}{m} \right) + \operatorname{ch} R_m \sum_{k=0}^{k=m-1} \operatorname{sh} \left(R_a \cos k \frac{2\pi}{m} \right) \right], \quad (2)$$

где $R_m = \beta B_m$, $R_a = \beta B_a$;
 l — длина средней силовой линии;
 B_a , B_m — максимальное значение индукции основной и m -й гармоники.

Уравнение позволяет по заданной индукции низкочастотной стороны, т. е. при известном R_a , определить ток высокочастотной стороны при любом напряжении U_m . Иначе говоря, оно позволяет построить „внешнюю“ характеристику умножителя.

Положив $R_m = 0$, получим уравнение для определения тока короткого замыкания I_{mk} :

$$m\omega_m \sqrt{2} I_{mk} = a l \sum_{k=0}^{k=m-1} \operatorname{sh} \left(R_a \cos k \frac{2\pi}{m} \right). \quad (3)$$

Положив $I_m = 0$, получим уравнение для определения напряжения холостого хода умножителя:

$$\operatorname{th} R_{m0} = - \frac{\sum_{k=0}^{k=m-1} \operatorname{sh} \left(R_a \cos k \frac{2\pi}{m} \right)}{\sum_{k=0}^{k=m-1} \operatorname{ch} \left(R_a \cos k \frac{2\pi}{m} \right)}, \quad (4)$$

¹ Активным сопротивлением обмоток трансформаторов, потоками рассеяния и потерями в стали пренебрежем.

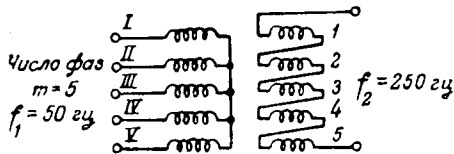


Рис. 1. Многофазный умножитель частоты ($m=5$).

Уравнения (2) и (4) справедливы, если амплитуды потоков низкочастотной Φ_a и высокочастотной стороны Φ_m совпадают по фазе или сдвинуты на 180° . Это имеет место при холостом ходе и чисто реактивной нагрузке умножителя, причем для $m=3, 7, 11$ и т. д. сдвиг равен 180° , а для $m=5, 9, 13$ и т. д. сдвиг равен нулю. При омической и смешанной нагрузке умножитель отдает, а, следовательно, и потребляет полезную мощность. Должна появиться составляющая первичного тока, которая будет в фазе с первичным напряжением. Между амплитудами потоков Φ_a и Φ_m возникает сдвиг фаз. Это отражено на рис. 2, на котором для момента времени, равного нулю, совмещены круговые диаграммы для величин, имеющих период $2\pi(\Phi_a, I_a)$, и величин с периодом $\frac{2\pi}{m}(\Phi_m, I_m, U_m)$. Рисунок относится к утрителю; для умножителя в пять раз Φ_a и I_a изменят направление на 180° . γ обозначает угол между Φ_m и Φ_{m0} .

Для омической и смешанной нагрузки получим уравнение умножителя в виде (приложение 2):

$$m\omega_m \sqrt{2} I_m \sin(\varphi + \gamma) = \alpha l \left[\operatorname{sh}(R_m \cos \gamma) \sum_{k=0}^{m-1} \operatorname{ch}\left(R_a \cos k \frac{2\pi}{m}\right) + \operatorname{ch}(R_m \cos \gamma) \sum_{k=0}^{m-1} \operatorname{sh}\left(R_a \cos k \frac{2\pi}{m}\right) \right]. \quad (5)$$

Предлагаемый метод расчета был применен к умножителю частоты в пять раз, собранному из пяти однофазных трансформаторов и экспериментально исследованному в лаборатории ХЭТИ. В приложении 3 приведено сравнение результатов расчета с опытом. Такое же сравнение произведено для утрителя, исследованного Н. Н. Рукавишниковым и Н. П. Ермолиным [Л. 1].

Упрощенный метод расчета. Умножитель частоты может рассматриваться как генератор с напряжением холостого хода U_{m0} , током короткого замыкания I_{mk} и внутренним сопротивлением

$$x_m = \frac{U_{m0}}{I_{mk}}. \quad (6)$$

Тогда для нагрузки R ток, например, будет:

$$I_m = \frac{U_{m0}}{\sqrt{R^2 + x_m^2}}.$$

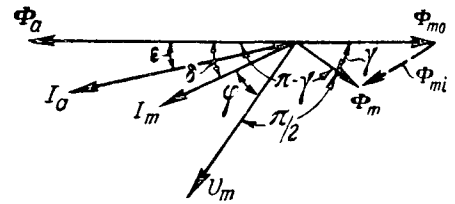


Рис. 2. Диаграмма умножителя для $t=0$.

Такое упрощение было предложено ранее авторами [Л. 3, 4, 5], которые определяли I_{mk} и I_{za} (рассматривались только утрители) с помощью гармонического анализа кривых намагничивания и напряжения холостого хода. Этот метод расчета не может считаться строго обоснованным, так как предполагает, что коэффициент пропорциональности между током нагрузки и созданным им потоком — величина постоянная, не зависящая от нагрузки. Однако он весьма прост и дает удовлетворительную точность. Считаем целесообразным для практических расчетов, особенно предварительных, применять этот упрощенный метод в несколько измененном виде, а именно — не прибегать к довольно громоздкому гармоническому анализу, а пользоваться для определения U_{m0} и I_{mk} выведенными выше уравнениями (3) и (4). В этом случае расчет делается крайне простым для любой кратности умножения. На рис. 5 и 9 показаны результаты расчета упрощенным аналитическим методом, позволяющие рекомендовать его применение с использованием уравнений (3) и (4). Отметим здесь еще одно обстоятельство, говорящее в пользу упрощенного метода: расчетная индукция B_a вследствие пренебрежения рассеянием и других принятых приближений оказывается выше фактической. Для введения поправки называется необходимым [Л. 7] снизить на несколько процентов (5—6) расчетную индукцию. Это явление значительно больше сказывается на результате расчета, чем допущения упрощенного метода, и вряд ли целесообразно применять довольно трудоемкий расчет внешней характеристики [Л. 7] после принятия за основу расчета предельно сниженной величины индукции основной гармоники.

Ток низкочастотной стороны. Ток низкочастотной стороны достигает наибольшего значения при коротком замыкании вторичной стороны умножителя. Эта величина часто представляет вместе с тем и наибольший интерес, так как важно знать, каким током будет нагружен источник питания умножителя.

При коротком замыкании вторичной стороны поток в стали умножителя будет синусоидальным. Эффективное значение намагничивающего тока I_o может быть определено в этом случае как [Л. 2]:

$$I_o = \frac{\alpha l}{\sqrt{2} \omega_a} \sqrt{J_o(2R_a) - 1},$$

$J_0(2R_a)$ — функция Бесселя нулевого порядка мнимого аргумента.

Так как m -я гармоника тока протекает в короткозамкнутой обмотке умножителя, то в первичной обмотке ток будет:

$$I_{ak} = \sqrt{I_o^2 - I_{mk_n}^2}, \quad (8)$$

I_{mk_n} — ток короткого замыкания m -й гармоники, приведенный к первичной обмотке и равный:

$$I_{mk_n} = I_{mk} \frac{\omega_m}{\omega_a}. \quad (9)$$

определения первичного тока при нагрузке умножителя или при холостом ходе, когда существует m -я гармоника потока, воспользуемся уравнением для эффективной напряженности:

$$\frac{H_{эфф}}{a} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \text{sh}^2 \beta B d(\omega t)}. \quad (10)$$

нагрузке умножителя

$$\frac{H}{a} = \text{sh} \beta [B_a \cos \omega t + B_m \cos (m\omega t + \gamma)]. \quad (11)$$

ставив в (10) значение B из (11), представив тригонометрические функции в виде рядов Фурье, коэффициентами которого будут функции Бесселя от мнимого аргумента [Л. 7] и произведя интегрирование, приходим к выражению:

$$\frac{H_{эфф}}{a} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[J_0(2R_a)J_0(2R_m) + 2 \sum_{n=0}^{n=\infty} (-1)^n J_{mn}(2R_a)J_n(2R_m) \cos n\gamma] - 1}, \quad (12)$$

где n — параметр суммирования; m — кратность умножения частоты;

$$R_a = \beta B_a \text{ и } R_m = \beta B_m.$$

При холостом ходе ($\gamma=0$)

$$\frac{H_{эфф}}{a} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{[J_0(2R_a)J_0(2R_m) + 2 \sum_{n=0}^{n=\infty} (-1)^n J_{mn}(2R_a)J_n(2R_m)] - 1}. \quad (13)$$

и коротком замыкании вторичной стороны ($J_0(2R_m)=1$) уравнение (12) или (13) сводит в (7).

уравнению (12) определяется при любой нагрузке $H_{эфф}$, причем значения γ берутся из уравнения (18), а затем соответствующий первичный ток I_o' . Для получения значения тока первичной стороны умножителя надо по уравнению (8) вычесть приведенный ток m -й гармоники, протекающий во вторичной обмотке умножителя,

$$I_a = \sqrt{I_o'^2 - I_{m_n}^2}. \quad (14)$$

Вложение I. Воспользовавшись уравнением (1), из уравнения магнитного равновесия для первого трансформатора умножителя

$$i_a \omega_a + i_m \omega_m = a l \text{sh} \beta (b_a + b_m), \quad (15)$$

где i_a — мгновенное значение тока низкочастотной стороны, равное сумме мгновенных значений всех гармоник тока, кроме m -й и кратных m ; i_m — мгновенное значение тока высокочастотной стороны; ω_a, ω_m — числа витков обмоток одного трансформатора первичной и вторичной стороны соответственно; b_a — мгновенное значение основной гармоники индукции; b_m — мгновенное значение m -й гармоники индукции (гармониками $3m, 5m$ и т. д. пренебрегаем).

Введем

$$b_a = B_a \cos \omega t$$

и

$$b_m = B_m \cos m\omega t$$

и обозначив

$$\beta B_a = R_a \text{ и } \beta B_m = R_m, \quad (16)$$

получим для первого трансформатора

$$\sqrt{2} I_a \omega_a \cos \omega t + \sqrt{2} I_m \omega_m \cos m\omega t = a l \text{sh} (R_a \cos \omega t + R_m \cos m\omega t).$$

Для второго трансформатора

$$\sqrt{2} I_a \omega_a \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{m} \right) + \sqrt{2} I_m \omega_m \cos m\omega t = a l \text{sh} \left[R_a \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{m} \right) + R_m \cos m\omega t \right] \text{ и т. д.}$$

Полученные таким образом m уравнений просуммируем. Сумма первых членов левых частей даст нуль. Просуммировав и положив $t=0$, получим уравнение (2).

Приложение II. Как видно из рис. 2, начальный угол δ (при $t=0$) между током I_m и направлением потока Φ_a может быть выражен, как $\pi - \gamma - \frac{\pi}{2} - \varphi$, где φ — угол сдвига фаз между напряжением и током высокочастотной стороны, определяемый нагрузкой. Начальный

угол для тока I_a выбран произвольно и обозначен на рис. 2 через ϵ . Тогда уравнения магнитного равновесия при смешанной нагрузке примут вид:

$$\begin{aligned} & \sqrt{2} I_a \omega_a \cos (\omega t + \epsilon) + \sqrt{2} I_m \omega_m \cos \left(m\omega t - \gamma + \frac{\pi}{2} - \varphi \right) = \\ & = a l \text{sh} [R_a \cos \omega t + R_m \cos (m\omega t - \gamma)]; \\ & \sqrt{2} I_a \omega_a \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{m} + \epsilon \right) + \\ & + \sqrt{2} I_m \omega_m \cos \left(m\omega t - \gamma + \frac{\pi}{2} - \varphi \right) = \\ & = a l \text{sh} \left[R_a \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{m} \right) + R_m \cos (m\omega t - \gamma) \right] \text{ и т. д.} \end{aligned} \quad (17)$$

Просуммируем левые и правые части полученных таким образом m уравнений. При суммировании первые члены левых частей дадут нуль независимо от численного значения угла ϵ .

Просуммировав и положив $t=0$, получим уравнение (5). При $\gamma=0$ и, следовательно, $\varphi = \frac{\pi}{2}$ уравнение (5) переходит в (2). Для решения уравнения (5) надо знать для любой нагрузки углы φ и γ . Угол φ определяется, как $\text{arctg} \frac{x}{R}$, где x и R — реактивное и активное сопротивление нагрузки. Значение угла γ зависит от φ и от абсолютного значения полного сопротивления нагрузки. Оно определяется из рис. 2, на котором поток Φ_m представлен, как геометрическая сумма потока холостого хода m -й гармоники Φ_{m0} [определяется по уравнению (4)] и потока Φ_{mi} , созданного током нагрузки I_m . Поток Φ_{mi} направлен по I_m в силу принятых нами приближений (пренебрежение потерями в стали). Диаграмма соответствует определенному значению нагрузки, другому ее значению будут соответствовать другие значения Φ_m и γ и иной коэффициент пропорциональности между I_m и Φ_{mi} . Из рис. 2 по теореме синусов

$$\frac{\Phi_m}{\sin(90-\varphi-\gamma)} = \frac{\Phi_{m0}}{\sin(90+\varphi)}$$

Откуда

$$\cos(\gamma + \varphi) = \cos \varphi \frac{U_m}{U_{m0}}, \quad (18)$$

а при $\varphi = 0$ (омическая нагрузка)

$$\cos \gamma = \frac{U_m}{U_{m0}}. \quad (19)$$

Таким образом, задаваясь различными значениями для U_m , определяем γ по (18) или (19). Угол φ должен быть задан, а U_{m0} находится по (4). Затем для данного U_m определяем R_m и, подставляя в уравнение (5) значения R_m и γ , находим соответствующий данному U_m ток I_m .

Надо иметь в виду, что метод расчета является общим для любой кратности умножения, поэтому при любом m следует при R_{m0} брать знак минус, как требует уравнение (4), а угол γ всегда будет меньше 90° при нагрузке и равен нулю при холостом ходе. Угол φ имеет знак плюс при индуктивной нагрузке.

Приложение III. Пример расчета. Умножитель частоты в пять раз был собран по схеме (рис. 3), позволяющей совместить преобразование фаз с умножением частоты, т. е. обойтись без дополнительных устройств для преобразования трехфазного тока в пятифазный [Л. 3]. В таблице приведены необходимые соотношения между числами витков отдельных обмоток, на рис. 4 дана потенциальная диаграмма умножителя.

Номер трансформатора	1	2 5	3 4
Относительные числа витков обмоток a (рис.3)	1	0,858	0,678
Обмоток b	0	0,24	0,47

Для определения напряжения низкочастотной стороны U_a , по которому находится R_a , на рис. 4 представлены составляющие фазного напряжения фазы 1 с учетом сдвига в 72° между фазами пятифазной системы и того обстоятельства, что витки обмоток b трансформаторов 3 и 4 включены противоположно виткам обмотки a трансформатора 1. Цифры 1 и 0,47 (таблица) указывают относительные числа витков обмоток.

Из рис. 4 получим:

$$2 \cdot 0,47 U_a \cos 36^\circ + U_a = \frac{U_a}{\sqrt{3}},$$

откуда $U_a = 0,328 U_A$.

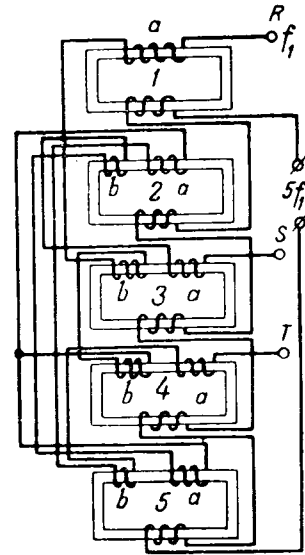


Рис. 3. Схема умножителя частоты в пять раз.

Как видим, U_a составляет лишь часть фазного напряжения $\frac{U_A}{\sqrt{3}}$ трехфазной системы.

Для каждого из трансформаторов, входящих в число витков вторичной обмотки w_m составляет сечение сердечников $12,25 \text{ см}^2$, длина средней линии 40 см . Число витков обмотки a первого трансформатора w_a , принятое за единицу, было равно 150, число витков остальных трансформаторов определяется в таблице. Линейное напряжение поддерживалось равным 250 в , следовательно, U_a составляло $82,5 \text{ в}$. Умножитель частоты исследовался при индуктивной, емкостной, активной и смешанной (R и C соединены параллельно) нагрузках.

Уравнение кривой намагничивания стали трансформаторов имело вид [Л. 3]:

$$H = 0,0675 \text{ sh} \frac{B}{2 \cdot 120}.$$

Определяем амплитуду индукции основной частоты

$$B_a = \frac{0,328 U_A \sqrt{2} \cdot 10^8}{\omega_a w S} = \frac{0,328 \cdot 250 \cdot 1,41 \cdot 10^8}{314 \cdot 150 \cdot 12,25} = 20 \cdot 10^4$$

Находим $R_a = \beta B_a = 9,55$.

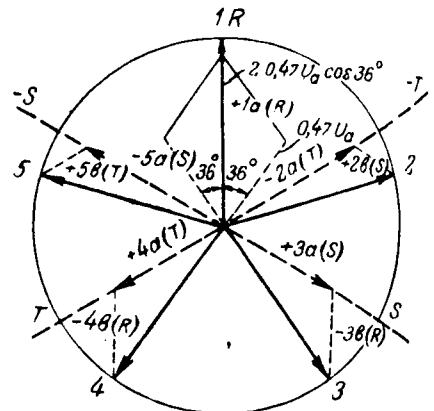


Рис. 4. Потенциальная диаграмма умножителя частоты.

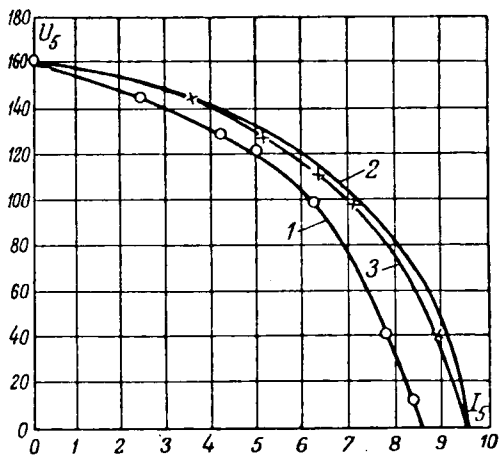


Рис. 5. Внешняя характеристика умножителя ($m=5$) при омической нагрузке. 1—опытная кривая; 2—расчет по аналитическому методу; 3—по упрощенному.

Определяем R_{50} по формуле (4). Так как $m=5$

$$\frac{\pi}{m} = 72^\circ;$$

$$\sum_{k=0}^{m-1} \operatorname{sh} \left(R_a \cos k \frac{2\pi}{m} \right) = \operatorname{sh} R_a + 2 \operatorname{sh} (R_a \cos 72^\circ) - 2 \operatorname{sh} (R_a \cos 36^\circ) = 7\,030 + 2 \cdot 9,6 - 2 \cdot 1135 \approx 4\,780;$$

$$\sum_{k=0}^{m-1} \operatorname{ch} \left(R_a \cos k \frac{2\pi}{m} \right) = \operatorname{ch} R_a + 2 \operatorname{ch} (R_a \cos 72^\circ) + 2 \operatorname{ch} (R_a \cos 36^\circ) = 7\,030 + 2 \cdot 9,6 + 2 \cdot 1\,135 \approx 9\,320;$$

$$\operatorname{th} R_{50} = -\frac{4\,780}{9\,320} = -0,514; R_{50} = -0,57;$$

$$B_{50} = \frac{R_{50}}{\beta} = 1\,208 \text{ зс};$$

$$U_{50} = \frac{\xi \omega_5 \omega_5 S B_{50}}{\sqrt{2} \cdot 10^8} = 159 \text{ в.}$$

Находим I_{5k} по формуле (3):

$$I_{5k} = \frac{0,0675 \cdot 40 \cdot 4\,780}{5 \cdot 192 \cdot 1,41} = 9,53 \text{ а.}$$

По данным опыта (рис. 5) $U_{50} = 160 \text{ в}$, $I_{5k} = 8,7 \text{ а}$. Строим внешнюю характеристику умножителя при активной нагрузке. Например, для $U_5 = 120 \text{ в}$ получим:

$$B_5 = 916 \text{ зс}; R_5 = \beta B_5 = -0,432; \cos \gamma = \frac{U_5}{U_{50}} = \frac{120}{159} = 0,756;$$

$$\sin \gamma = 0,656; R_5 \cos \gamma = -0,327; \operatorname{sh}(-0,327) = -0,33; \operatorname{ch}(-0,327) = 1,06.$$

По формуле (5)

$$\frac{0,0675 \cdot 40}{5 \cdot 192 \cdot 1,41 \cdot 0,656} (-0,33 \cdot 9\,320 + 1,06 \cdot 4\,780) = 6,1 \text{ а.}$$

Согласно опыту $I_5 = 5 \text{ а}$.

Аналогично определяем I_5 для других значений U_5 . Результаты расчета представлены на рис. 5 (кривая 2). Кривая 3 дает результаты опыта. Упрощенным методом

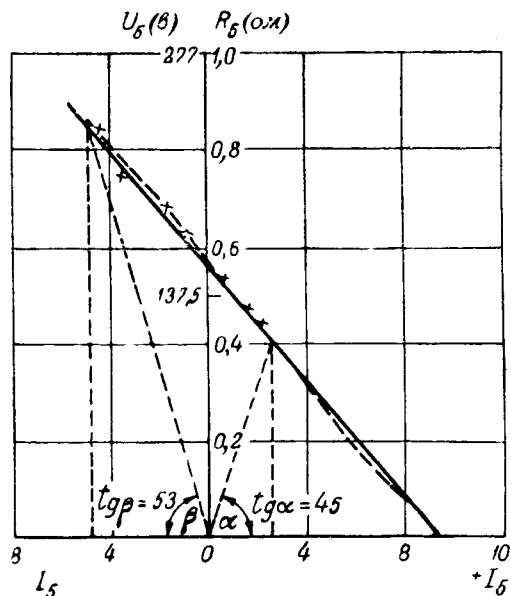


Рис. 6. Внешняя характеристика умножителя ($m=5$) при реактивной нагрузке.

при U_{50} и I_{5k} , определенным по (3) и (4), получим:

$$x_5 = \frac{U_{50}}{I_{5k}} = \frac{159}{9,53} = 16,65 \text{ ом.}$$

При сопротивлении нагрузки $R = 24 \text{ ом}$, соответствующем $U_5 = 120 \text{ в}$, найдем:

$$I_5 = \frac{U_5}{\sqrt{R_5^2 + x_5^2}} = 5,8 \text{ а.}$$

Кривая 3 дает результаты расчета упрощенным методом.

Построим внешнюю характеристику для реактивной нагрузки, пользуясь (2). Полагая R_5 равным $-0,1; -0,2; -0,3$ и т. д. [принят знак минус, как того требует уравнение (4)], строим зависимость $R_5(U_5) = f(I_5)$. Результаты расчета показаны пунктиром на рис. 6. Сплошная линия — опытные данные для индуктивной и емкостной нагрузки. На рис. 6 показаны графические определения I_5 и U_5 . Одно построение выполнено для $X_L = 45 \text{ ом}$. Получаем $U_5 = 115 \text{ в}$, $I_5 = 2,5 \text{ а}$ (пунктир); опытные данные: $U_5 = 120 \text{ в}$, $I_5 = 2,3 \text{ а}$. Для $X_C = 53 \text{ ом}$ ($C = 12 \text{ мкф}$) получаем $U_5 = 230 \text{ в}$, $I_5 = 4,8 \text{ а}$; опытные данные: $U_5 = 232 \text{ в}$, $I_5 = 5 \text{ а}$. Крестиками на рис. 6 отмечены точки, полученные упрощенным методом расчета.

Определим еще величину первичного тока при коротком замыкании вторичной стороны, пользуясь формулами (7) — (9).

По (7)

$$I_0 = \frac{aI}{\sqrt{2}} \sqrt{J_0(2R_a) - 1} = \frac{0,0675 \cdot 40}{1,41} \times \sqrt{J_0(19,1) - 1} = 53,8 \text{ а.}$$

Ток вторичной стороны, приведенный к первичной,

$$I_{mk} \frac{\omega m}{\omega a} = 9,53 \frac{192}{150} = 12,2 \text{ а.}$$

Первичный ток

$$I_{ak} = \sqrt{I_0^2 - I_{mk}^2} = 52,5 \text{ а.}$$

По опыту

$$I_{ak} = 47 \text{ а.}$$

Подробно исследование умножителя изложено в [Л. 3].

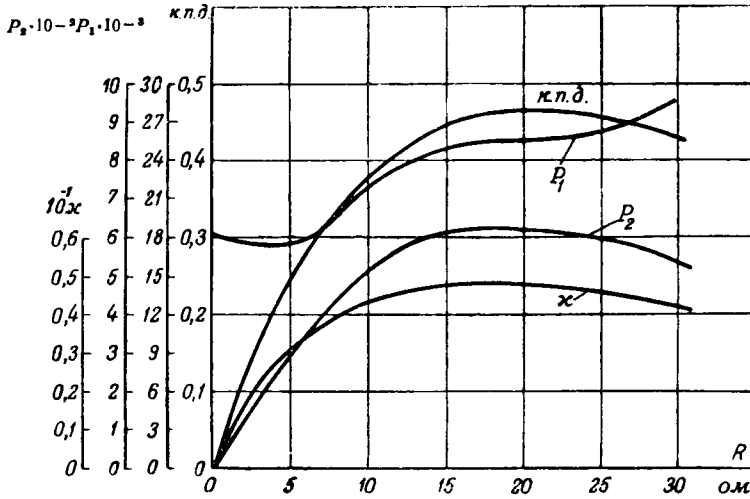


Рис. 7. Характеристики умножителя частоты ($m=5$) при активной нагрузке.

В литературе данные об умножителях частоты в пять раз почти отсутствуют. Небезынтересно поэтому привести некоторые характеристики умножителя (рис. 7). На рис. 7: P_2 — отдаваемая мощность; P_1 — суммарная кажущаяся мощность всех пяти фаз; x — входной коэффициент мощности.

В заключение приведем результаты поверочного расчета утроителя, исследованного Рукавишниковым и Ермолиным [Л. 1].

Данные утроителя: сечение сердечника $S=73 \text{ см}^2$, длина средней силовой линии $l=105,4 \text{ см}$; число витков первичной обмотки 30, вторичной 58, максимальная индукция $B_a=18000 \text{ гс}$, максимальные ампервитки 22 500. Уравнение кривой намагничивания будет иметь вид [Л. 3]:

$$aw = 184 \operatorname{sh} \frac{B}{3270}.$$

Определим напряжение холостого хода утроителя. Имеем:

$$R_a = \beta B_a = 5,52; \operatorname{sh} R_a \approx \operatorname{ch} R_a = 124,9; \operatorname{sh} \frac{R_a}{2} \approx \operatorname{ch} \frac{R_a}{2} = 7,9.$$

По (4) находим:

$$\operatorname{th} R_{30} = - \frac{\operatorname{sh} R_a - 2 \operatorname{sh} \frac{R_a}{2}}{\operatorname{ch} R_a + 2 \operatorname{ch} \frac{R_a}{2}} = -0,777;$$

$$R_{30} = -3,04; B_{30} = \frac{R_{30}}{\beta} = 3390 \text{ гс};$$

$$U_{30} = \frac{3\omega_3 B_{30} S \omega_3}{\sqrt{2} \cdot 10^8} = 287 \text{ в}.$$

Графическим методом (по Штейну) было получено $B_{30} = 3550 \text{ гс}$; $U_{30} = 300 \text{ в}$. Опыт дал $U_{30} = 290 \text{ в}$.

Определим ток короткого замыкания по (3):

$$I_{3k} = \frac{al (\operatorname{sh} R_a - 2 \operatorname{sh} \frac{R_a}{2})}{3\omega_3 \sqrt{2}} = 82 \text{ а}.$$

Графическим методом было получено $I_{3k} = 89 \text{ а}$. Опыт дал $I_{3k} = 79 \text{ а}$.

Рассмотрим случай индуктивной нагрузки (рис. 8).

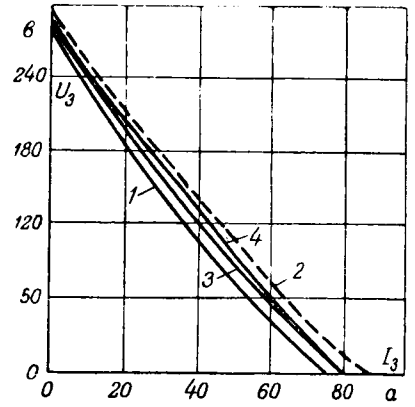


Рис. 8. Внешняя характеристика утроителя частоты при индуктивной нагрузке.

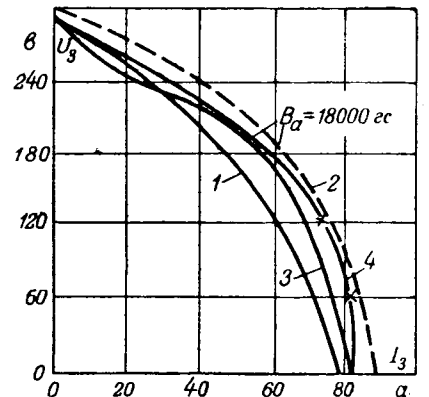


Рис. 9. Внешняя характеристика утроителя частоты при активной нагрузке.

Примем $U_3 = 180 \text{ в}$. Для этой точки $B_3 = 2120 \text{ гс}$; $R_3 = -0,648$; $\operatorname{sh} R_3 = -0,69$; $\operatorname{ch} R_3 = 1,215$.

По формуле (2)

$$I_3 = \frac{184(-0,69 \cdot 140,7 + 1,215 \cdot 109,1)}{3,58 \cdot 1,41} = 26,7 \text{ а}.$$

Графическим методом получено (кривая 2) $I_3 = 32 \text{ а}$. Опыт дал (кривая 1) $I_3 = 26,9 \text{ а}$. Кривые 1 и 2 взяты из работы Рукавишникова и Ермолина. Кривая 3 дает результаты расчета по формуле (2).

Упрощенным методом найдем (кривая 4):

$$I_3 = \frac{U_{30}}{X_3 + X_L} = \frac{287}{3,5 + 6,7} = 28,1 \text{ а}.$$

Здесь $X_L = 6,7$ определено по кривой 1 делением $U_3 = 180 \text{ в}$ на соответствующий ток: $180:26,9 \text{ а}$,

$$X_3 = \frac{287}{82} = 3,5 \text{ ом}.$$

Рассмотрим случай активной нагрузки (рис. 9). Кривые 1 и 2 взяты из работы Рукавишникова и Ермолина. Возьмем точку $U_3 = 120 \text{ в}$ ($R = 1,97 \text{ ом}$). Находим $R_3 =$

$$= -0,437; \cos \gamma = \frac{U_3}{U_{30}} = \frac{120}{287} = 0,419; \sin \gamma = 1,906$$

$$R_3 \cos \gamma = -0,183; \operatorname{Sh}(-0,183) = -0,183; \operatorname{Ch}(-0,183) = 1,02.$$

По формуле (5)

$$I_3 = \frac{184}{3,58 \cdot 1,41 \cdot 0,908} (-0,183 \cdot 140,7 + 1,02 \cdot 109,1) = 64 \text{ а}.$$

Графическим методом получено $I_3 = 76 \text{ а}$, опыт для 61 а .

Упрощенный метод дает:

$$I_3 = \frac{U_{30}}{\sqrt{X_3^2 + R_3^2}} = \frac{287}{\sqrt{3,5^2 + 1,97^2}} = 71,5 \text{ а}.$$

с R_3 получено делением U_3 на соответствующее значение тока I_3 по кривой $I:120:61$.

На рис. 9 кривые 3 и 4 соответственно дают результаты расчета по формулам (5) и (19) и упрощенным методом.

Литература

1. Н. Н. Рукавишников и Н. П. Ермолин. Изменение частоты с помощью трансформаторов. Электричество, № 15, 1935.

2. С. М. Осовец. Дроссели насыщения. Электричество, № 5, 1948.

3. Л. Л. Рожанский. Статические преобразователи частоты в схемах телеуправления и телесигнализации. Диссертация, ХЭТИ, 1946.

4. G. Stein. Versuch einer Theorie des statischen Drei- und Mehrphasenfrequenzwandlers. Archiv für Electrotechnik, B. 24, S. 763, 1930.

5. F. Brailsford. Frequency Static Transformers. Transactions of IEE, London, v. 73, p. 309, 1933.

6. Л. Л. Рожанский. О расчете умножителей частоты, ВЭП, № 4, 1949.

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

[9. 4. 1950]



К расчету переходных процессов при несимметричных коротких замыканиях цепях с последовательно включенной емкостью

Кандидат техн. наук В. В. АНДРЕЕВ

Научно-исследовательский институт постоянного тока

Последовательное включение емкости в электрических сетях различных напряжений и протяженности в цепях снижения их эквивалентных проводностей, несомненно, должно в недалеком будущем войти в практику энергетических систем. Это потребует решения ряда теоретических и практических вопросов, среди которых не последнее место принадлежит вопросам расчета переходных процессов при коротких замыканиях.

Значение таких расчетов с точки зрения выбора аппаратуры, проектирования релейных защит и защиты конденсаторов от перенапряжений в сверхтоках очевидно. В то же время наличие в цепи емкостного сопротивления, в особенности в тех случаях, когда оно достаточно, что короткозамкнутый контур оказался колебательным, вносит в переходный процесс особенности, существенно отличающие такие цепи от цепей без емкости, как это будет далее пока-

Изложена методика расчета электрических цепей с последовательно включенной емкостью при возникновении переходных процессов. В выводах отмечаются особенности метода симметричных составляющих при применении его к цепям, содержащим колебательные контуры.

ми (например, [Л. 2], стр. 165). Таким образом, они будут изображаться неподвижными убывающими в длине векторами, и физическое

представление о порядке следования фаз, играющее центральную роль в методе симметричных составляющих, к этим составляющим неприменимо. Единственно вращающимися векторами в таких цепях являются вынужденные (установившиеся) составляющие процесса, имеющие единую угловую частоту ω (частоту приложенной э. д. с.). В силу этого обеспечивается полное соответствие между операторным изображением, например, тока определенной последовательности и его оригиналом, который в своей колебательной (вынужденной) части будет всегда иметь физически тот же порядок следования фаз. Разделение же аperiodических членов на «симметричные» составляющие, естественно, физического смысла не имеет и является лишь формально-математическим приемом, обеспечивающим правильность решения, но поводом к недоразумениям послужить не может.

Авторы [Л. 1], правда, отметили возможность появления в переходном процессе колебательных (вращающихся) свободных членов с угловыми частотами, отличными от приложенной частоты ω и от нуля, имея в виду, очевидно, цепи с емкостью, но не осветили этих случаев детально и не подчеркнули их существенной особенности с точки зрения метода симметричных составляющих. Действительно, в таких случаях физическое представление о порядке следования фаз оказывается уже не только к вы-

И. Атабеков и Л. Г. Мамиконян [Л. 1] показали, что метод симметричных составляющих с успехом применяется и для расчета переходных процессов, если пользоваться им в операторной комплексной форме. Весьма существенно при этом, что в обычных сетях, т. е. в отсутствие последовательной емкости и в разрезании поперечными, операторные сопротивления могут иметь только вещественные отрицательные корни, и, следовательно, действительные составляющие переходных процессов будут только аperiodическими затухающими.

нужденным, но и к свободным членам с частотами, отличными от нуля. Вместе с тем, как известно, комплексные корни операторного полного сопротивления всегда появляются сопряженными парами. Таким образом, в переходном процессе всякому свободному члену, изображаемому вектором, затухающим и вращающимся в положительном направлении с собственной угловой частотой одного из контуров, будет соответствовать вектор, вращающийся с той же угловой частотой, но в отрицательном направлении. В многофазной симметричной цепи, питаемой симметричной системой э. д. с., такие векторы образуют две симметричные же системы, имеющие одинаковое относительное расположение фаз на комплексной плоскости, но противоположные направления вращения. Но это означает не что иное, как появление при переходном процессе даже в совершенно симметричных условиях систем с прямыми и обратным порядком следования фаз. Так, например, в простейшем случае трехфазного короткого замыкания компенсированной линии, питаемой с одной стороны от шин бесконечной мощности, каждая фаза которой замещается сосредоточенным полным сопротивлением

$Z = R + j(X_L - X_C)$, ток в фазе A при переходном процессе будет выражаться:

$$\begin{aligned} \ddot{i}_{ka} = & I_{m\infty} \varepsilon^{j\omega t} + I_{m(+)} \varepsilon^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t} + \\ & + I_{m(-)} \varepsilon^{\frac{1}{2}(-\rho - j\delta)\omega t} \end{aligned} \quad (1)$$

а в двух других фазах, как обычно,

$$\ddot{i}_{kb} = \dot{a}^2 \ddot{i}_{ka} \quad \text{и} \quad \ddot{i}_{kc} = \dot{a} \ddot{i}_{ka}, \quad (2)$$

если $\dot{a} = \varepsilon^{j\frac{2\pi}{3}}$. Здесь введены: частотный параметр цепи $\delta = \frac{1}{X_L} \sqrt{4X_C X_L - R^2}$ (имеется в виду вещественное его значение), а также показатель затухания $\rho = \frac{R}{X_L}$. Нетрудно усмотреть на основании (2), что первый и второй члены в (1) действительно имеют физически прямой порядок следования фаз, а третий — обратный. При этом амплитуды затухающих колебаний той и другой последовательности оказываются в большинстве случаев сравнимыми. Если пренебречь для простоты активным сопротивлением R , учитывая его обычную относительную малость, то можно показать, что эти амплитуды выражаются через амплитуду установившегося тока (при нулевых начальных условиях) как

$$\left. \begin{aligned} I_{m(+)} &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\delta}{2} \right) I_{m\infty} \\ I_{m(-)} &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\delta}{2} \right) I_{m\infty} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Таким образом, они сближаются друг с другом как в области очень малых собственных частот

($\delta \rightarrow 0$), так и в области очень высоких ($\delta \rightarrow \infty$ и лишь при $\delta = 2(X_C = X_L$ — случай полной компенсации, т. е. резонанса), обратная последовательность исчезает.

Более сложные схемы могут иметь не один ряд собственных частот (по числу независимых колебательных контуров), причем каждая из них будет давать колебания прямой и обратной последовательности.

Появление затухающих токов обратной последовательности даже при вполне симметричных условиях представляет собой обстоятельство, которое нельзя оставить без внимания, поскольку симметричные составляющие являются не только математическим расчетным приемом и физическими реальностями, на которые различным образом реагирует целый ряд электрических устройств, в особенности трансформаторы, устройства защиты и автоматики и т. д. Вместе с тем, это обстоятельство вносит известную неясность и в самый метод расчета, так и при этом приходится иметь в виду, что некоторое операционное выражение, которое по существу его вычисления условно будет названо, например, «изображением тока прямой последовательности», при переходе к оригиналам действительно физически в установившемся члене действия прямого порядка следования фаз, а в затухающем, в общем случае прямой и обратной порядки. Аналогично — для составляющей обратной последовательности. Только нулевая последовательность, как легко убедиться, состав исключение: она при переходе к оригиналу даст именно нулевой порядок следования фаз, как в установившейся, так и в затухающей части.

Иначе говоря, для таких цепей следует различать математическое понятие о симметричных составляющих и физическое — о порядке следования фаз. По отношению к затухающим членам эти понятия не совпадают.

На основании сказанного можно сделать заключение, что метод симметричных составляющих остается вполне применимым и для расчета переходных процессов в цепях рассмотренного вида, если будет избегнуто смешение воедино двух указанных понятий — математического и физического.

Это может быть достигнуто путем соответствующей четкой терминологии и системы обозначений. Так, например, для математических симметричных составляющих представляется целесообразным исключить термины *последовательный порядок следования*, *чередование* и т. п., а также *прямой* и *обратный* или *положительный* и *отрицательный*, оставив эти термины исключительно за составляющими, физически имеющими определенный порядок следования фаз. Для первой же следует применять более отвечающие ее сущности формальные термины, например, *первая*, *вторая* и *нулевая*, *симметричные составляющие* или, еще лучше, *симметричные координаты* (как это в свое время предлагалось, но не получилось). Эти термины соответствуют общепринятым

й системе индексов 1, 2, 0, тогда как для физических составляющих можно рекомендовать же употребляемые индексы (+), (-), (0).

Договорившись таким образом, можно, пользуясь по обычным формулам метода симметричных составляющих, как это рекомендовано [Л. 1], изображения первой, второй и нулевой координат, например тока, написать их оригиналы (для схемы с одной собственной частотой):

$$\left. \begin{aligned} \ddot{i}_1 &= \dot{i}_{m\infty(+)} e^{j\omega t} + \dot{i}_{m1(+)} e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t} + \\ &+ \dot{i}_{m1(-)} e^{\frac{1}{2}(-\rho - j\delta)\omega t}, \\ \ddot{i}_2 &= \dot{i}_{m\infty(-)} e^{j\omega t} + \dot{i}_{m2(-)} e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t} + \\ &+ \dot{i}_{m2(+)} e^{\frac{1}{2}(-\rho - j\delta)\omega t}, \\ \ddot{i}_0 &= \dot{i}_{m\infty(0)} e^{j\omega t} + \dot{i}'_{m(0)} e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t} + \\ &+ \dot{i}''_{m(0)} e^{\frac{1}{2}(-\rho - j\delta)\omega t} \end{aligned} \right\} (4)$$

Выбрать из них физические составляющие токов реальным, обратным и нулевым порядком следования фаз:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{i}_{(+)} &= \dot{i}_{m\infty(+)} e^{j\omega t} + \dot{i}_{m1(+)} e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t} + \\ &+ \dot{i}_{m2(+)} e^{\frac{1}{2}(-\rho - j\delta)\omega t}, \\ \ddot{i}_{(-)} &= \dot{i}_{m\infty(-)} e^{j\omega t} + \dot{i}_{m1(-)} e^{\frac{1}{2}(-\rho - j\delta)\omega t} + \\ &+ \dot{i}_{m2(-)} e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t}, \\ \ddot{i}_{(0)} &= \dot{i}_{m\infty(0)} e^{j\omega t} + \dot{i}'_{m(0)} e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t} + \\ &+ \dot{i}''_{m(0)} e^{\frac{1}{2}(-\rho - j\delta)\omega t} \end{aligned} \right\} (5)$$

), что, несмотря на наличие в комплексной форме в каждой составляющей двух затухающих членов, при переходе к вещественной форме, т. е. к проекциям, например на ось мнимых чисел, они дадут одно затухающее колебание с частотой $\frac{\delta}{2}\omega$ с некоторой амплитудой и фазой.

Применив некоторый искусственный прием, можно в комплексной форме объединить оба затухающих члена в один путем изменения направления вращения одного из них. Для этого следует напомнить сущность символического комплексного метода в теории переменных токов и колебаний вообще. Утверждая, что физическая, чисто вещественная величина изображается некоторым комплексом (или вектором, равным ему), мы утверждаем не более того, что физическая величина действительная и мнимая части комплекса. Это обстоятельство позволяет в случае необходимости обра-

щаться с другой частью комплекса с известной свободой, т. е. изменять произвольно ее значение. При этом, конечно, имеется в виду, что над комплексами будут производиться лишь операции сложения и вычитания и другие, обладающие свойством распределительности в отношении действительных и мнимых частей комплексов по отдельности (умножение на вещественное число, дифференцирование и интегрирование). Указанных операций вполне достаточно для исследования переходных процессов. Поэтому, приняв для определенности проектирование всех комплексов на ось мнимых для перехода к реальным физическим величинам, мы можем всегда заменить любой комплекс \dot{A} комплексом $(-\dot{A})$, поскольку при этом мнимая часть его не изменится.

Применив этот прием к одному из двух затухающих членов в выражениях (5), получим в них уже только два члена — установившийся и затухающий:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{i}_{(+)} &= \dot{i}_{m\infty(+)} e^{j\omega t} + (\dot{i}_{m1(+)} - \dot{i}_{m2(+)} e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t}) e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t}, \\ \ddot{i}_{(-)} &= \dot{i}_{m\infty(-)} e^{j\omega t} + (\dot{i}_{m2(-)} - \dot{i}_{m1(-)} e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t}) e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t}, \\ \ddot{i}_{(0)} &= \dot{i}_{m\infty(0)} e^{j\omega t} + (\dot{i}'_{m(0)} - \dot{i}''_{m(0)} e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t}) e^{\frac{1}{2}(-\rho + j\delta)\omega t} \end{aligned} \right\} (6)$$

Полный ток в основной фазе A равен сумме формально-математических симметричных координат (4), или, что то же, сумме физических составляющих всех последовательностей (5). Он может быть представлен также, как сумма выражений (6), хотя в таком случае он будет равен сумме выражений (4) или (5) лишь по мнимой части. Что же касается токов в двух других фазах, то они могут быть получены прежде всего по известному правилу из симметричных координат (4), например, для фазы B :

$$\ddot{i}_b = \ddot{i}_0 + \dot{a}^2 \ddot{i}_1 + \dot{a} \ddot{i}_2. \quad (7)$$

Это правило к физическим составляющим в форме (5) непосредственно не применимо, так как в составе $\ddot{i}_{(+)}$ и $\ddot{i}_{(-)}$ один из затухающих членов должен умножаться на \dot{a} , а другой на \dot{a}^2 . Однако, как нетрудно убедиться, поскольку $\dot{a} = \dot{a}^2$, мы приходим к тому же правилу вычисления комплекса полного тока по физическим составляющим формы (6):

$$\ddot{i}_b = \ddot{i}_{(0)} + \dot{a} \ddot{i}_{(+)} + \dot{a} \ddot{i}_{(-)}. \quad (8)$$

При этом, естественно, комплексы \ddot{i}_b , вычисленные по (7) и по (8), равны только своими мнимыми частями.

В заключение следует предупредить возможность недоразумений при интегрировании выражений вида (6), т. е. приведенных к одному направлению вращения. Такая необходимость

может, например, встретиться при определении падения напряжения на емкости по току. Поскольку действительная часть этих выражений подверглась произвольному изменению и, следовательно, уже не соответствует условиям задачи, она может при подстановке в интеграл постоянного предела (например, $t=0$ при интегрировании от 0 до t) дать постоянный не сокращающийся член (чисто вещественный, конечно) в составе искомого комплекса. Такой член, хотя он и не дает проекции на ось мнимых

величин, целесообразнее попросту отбросить в комплексной форме, так как он явно противоречит физической сущности процесса.

Литература

1. Г. И. Атабеков и Л. Г. Мамиконян. Изменение комплексных схем замещения для расчета переходных процессов. Электричество, № 4, 1949.
2. Г. Бодее. Теория цепей и проектирование устройств с обратной связью. ГИИЛ. М., 1948.



Графоаналитический метод расчета переходных процессов в электрических цепях с нелинейными элементами

Кандидат техн. наук Л. А. БЕССОНОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

Расчет переходных процессов в нелинейных цепях, находящихся под воздействием э. д. с. произвольной формы, может проводиться графически, аналитическими и графоаналитическими методами. Каждая из перечисленных групп методов имеет свои преимущества и недостатки. Графические методы весьма точны, но неудобны, так как требуют планиметрирования площадей. Кроме того, они не дают возможности получить решение в общем виде. Аналитические методы дают возможность получить решение в общем виде, которое весьма удобно для пользования, но применить их не всегда удастся в силу математических трудностей. В ряде случаев наиболее удобными являются графоаналитические методы, которые также не дают решения в общем виде, но менее трудоемки, чем чисто графические методы. Наиболее ценным из графоаналитических методов, не требующих планиметрирования, является незаслуженно забытый метод Волюнкина (Известия Ленинградского политехнического института, т. XXVI, 1916). Метод был применен им для определения пика тока при включении ненагруженного трансформатора к синусоидальному напряжению. Цель статьи состоит в том, чтобы показать, что метод Волюнкина может быть распространен и на значительно более сложные цепи, в том числе на цепи, приводящие к уравнениям 2-го и 3-го порядков и содержащие несколько нелинейных элементов. Сначала вкратце рассмотрим, в чем заключается метод Волюнкина. Метод основан на замене определенного интеграла приближенной суммой по формуле трапеций.

Показано, что графоаналитический метод расчета переходных процессов В. Волюнкина может быть распространен на цепи второго, третьего и более высоких порядков при наличии в них нескольких нелинейных элементов. Метод прост, не требует планиметрирования площадей, дает возможность легко учесть гистерезис и несимметричность характеристик нелинейного элемента, пригоден при любых начальных условиях и при воздействии э. д. с. любой формы.

Если интервал интегрирования $b - a$ разбит на n равных частей и через $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}$ и т. п. обозначить значения функции $f(x)$ соответ-

ственно при $x_0 = a$;

$x_1 = a + h$; $x_2 = a + 2h$ и т. д., где $h = \frac{b-a}{n}$

то, как известно,

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{b-a}{2n} (y_0 + 2y_1 + 2y_2 + \dots + 2y_{n-1} + y_n)$$

Пусть на трансформатор с разомкнутой первичной обмоткой действует переменное напряжение $e(t)$, изменяющееся по любому закону во времени. Запишем уравнение цепи:

$$\frac{d\psi}{dt} + Ri = e(t).$$

Потокосцепление ψ выражено здесь и ниже в вольтсекундах.

Разобьем время t на малые равные промежутки $\tau (t = n\tau)$ и последовательно проинтегрируем последнее уравнение от 0 до τ , затем от τ до 2τ и т. д. Получим выражения:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^\tau e(t) dt &= (\psi_1 - \psi_0) + R \int_0^\tau idt, \\ \int_0^{2\tau} e(t) dt &= (\psi_2 - \psi_0) + R \int_0^{2\tau} idt, \\ &\vdots \\ \int_0^{n\tau} e(t) dt &= (\psi_n - \psi_0) + R \int_0^{n\tau} idt, \end{aligned} \right\}$$

здесь ψ_0 — значение потокосцепления при $t=0$.
 формуле трапеций при $n > 1$

$$\int_0^{n\tau} i dt = \frac{\tau}{2} (i_0 + 2i_1 + 2i_2 + \dots + i_n). \quad (2)$$

Через i_0 обозначено значение тока i при $t=0$; в дальнейшем i_0 полагается равным нулю.
 Перепишем уравнения (1) с учетом (2):

$$\left. \begin{aligned} n=1 \\ \int_0^{\tau} e(t) dt &= (\psi_1 - \psi_0) + R \frac{\tau}{2} i_1, \\ n=2 \\ \int_0^{2\tau} e(t) dt &= (\psi_2 - \psi_0) + \frac{R\tau}{2} (2i_1 + i_2), \\ n=3 \\ \int_0^{3\tau} e(t) dt - \frac{R\tau}{2} 2i_1 &= (\psi_2 - \psi_0) + \frac{R\tau}{2} i_2, \\ n=3 \\ \int_0^{3\tau} e(t) dt - \frac{R\tau}{2} (2i_1 + 2i_2) &= (\psi_3 - \psi_0) + \frac{R\tau}{2} i_3. \end{aligned} \right\} (3)$$

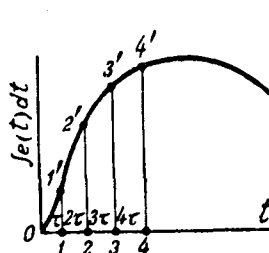


Рис. 1.

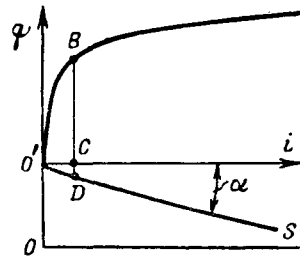


Рис. 2.

перемещать полученный отрезок параллельно оси ординат на рис. 2. При определении i_3 из отрезка $33'$ надо вычесть $\frac{R\tau}{2} (2i_1 + 2i_2)$ согласно третьему из уравнений (3) и т. д.

Покажем, что метод Волынкина может быть распространен и на более сложные цепи.

Для цепи второго порядка (сопротивление, емкость, дроссель со сталью) справедливо уравнение

$$\frac{d\psi}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt = e(t).$$

Проинтегрируем это уравнение от 0 до $t(t=n\tau)$. При интегрировании положим, что при $t=0$, $\psi = \psi_0$ и $u_c = u_c(0-)$.

Имеем:

$$\int_0^{n\tau} e(t) dt = (\psi_n - \psi_0) + R \int_0^{n\tau} i dt + \frac{1}{C} \int_0^{n\tau} \int_0^{n\tau} i (dt)^2 + u_c(0-) n\tau. \quad (4)$$

Для сокращения записи обозначим:

$$I_n = \int_0^{n\tau} i dt \approx \frac{\tau}{2} (i_0 + 2i_1 + 2i_2 + \dots + i_n). \quad (5)$$

Как и выше, положим $i_0 = 0$, так что

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{\tau}{2} i_1, \\ I_2 &= \frac{\tau}{2} (2i_1 + i_2), \\ I_3 &= \frac{\tau}{2} (2i_1 + 2i_2 + i_3), \\ I_4 &= \frac{\tau}{2} (2i_1 + 2i_2 + 2i_3 + i_4), \\ &\dots \end{aligned} \right\} (6)$$

Согласно формуле трапеций $\int_0^{n\tau} \int_0^{n\tau} i (dt)^2 = M_n$, в свою очередь, может быть представлен так:

$$M_n = \int_0^{n\tau} I_n dt = \frac{\tau}{2} (2I_1 + 2I_2 + \dots + I_n). \quad (7)$$

При $n=1$

$$M_1 = \int_0^{\tau} \int_0^{\tau} i dt = \frac{\tau^2}{4} i_1.$$

Выражения (3) позволяют находить последовательно: i_1, i_2, i_3 и т. д. следующим образом.

По заданной кривой $e(t)$ строится кривая $\int e(t) dt$ (рис. 1). Для ее построения также целесообразно воспользоваться формулой трапеций.

Если $e(t)$ синусоида, то значения $\int e(t) dt$ целесообразно находить аналитически.

На отдельном чертеже наносится кривая $\int e(t) dt$, которая известна до проведения расчета (рис. 2). Отрезок OO' в масштабе равен остаточному поткосцеплению ψ_0 .

На рис. 2 проводим прямую $O'S$ под углом α , тангенс которого численно равен $\frac{R\tau}{2}$.

Значение i_1 находится так: из рис. 1 берем значение $\int_0^{\tau} e(t) dt$, равное отрезку $11'$; переносим отрезок $11'$ на рис. 2 и перемещаем его параллельно оси ординат до тех пор, пока один конец не окажется на кривой $\psi(i)$ (точка B), а другая на прямой $O'S$ (точка D). При этом отрезок BD равен $11'$. Отрезок BC равен $(\psi_1 - \psi_0)$. Отрезок CD равен $R \frac{\tau}{2} i_1$. Ток i_1 равен отрезку $O'C$.

Значение тока i_2 находится аналогично.

Из значения $\int_0^{2\tau} e(t) dt$, равного отрезку $22'$, предварительно, согласно второму уравнению (3), вычтем $\frac{R\tau}{2} 2i_1$, а затем уже

Придадим n значения 2, 3, 4 ... и найдем, что

$$\left. \begin{aligned} M_2 &= \frac{\tau^2}{2} \left(2i_1 + \frac{i_2}{2} \right), \\ M_3 &= \frac{\tau^2}{2} \left(4i_1 + 2i_2 + \frac{i_3}{2} \right), \\ M_4 &= \frac{\tau^2}{2} \left(6i_1 + 4i_2 + 2i_3 + \frac{i_4}{2} \right), \\ M_5 &= \frac{\tau^2}{2} \left(8i_1 + 6i_2 + 4i_3 + 2i_4 + \frac{i_5}{2} \right) \end{aligned} \right\} (7a)$$

и т. д.

Значения $\int_0^{n\tau} idt$ известны из предыдущего

[формула (2)]. После подстановки значений $\int_0^{n\tau} idt$

и $\int_0^{n\tau} \int_0^{n\tau} i(dt)^2$ в уравнение (4), получим следующую систему уравнений: при $n=1$

$$\int_0^{\tau} e(t) dt - u_c(0-) \tau = (\psi_1 - \psi_0) + i_1 \frac{\tau}{2} \left(R + \frac{\tau}{2C} \right);$$

при $n=2$

$$\int_0^{2\tau} e(t) dt - \tau \left(R + \frac{\tau}{C} \right) i_1 - u_c(0-) 2\tau = (\psi_2 - \psi_0) + i_2 \frac{\tau}{2} \left(R + \frac{\tau}{2C} \right);$$

при $n=3$

$$\int_0^{3\tau} e(t) dt - R\tau(i_1 + i_2) - \frac{\tau^2}{c}(2i_1 + i_2) - u_c(0-) 3\tau = (\psi_3 - \psi_0) + i_3 \frac{\tau}{2} \left(R + \frac{\tau}{2C} \right);$$

при $n=4$

$$\int_0^{4\tau} e(t) dt - R\tau(i_1 + i_2 + i_3) - \frac{\tau^2}{c}(3i_1 + 2i_2 + i_3) - u_c(0-) 4\tau = (\psi_4 - \psi_0) + i_4 \frac{\tau}{2} \left(R + \frac{\tau}{2C} \right) \text{ и т. д.}$$

Система уравнений¹ (8) решается так же, как и система (3). Второе слагаемое правой стороны

¹ Общий вид третьего слагаемого левой стороны в уравнениях (8) и (14) при произвольном значении n таков: $-\frac{\tau^2}{c} A_n$. Коэффициент A_n определяется через коэффициент при предшествующем члене A_{n-1} при помощи рекуррентной формулы

$$A_n = A_{n-1} + \sum_{k=1}^{n-1} i_k.$$

в уравнениях системы (8) имеет множителем $\frac{\tau}{2} \left(R + \frac{\tau}{2c} \right)$ вместо множителя $\frac{R\tau}{2}$ в системе уравнения (3). Благодаря этому прямая $O'S$ на рис. в рассматриваемом случае должна быть проведена под углом α , тангенс которого численно равен $\frac{\tau}{2} \left(R + \frac{\tau}{2c} \right)$. Для цепи третьего порядка в уравнении которой встретится интеграл вида $\int_0^{n\tau} \int_0^{n\tau} \int_0^{n\tau} i(dt)^3$, также может быть применена формула трапеций. В этом случае

$$\int_0^{n\tau} M_n dt \approx \frac{\tau}{2} (2M_1 + 2M_2 + \dots + M_n).$$

Значения M_n подсчитываются по (7).

Рассмотрим более сложную задачу. Пусть в цепи, которая включается к напряжению произвольной формы $e(t)$, кроме емкости есть два нелинейных элемента: дроссель со стальным сердечником и нелинейное активное сопротивление (в частном случае нелинейные элементы могут иметь несимметричные характеристики). Напряжение на нелинейном сопротивлении при токе обозначим через $u_R(i_n)$. Уравнение такой цепи

$$\frac{d\psi(t)}{dt} + u_R(i) + \frac{1}{c} \int_{-\infty}^t idt = e(t).$$

Проинтегрируем обе стороны по t от 0 до t . Метод, конечно, применим при любых начальных условиях. Для простоты записи возьмем нулевые начальные условия—положим, что при $t=0$

$$\psi = 0 \text{ и } u_c(0-) = 0.$$

Имеем:

$$\psi_n + \int_0^{n\tau} u_R(i) dt + \frac{1}{c} \int_0^{n\tau} \int_0^{n\tau} i(dt)^2 = \int_0^{n\tau} e(t) dt.$$

По формуле трапеций

$$\int_0^{n\tau} u_R(i) dt = \frac{\tau}{2} [2u_R(i_1) + 2u_R(i_2) + \dots + 2u_R(i_{n-1}) + u_R(i_n)];$$

здесь $u_R(i_1)$ —значение напряжения на нелинейном активном сопротивлении в момент времени $t=0$, которому соответствует ток i_1 . Значения $\int_0^{n\tau} i dt$

Пример: Зная, что $A_4 = 3i_1 + 2i_2 + i_3$, найдем выражения для A_5 и A_6 .

$$A_5 = A_4 + \sum_{k=1}^4 i_k = A_4 + (i_1 + i_2 + i_3 + i_4),$$

$$A_6 = A_5 + \sum_{k=1}^5 i_k = A_5 + (i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5)$$

вестны из предыдущего. Имеем следующие четные уравнения для последовательного сложения токов i_3, i_2, i_1, \dots , при $n=1$

$$\int_0^{\tau} e(t) dt = \psi(i_1) + \frac{\tau}{2} u_R(i_1) + i_1 \frac{\tau^2}{2C};$$

при $n=2$

$$\int_0^{2\tau} e(t) dt - \tau u_R(i_1) - \frac{\tau^2}{C} i_1 = \psi(i_2) + \frac{\tau}{2} u_R(i_2) + i_2 \frac{\tau^2}{2C};$$

при $n=3$

$$\int_0^{3\tau} e(t) dt - \tau [u_R(i_1) + u_R(i_2)] - \frac{\tau^2}{C} (2i_1 + i_2) = \psi(i_3) + \frac{\tau}{2} u_R(i_3) + i_3 \frac{\tau^2}{2C};$$

при $n=4$

$$\int_0^{4\tau} e(t) dt - \tau [u_R(i_1) + u_R(i_2) + u_R(i_3)] - \frac{\tau^2}{C} (3i_1 + 2i_2 + i_3) = \psi(i_4) + \frac{\tau}{2} u_R(i_4) + i_4 \frac{\tau^2}{2C}.$$

Потокоцепление при токе i_n обозначено здесь через $\psi(i_n)$. Из системы уравнений (14) видно, что определение токов i_1, i_2, i_3, \dots , соответствующих моментам времени $\tau, 2\tau, 3\tau, \dots$ может изводиться следующим образом (рис. 3).

Строим кривую 1, выражающую зависимость флюксцепления от тока $\psi(i)$, и кривую 2, ординаты которой равны сумме ординат кривой $u_R(i)$ и прямой $\frac{\tau^2}{2C} i$. Ток i_1 определим из первого уравнения системы (14). Перемещаем отрезок ll' рис. 1, численно равный $\int_0^{\tau} e(t) dt$, параллельно оси ординат до тех пор, пока один конец не скажется на кривой 1 (точка E), а другой — на кривой 2 (точка F). Отрезок OG равен i_1 . Из характеристики $u_R = f(i)$ находим

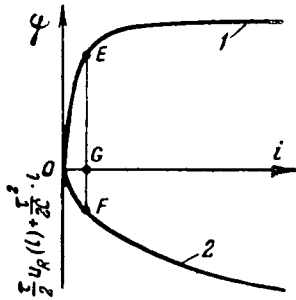


Рис. 3.

i_1). Затем по второму уравнению системы (14) найдем i_2 . Для этого из отрезка $22'$ рис. 1 дварительно вычтем величину $[\tau u_R(i_1) + \frac{\tau^2}{C} i_1]$.

а затем будем перемещать полученный отрезок параллельно оси ординат на рис. 3. Найдем i_2 , по которому определим $u_R(i_2)$. Затем найдем i_3 и $u_R(i_3)$ и т. д.

Некоторым неудобством рассматриваемого метода является то, что вначале, до проведения расчета, неизвестно, каким значением τ следует задаваться. Очевидно, что чем меньше τ , тем большая точность может быть получена при расчете, но при этом он становится более громоздким. Поэтому в каждом конкретном случае целесообразно сначала провести ориентировочные расчеты, а затем на их основании выбрать τ . Если $e(t)$ — функция периодическая с периодом T , то целесообразно брать $\tau = (\frac{1}{18} \div \frac{1}{36}) T$.

Приложение. Рассмотрим численный пример. Требуется построить кривую тока за время переходного процесса при включении регулируемого полупроводникового выпрямителя (рис. 4) в режиме отсутствия тока

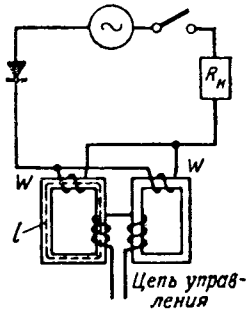


Рис. 4

подмагничивания к сети переменного тока напряжением 71 в (действующее значение). Рассматривается неблагоприятный момент включения (начальная фаза $\psi = 0$). Заданы: кривая намагничивания (рис. 5) и вольтамперная характеристика выпрямителя (рис. 6), снятая на постоянном токе. Сопrotивление выпрямителя в обратном направлении принято равным 2000 ом. Сопrotивление нагрузки и двух параллельно включенных обмоток переменного тока дросселя насыщения равно 100 ом и в дальнейшем обозначено через R_n .

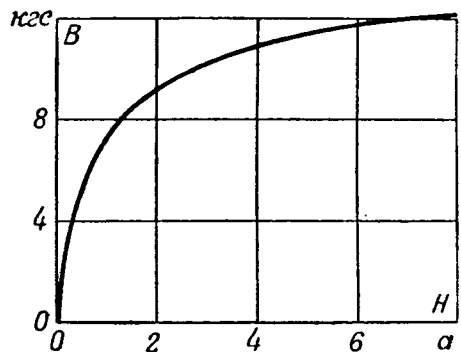


Рис. 5

Данные каждого дросселя $w = 1500$; $s = 2,65 \text{ см}^2$; $l = 35 \text{ см}$. $e(t) = 100 \sin 314 t$. На рис. 7 изображены: кривая $\psi(i)$ (кривая 1) и характеристики $\frac{\tau}{2} [u_R(i) + iR_n]$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\cos(n20^\circ)$	0,94	0,766	0,5	0,1736	-0,1736	-0,5	-0,766	-0,94	-1	-0,94	-0,76	-0,5	-0,1736	0,1726	0,5	0,766	0,94	1
$\int_0^{n\tau} e(t) dt = 0,318 [1 - \cos(n20^\circ)]$	0,0191	0,0427	0,159	0,263	0,373	0,477	0,562	0,618	0,636	0,618	0,562	0,477	0,373	0,263	0,159	0,0427	0,0191	0
$\tau [u_R(i_n - 1) + R_H i_n - 1]$	0	0	0,002	0,006	0,007	0,0125	0,024	0,038	0,040	0,032	0,026	0,017	0,009	0,002	0,001	-0,001	-0,02	-0,022
$\tau \sum_{k=1}^{n-1} [u_R(i_k) + R_H i_k]$	0	0	0,002	0,008	0,015	0,0275	0,0515	0,0875	0,1275	0,16	0,186	0,203	0,212	0,214	0,215	0,214	0,212	0,19
$\int_0^{n\tau} e(t) dt - \tau \sum_{k=1}^{n-1} [u_R(i_k) + R_H i_k]$	0,0191	0,0427	0,157	0,255	0,358	0,450	0,510	0,530	0,504	0,458	0,376	0,274	0,161	-0,049	-0,056	-0,171	-0,193	-0,19
i_n	0	0,002	0,005	0,02	0,04	0,1	0,19	0,236	0,155	0,115	0,05	0,02	0,005	0,002	0,001	-0,01	-0,011	-0,011
$\tau [u_R(i_n - 1) + R_H i_n - 1]$	-0,022	-0,016	-0,01	0	0,001	0,008	0,01	0,015	0,025	0,022	0,015	0,01	0,005	0,002	0	-0,01	-0,025	-0,025
$\tau \sum_{k=1}^{n-1} [u_R(i_k) + R_H i_k]$	0,168	0,152	0,142	0,142	0,143	0,151	0,161	0,176	0,201	0,223	0,238	0,248	0,253	0,255	0,255	0,245	0,22	0,195
$\int_0^{n\tau} e(t) dt - \tau \sum_{k=1}^{n-1} [u_R(i_k) + R_H i_k]$	-0,149	0,1	0,017	0,121	0,23	0,322	0,401	0,442	0,435	0,395	0,324	0,229	0,12	0,008	0,1	-0,202	-0,201	-0,195
i_n	-0,0075	-0,005	0	0,0075	0,015	0,03	0,065	0,093	0,09	0,065	0,03	0,015	0,0075	0	-0,005	-0,0125	-0,0125	-0,010

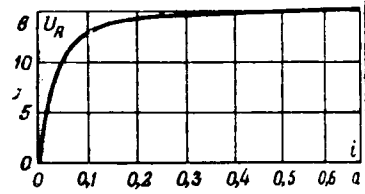


Рис. 6

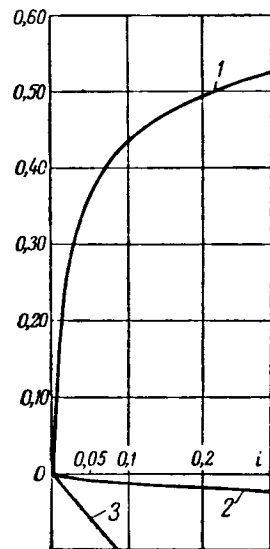


Рис. 7

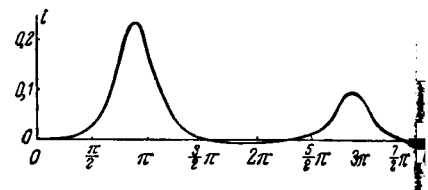


Рис. 8

в пропускающем (кривая 2) и запирающем (кривая 3) направлениях. Кривая 3 для удобства построения перенесена из третьего квадранта в четвертый. Период разбиваем на 18 равных частей $\tau = \frac{0,02}{18} = 0,00111$ сек. Результаты подсчетов сводим в таблицу.

По данным этой таблицы на рис. построена кривая $i(t)$ за два периода переменного тока. Как видно из таблицы, к концу первого периода ($n=18$) ток принимает значение (-0,011), близкое к значению тока к концу второго периода ($i = 0,010$). Это говорит о том, что уже к концу первого периода переменного тока в цепи наступит практически установившийся режим.

Кабели 825 в и их защита

Инж. Е. И. ГОРИН и инж. К. Н. ОСКОЛКОВ

Московский метрополитен

В принятой на Московском метрополитене схеме энергоснабжения поездов место занимают кабели постоянного тока 825 в. По этим кабелям выпрямленное напряжение с шин 825 в главных подстанций поступает на контактную сеть. Принципиальная схема питания контактной сети в части постоянного тока приведена на с. 1.

При насыщенном графике движения поездов даже незначительные перерывы (1—2 мин) в подаче питания на контактную сеть могут вызвать нарушение нормальной работы метрополитена. Поэтому требования к схеме в отношении ее надежности и гибкости довольно высокие. Каждый участок сети имеет двустороннее питание. Для изменения схемы при повреждении питающего кабеля установлены продольные, поперечные и ходные разъединители с дистанционным управлением или управлением при помощи средств телемеханики.

При выходе из работы питающей линии резервное питание может быть осуществлено либо путем перевода нагрузки на другую питающую линию данной подстанции, либо путем перевода нагрузки на одностороннее питание с соседней подстанции. В обоих случаях нагрузка работающих линий возрастает, поэтому автомат этой ли-

Дано краткое описание схемы и устройства кабельной сети постоянного тока, питающей контактную сеть московского метрополитена. Рассмотрены введенные в процессе эксплуатации схемы защиты кабелей постоянного тока 825 в, их достоинства и недостатки.

нии заменяется шиносоединительным автоматом, имеющим повышенную уставку по току.

Питающие линии выполнены одножильными кабелями марки СБГ с номинальным напряжением 3 тыс. в, сечением от 240 до 500 мм². Длина линий от 150 до 850 м. В каждой линии от одного до четырех кабелей.

Вследствие нагревания кабелей пропиточная масса стекает на нижние участки кабельных трасс, распирая свинцовые оболочки, оголенные около арматур по условиям монтажа, а также свинцовые муфты, что в свою очередь вызывает дополнительные работы по отводу скопившейся массы, запайке оболочек, перемонтажу и бандажировке муфт [Л. 1, 2]. Эти затруднения были успешно преодолены совместными усилиями работников метрополитена и завода «Москабель» путем применения фарфоровых концевых муфт и сухих муфт из локоткани, проваренной в олифе [Л. 3]. Самым эффективным мероприятием в этом отношении явился переход на кабели с уплотненной жилой.

Свинцовые оболочки кабелей в местах непосредственного присоединения к контактному рельсу интенсивно разрушались от вибраций. При исследовании в свинце были обнаружены волосяные трещины, укрупнение кристаллов его микроструктуры и значительное снижение крепости свинца на разрыв. Для предупреждения повреждений изоляции кабелей у контактного рельса дополнительно были введены переходные компенсаторы из гартованной меди [Л. 4].

Большая роль в деле выявления дефектов кабелей и предупреждения их повреждений принадлежит плановым профилактическим испытаниям, производимым через каждые 6 мес. выпрямленным напряжением 12 кв [Л. 5]. Наглядным показателем их эффективности является отсутствие аварийных повреждений из-за дефектов изоляции кабелей 825 в.

Важнейшая задача эксплуатации кабелей постоянного тока 825 в состоит в обеспечении надежной защиты их от токов короткого замыкания.

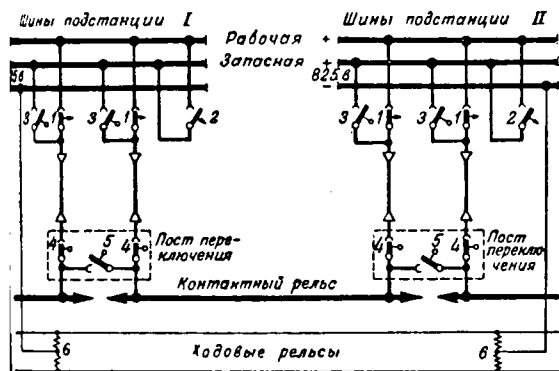


Рис. 1.

1 — действующий автомат; 2 — шиносоединительный автомат; 3 — ходной разъединитель; 4 — продольный разъединитель; 5 — поперечный разъединитель; 6 — путевой дрессель.

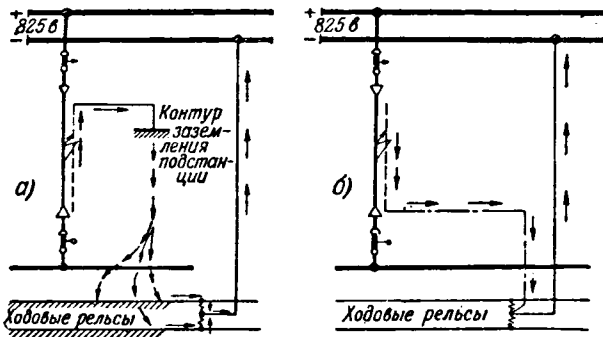


Рис. 2

Основными защитными и отключающими аппаратами питающих кабельных линий постоянного тока являются быстродействующие автоматические выключатели типов БДА и ВАБ-2, действующие по принципу максимальной защиты. Надежное действие этого вида защиты достигается при условии, если имеет место известное соотношение

$$I_{к\ мин} > I_y > I_{макс}$$

где $I_{к\ мин}$ — установившееся значение наименьшего тока короткого замыкания;

I_y — уставка автомата по току;

$I_{макс}$ — максимально возможный ток нагрузки при работе по нормальному графику. Из этого соотношения вытекает, что ток короткого замыкания для надежной работы автомата должен быть больше тока максимальной нагрузки.

Первая очередь метрополитена была пущена в эксплуатацию с применением для защиты питающих кабелей и контактной сети только одних быстродействующих автоматических выключателей без дополнительных защит. Оболочки кабелей были соединены с контуром заземления подстанции (рис. 2,а).

Опыт эксплуатации, проведенные испытания и проверочные расчеты показали, что в ряде случаев величины токов короткого замыкания питающих кабелей постоянного тока оказались ниже уставки автоматов даже при нормальной схеме питания. Иначе говоря, основное условие надежности действия защиты не соблюдалось. Это объясняется тем, что сопротивление цепи короткого замыкания ввиду больших длин кабелей и переходных сопротивлений на землю весьма значительно (0,3...0,5 ом).

В целях уменьшения сопротивления в цепи короткого замыкания свинцовые оболочки кабелей постоянного тока были соединены с ходовыми рельсами через нулевые точки дросселей (рис. 2,б). Таким путем достигалось увеличение тока короткого замыкания до величины, достаточной для отключения автомата. Однако от этой меры пришлось отказаться. Ходовые рельсы по отношению к телу туннеля имеют разность потенциалов, достигающую в отдельные моменты до 40—50 в. Под этой разностью потенциалов оказались и оболочки кабелей питающих линий. Не-

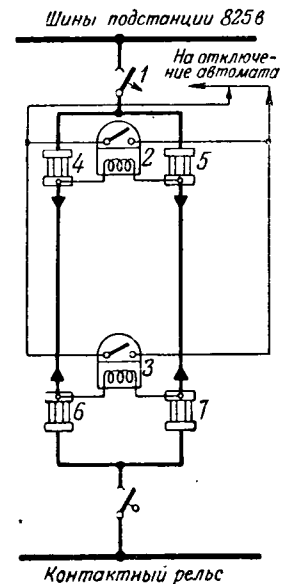


Рис. 3

1 — быстродействующий автомат;
2 и 3 — реле защиты; 4, 5, 6 и 7 — шунты.

смотря на тщательную изоляцию оболочек тела туннеля при помощи фарфоровых клин и zinовых прокладок, малейшее ее нарушение вызвало электрическую коррозию, прожоги и трещины, нарушение электрической прочности кабеля и как следствие короткое замыкание.

С той же целью, что и соединение оболочек с нулевыми точками дросселей, все свинцовые оболочки кабелей в нескольких местах были соединены между собой, т. е. была создана так называемая «решетка». Однако величина переходного сопротивления цепи (контур заземления подстанции — ходовые рельсы) оказалась настолько большой, что не позволила достигнуть желаемого увеличения токов короткого замыкания.

Требовалось создать такие виды защиты, которые действовали бы при токах повреждения меньших, чем уставки автоматов, и допускали соединение брони и свинца кабелей с контуром заземления подстанции. Эту задачу работниками метрополитена решали совместно с кафедрой МЭИ им. Молотова и МЭМИИТ им. Дзержского.

Одним из первых видов защиты, удовлетворяющих указанным требованиям и принятым метрополитеном, явилась дифференциально-токовая защита.

Дифференциально-токовая защита основана на сравнении токов, протекающих по параллельно работающим кабелям. В начале и в конце питающей линии постоянного тока (рис. 3) установлены шунты. Подключенные к шунтам реле 1 и 2 при нормальной работе кабелей (токи в кабелях равны между собой) током не обтекаются. При коротком же замыкании на одном из кабелей равенство токов в кабелях нарушается, реле 1 и 2 будут обтекаться уравнительными токами и через промежуточное реле отключат автомат питающей линии.

Достоинствами дифференциальной токовой защиты являются высокая чувствительность и отсутствие мертвой зоны. Но вместе с этим дифференциальная токовая защита имеет ряд существенных недостатков, к которым относятся: 1) наличие электрической связи между токовыми частями 825 в и катушкой реле; 2) непригодность ее для питающих линий, состоящих из шинных кабелей; 3) сложность регулирования ее первичным током; 4) возможность ложной работы защиты при нарушении контактов силовой цепи, так как переходное сопротивление в местах сбаливания шунтов с ошиновкой соизмеримо с сопротивлением шунтов; 5) необходимость перемонтажа защиты при увеличении количества кабелей в питающей линии.

Дифференциально-импульсная защита. Ввиду существенных недостатков описанных выше способов защиты много внимания уделялось отысканию новых, более совершенных способов защиты кабелей постоянного тока 825 в. Эти новые способы защиты должны были работать при малых токах короткого замыкания и в их основе не должен лежать принцип превышения токов короткого замыкания над токами нагрузки. Один из таких видов защиты состоит в применении индуктивного шунта и использует по обстоятельству, что при неустановившемся режиме скорости нарастания тока и, следовательно, его распределение между параллельно включенными активным сопротивлением и индуктивностью будут различны. Использование этого свойства индуктивного шунта позволяет отключать автомат при коротком замыкании и в тех случаях, когда токи нагрузки равны или превышают установившиеся токи короткого замыкания [Л. 6].

Однако непременным условием применения этой системы защиты является значительное превышение скорости нарастания токов короткого замыкания над скоростью нарастания токов нагрузки. При существующих схемах пуска подвижного состава и параметрах кабельной и контактной сети на московском метрополитене, скорость нарастания пусковых токов поездов в некоторых случаях близка к скорости нарастания тока короткого замыкания. Поэтому применение индуктивных шунтов не всегда позволяет полностью использовать защитные свойства автомата, в некоторых случаях является даже вредным, так как вызывает ложные отключения. Одной из систем защиты, основанной на использовании явления неустановившегося режима в момент короткого замыкания, является дифференциально-импульсная защита (рис. 4). Обмотки трансформаторов включены навстречу друг другу через катушку реле. При нормальном установившемся режиме, а также при пуске подвижного состава при сквозном коротком замыкании в контактной сети ток в начале и конце кабелей одинаков как по величине, так и по скорости изменения. Катушка реле при этих режимах током обтекается и будет, так как э. д. с., наводимые во вторичных обмотках трансформаторов, уравновеши-

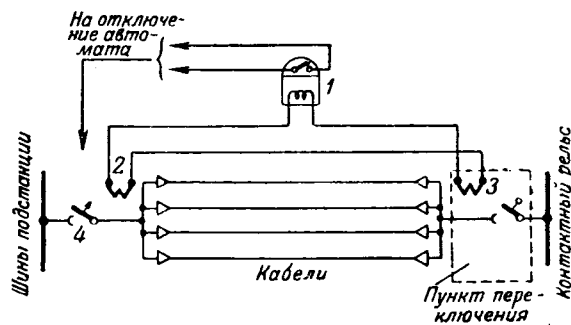


Рис. 4.
1 — реле защиты; 2 и 3 — трансформаторы защиты;
4 — быстродействующий автомат.

Совершенно иная картина будет наблюдаться при замыкании жилы на свинцовую оболочку или броню в любой точке кабеля, находящейся в зоне действия защиты (между подстанцией и пунктом переключения). В этом случае э. д. с., наводимые во вторичных обмотках трансформаторов, не будут уравновешиваться, по катушке реле потечет ток; реле сработает и через промежуточные реле отключит быстродействующий автомат питающей линии постоянного тока.

Дифференциально-импульсная защита обладает следующими достоинствами: 1) отсутствие мертвой зоны; 2) отсутствие электрической связи между силовыми цепями и цепями оперативного тока; 3) возможность защищать линию с любым количеством кабелей; 4) высокая чувствительность; 5) простота выполнения; 6) отсутствие влияния нагрузок на величину уставки защиты.

К недостаткам защиты должна быть отнесена сложность регулировки небаланса токов и необходимость задавать уставки реле первичным током, что представляет большое неудобство в эксплуатации.

Токовая защита. От тяговых подстанций до контактного рельса кабели проложены в коллекторах и стволах шахт. Часть коллекторов по условиям их сооружения и в целях предупреждения распространения аварий разделены на отсеки. Между отсеками кабели проложены в блоках или трубах. На горизонтальных участках кабели уложены свободно на кронштейнах, установленных через каждый метр, а на вертикальных — жестко закреплены через каждые 0,8 м. В противопожарных целях кабели проложены без джута, лаковый покров брони постоянно поддерживается. Подавляющее число кабелей проходит в сухих условиях. Однако не исключается возможность попадания влаги вследствие появления временных течей грунтовых вод в сооружениях.

Изложенные условия прокладки кабелей позволили рассчитывать на исправное состояние джутовой подушки между броней и свинцовой оболочкой кабелей. Основываясь на этом предположении, было решено применить токовую защиту. Как видно из рис. 5, свинцовые оболочки кабелей через обмотку токового реле соединены с контуром заземления подстанции. При возникновении короткого замыкания ток пройдет через свинцовую оболочку и обмотку реле к контуру

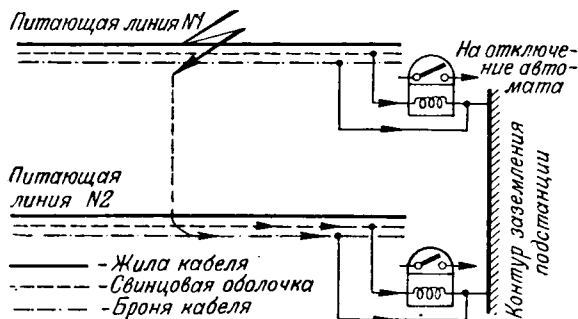


Рис. 5.

заземления. Реле сработает и подействует на отключение автомата.

Наличие изоляции между броней и свинцовой оболочкой (джутовая подушка) позволяет избежать ложных отключений неповрежденных кабелей соседних линий. Если, например, кабели линий № 1 и № 2 (рис. 5) имеют между собой касание и у кабелей линии № 2 отсутствует изоляция между броней и свинцом, то при повреждении кабеля линии № 1 ток короткого замыкания пойдет не только по оболочкам кабелей линии № 1, но и по оболочкам кабелей линии № 2. В результате этого подействуют токовые реле обеих линий и избирательность защиты будет нарушена.

При проектировании токовой защиты очень важно проверить: 1) минимально возможное сопротивление изоляции между броней и свинцом; 2) нагрев свинцовой оболочки при максимальном токе короткого замыкания; 3) величины блуждающих токов с тем, чтобы не допустить ложной работы защиты при минимальных уставках по току. Все эти проверочные расчеты легко осуществимы [Л. 7].

К достоинствам токовой защиты относятся: 1) способность реагировать на токи короткого замыкания небольшой величины; 2) возможность защищать линии с любым количеством кабелей; 3) возможность использования обычных реле типа ЭТ; 4) простота монтажа, наладки и регулировки.

Однако при использовании джутовой подушки в качестве изоляции между броней и свинцовой оболочкой гарантировать надежность работы токовой защиты невозможно. Причиной этому является непостоянство сопротивления джутовой изоляции, связанное с влиянием влажности. Совместными усилиями работников метрополитена и завода «Москабель» удалось создать устойчивую и простую по технологии изготовления

изоляцию между броней и свинцовой оболочкой кабеля и, таким образом, решить вопрос о повышении надежности токовой защиты. Сейчас можно рассчитывать на то, что токовая защита найдет применение и на других видах электрифицированного транспорта, где имеются проложенные в земле кабели постоянного тока. Надежная изоляция между броней и свинцовой оболочкой явится дополнительной защитой от влияния блуждающих токов и коррозии.

В настоящее время на Московском метрополитене большинство питающих линий постоянного тока оборудовано дифференциально-токовой и токовой защитой. С точки зрения удобства эксплуатационного обслуживания наиболее приемлемым видом является токовая защита. При дальнейшем развитии метрополитена предусматривается применение токовой защиты и кабелей со специальной изоляцией между броней и свинцовой оболочкой.

За 15-летний период эксплуатации метрополитена все случаи пробоя кабелей ликвидировались либо отключением линии непосредственно быстродействующим автоматом, либо тем же автоматом в результате срабатывания защиты линии постоянного тока. Зафиксировано 4 случая работы токовой защиты при пробое кабелей. Во всех четырех случаях работа защиты была правильной. Другие виды защиты, описанные в настоящей статье, не имели случаев срабатывания, ввиду отсутствия повреждений.

Литература

1. Е. И. Горин. Опыт эксплуатации туннельных прокладок кабелей. Сборник статей «Эксплуатация кабелей и кабельных сетей», Госэнергоиздат, 1949.
2. Е. И. Горин. Эксплуатация кабелей в сети метрополитена на вертикальных участках. Технико-информационный бюллетень ОБТИ при заводе «Москабель» № 1, 2, 1941.
3. С. П. Домбровский. Опыт эксплуатации концевых заделок кабелей тяговой сети 825 в. Сборник статей «Эксплуатация кабелей и кабельных сетей». Госэнергоиздат, 1949.
4. Е. И. Горин. Повреждения и защита кабелей метрополитена от вращений. Советский метрополитен № 3, 1940.
5. Л. Б. Кротов. Опыт профилактических испытаний кабелей тяговой сети 825 в. Сборник статей «Эксплуатация кабелей и кабельных сетей». Госэнергоиздат, 1949.
6. К. Г. Марквардт. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог. Трансжелдориздат, 1948.
7. Е. И. Горин и Л. Б. Кротов. Защита фидерной контактной сети метрополитена. Советский метрополитен, № 8, 1940.



Рациональная схема ввода в эксплуатацию новых электролизных ванн¹

Инж. К. А. ПРЕЙС и инж. С. Н. ШОЙХЕТ
г. Березники

В промышленных установках электролиза весьма распространенной схемой питания постоянным

является параллельное включение всех ванн на сборные шины источника постоянного тока (выпрямительная подстанция, турбогенераторная станция).

Перевод электролизных цехов на более совершенные типы ванн обычно связан с более высокой нагрузкой на серии, но существующая схема электроснабжения заставляет довольно длительное время (1—2 года) совмещать работу ванн старого и нового типов. Ванны нового типа, особенно в пусковом периоде, длятся 3—4 недели, могут работать при более высокой нагрузке, чем сменяемые ими ванны.

Токовая нагрузка каждой из параллельно включенных на общие шины серий определяется напряжением на шинах и электрическим сопротивлением каждой серии. На сериях ванн одинакового типа при неизменном напряжении на шинах нагрузка снижается с ухудшением технического состояния ванн по мере удлинения времени работы между ремонтами.

Для принятия полной повышенной (обычно на 70% и более) нагрузки серий ванн нового типа необходима коренная реконструкция распределительного устройства станции постоянного тока с заменой на более мощные серийных выключающих аппаратов, шунтов с измерительными приборами и т. д.

При появлении более производительной и экономичной ванны нового типа всегда целесообразно внедрить ее в производство в возможно короткий срок без перерыва в работе цеха. Производство же, размещение заказов, получение нового электрооборудования и выполнение реконструкции тяжелого многоамперного распределительного устройства требуют практически нескольких лет. Во избежание перегрузки распределительного устройства новым пусковым сериям приходится монтировать

Описывается автономная схема питания новых типов электролизных ванн от отдельного генератора в пусковом периоде.

вать ванны нового типа в общие серии со старыми ваннами, имеющими

сопротивление, значительно более высокое, чем новые (рис. 1). Ванны нового типа, в количестве 30—40% от общего числа ванн, распределяются в пусковой серии среди ванн старого типа и при сниженном напряжении на общих шинах и питании холодным рассолом (для искусственного увеличения омического сопротивления серии) включаются в работу вместе со всей серией.

Для сохранения производительности цеха старые ванны работают с недопустимо высокой для них нагрузкой, а потери электроэнергии в них и в подводке растут пропорционально квадрату тока. Ванны же нового типа вынуждены работать с недогрузкой, со снижением выпуска продукции против своей нормальной производительности и повышением удельного расхода электроэнергии против расхода при их нормальной нагрузке.

При пуске серий с ваннами нового и старого типов (смешанные серии) приходится снижать напряжение на общих шинах на 2—3 суток для уменьшения нагрузки на вновь смонтированной серии. Последующий подъем напряжения и нагрузки неизбежно уменьшает производительность цеха и вызывает повышенный удельный расход электроэнергии.

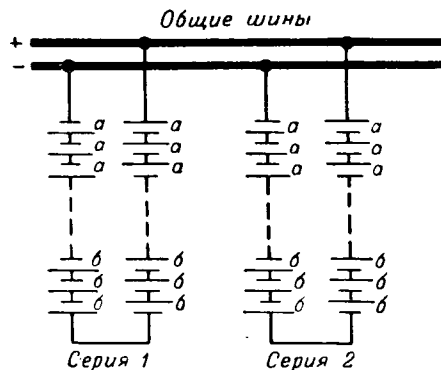


Рис. 1. Включение ванн разных типов в одну серию.
а — ванна старого типа, б — нового.

¹ За предложение „Пусковая схема включения электролизных ванн новых типов при параллельной схеме электроснабжения цеха от общих сборных шин“ авторам присуждена пятая премия на конкурсе по экономии электроэнергии ВНИТОЭ за 1949 г.

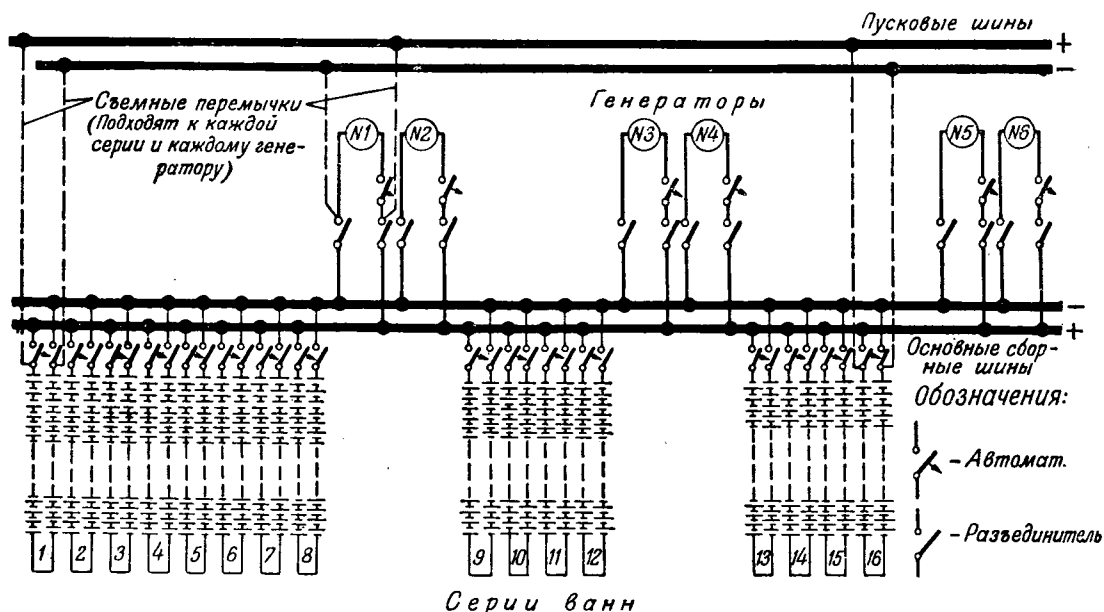


Рис. 2. Принципиальная схема электроснабжения цеха электролиза с питанием пусковых серий от отдельного генератора.

В результате длительный переходный период характеризуется колоссальным перерасходом электроэнергии, составляющим 10—12% и более от всего расхода, перерасход достигает миллионов киловаттчасов в год дорогостоящей электроэнергии постоянного тока для каждого цеха, переходящего на новый тип электролизных ванн.

По предложенной и осуществленной нами на одном из электрохимических заводов схеме пусковая серия, собранная полностью из ванн нового типа, во время пускового периода питается от отдельного генератора. Тем самым пуск и работа пусковой серии могут происходить при повышенной нагрузке независимо от остальных включенных серий, питаемых от параллельно работающих генераторов или выпрямителей станции.

На пусковой схеме новая серия работает до естественного снижения на ней нагрузки до величины, позволяющей ее включить на общие шины через имеющуюся в распредустройстве аппаратуру и измерительные приборы.

Пусковая схема (рис. 2) состоит из ошиновки, рассчитанной на нагрузку одной или двух пусковых серий (в зависимости от мощности генераторных единиц станции по отношению к нагрузке серии), двух съемных шинных или кабельных перемычек от генераторных шин к пусковым шинам и двух или четырех перемычек от серийных шин к пусковым шинам.

Сечение пусковых шин и генераторных пере-

мычек выбирается по нагрузке одной или двух пусковых серий, сечение серийных перемычек — по нагрузке одной серии.

Для обеспечения достаточной гибкости схемы каждый генератор и каждая серия ванн могут переключаться на пусковую схему с помощью переставляемых стандартных генераторных пусковых перемычек. Длина пусковой ошиновки определяется по месту.

Такая несложная схема без особых затруднений может быть выполнена во всех подобных установках и вовсе не требует безвозвратной траты материалов, эффект же по экономии электроэнергии весьма значителен.

Если в первые 10 мес. перехода на новые ванны с использованием смешанной схемы (рис. 1) цех перерасходовал против нормы более 2 000 000 квтч, то в последующие 14 мес., работая по пусковой схеме (рис. 2), была получена против той же нормы экономия порядка 1 400 000 квтч; общая экономия по сравнению с первым периодом работы по схеме рис. 1 составила около 3 800 000 квтч.

Без применения пусковой схемы предприятие могло бы пользоваться преимуществами более совершенных ванн лишь после замены аппаратуры в распредустройстве, которая часто отстывает, и после окончания замены всех ванн, чего потребовалось бы более двух лет.

[Р. 1.]



РАБОТА КОНДЕНСАТОРНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ НА ШАХТАХ ДОНБАССА

В журнале «Электричество», № 7, 1949 г. была опубликована статья В. Е. Розенкранца, М. И. Крайцберга и Б. Н. Техменева «Рудничный электровоз переменного тока с конденсаторным двигателем». В статье было дано описание конденсаторного двигателя и оборудованного им электровоза для работы в шахтах. Приведены схемы и характеристики двигателя. По разработанному образцу была сделана опытная партия электровозов, которую направили для испытания в производственных условиях работы на шахтах. Результаты почти годовой эксплуатации приводятся в реферлируемой статье.

На основании проведенных специальной комиссией Министерства угольной промышленности СССР наблюдений можно констатировать, что разработанный тип электровоза вполне удовлетворяет условиям работы в шахтах и значительно лучше электровозов, работающих на постоянном токе.

К достоинствам нового электровоза надо отнести следующие. Хороший токосъем при удовлетворительном состоянии контактной сети. При отрывах токоприемника от провода не получается устойчивой дуги, характерной для постоянного тока. Дуга переменного тока невелика и гаснет быстро.

Наличие шунтовой характеристики у двигателя оказалось весьма удобным в шахтных условиях. При шунтовой характеристике средняя скорость движения состава весьма близка к максимальной. Кроме того, она благоприятно сказывается на уменьшении буксования, так как торность буксующей оси не может превысить синхронной скорости.

Для торможения состава весьма удобен свойственный синхронной машине автоматический переход на генераторный режим при сверхсинхронной скорости. Это свойство конденсаторных электровозов машинисты используют при спусках груженых составов. Износ колодок и бандажей у этих электровозов меньше, чем у электровозов постоянного тока.

Конденсаторные электровозы предъявляют повышенные требования к проводимости рельсовой сети. Это обусловлено, с одной стороны, тем, что момент, развиваемый асинхронным конденсаторным двигателем, пропорционален квадрату приложенного напряжения, и, следовательно, величина момента резко уменьшается при плохой проводимости сети; с другой стороны, хорошая проводимость рельсовой сети необходима для безопасной эксплуатации электровозной откатки.

Все рельсовые стыки должны иметь приварные электрические соединения. На расстоянии не больше 50 м друг от друга надо устанавливать междурельсовые приварные электрические соединения. Желательно применение стального троса, уложенного вдоль пути и электрически соединенного с каждым звеном. Рельсовые пути должны быть заземлены через каждые 150 м.

Напряжение переменного тока составляет 400 в, в связи с чем необходимо учитывать повышенную опасность при обслуживании электровозов и сети.

Отсутствие преобразовательных подстанций значительно упрощает электровозную откатку, снижает капитальные затраты и эксплуатационные расходы. В эксплуатационном отношении откатка этими электровозами более надежна, чем электровозами постоянного тока.

(Уголь, № 5, 1950, Н. А. Староскольский)

М РУБЕЖОМ

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БОЛЬШОЕ РАССТОЯНИЕ

(Обзор)

Проблема передачи электроэнергии на большое расстояние интенсивно изучается, в особенности советскими исследователями. В результате исследовательских и проектных работ советские инженеры и ученые пришли к ряду выводов, характеризующих весьма важные стороны этой проблемы.

Приводим некоторые из этих выводов.

1. Оптимальные экономические и технические характеристики дальней передачи могут быть достигнуты путем максимального увеличения нагрузки на одну цепь. Однако, справедливо лишь для изолированной дальней передачи, вне анализа характеристик объединенной энергетической системы, который может изменить соотношения.

2. Работа систем дальних передач переменного тока высокого и сверхвысокого напряжения с глухозаземленной нейтралью безусловно целесообразна, так как это снижает стоимость передачи и требования к уровням изоляции системы.

3. Работу дальних передач целесообразно осуществлять без перепада напряжения между отправным и приемными концами линии. Это диктуется требованиями надежности параллельной работы и экономичности. Кроме того, при максимальных нагрузках передача должна работать с наивысшим длительно допустимым в эксплуатации напряжением на обоих ее концах.

4. Для получения экономичной работы дальней передачи необходимо применять провода высокой проводимости с отношением активного сопротивления к реактивному порядка 0,1.

5. Необходимо применение комплекса мероприятий, повышающих пропускную способность одной цепи дальней передачи, определяемую из условий устойчивости параллельной работы.

Таковыми мероприятиями могут быть: применение расцепленных проводов; улучшение характеристик генераторов и трансформаторов; применение шунтирующих реакторов; специальные автоматические методы регулирования возбуждения синхронных машин; продольная емкостная компенсация; связанные схемы для многоцепных линий передачи с несколькими переключаемыми пунктами по длине линии; применение быстродействующей коммутационной аппаратуры и релейной защиты; повышение динамической устойчивости передачи; повышение надежности электрической и конструктивно-строительной части линий и подстанций, резко снижающее аварийность.

6. Пропускная способность дальней передачи в значительной мере зависит от мощности приемной системы: чем выше мощность, чем теснее связи внутри системы, тем при прочих равных условиях больше пропускная способность.

Проблема передачи электроэнергии на дальнее расстояние является темой ряда статей инж. Крэри. В них он пытается подвести итоги современным исследованиям в области техники дальних передач переменного тока.

По некоторым вопросам Крэри пришел к тем же выводам, что и советские авторы, например: о преимуществе для дальних передач глухого заземления нейтрали; о работе дальних передач без перепада напряжения при максимально допустимом уровне напряжения на обоих концах линии; о необходимости применения компенсации линии, в частности, продольной емкостной компенсации; о необходимости применения переключательных пунктов и связанных схем для многоцепных дальних передач. Однако большинство этих выводов сформулировано в весьма общей форме.

Очень многие положения в работах Крэри нуждаются в исправлениях и оговорках, ряд положений вовсе ошибочен.

Крэри пытается анализировать экономические и технические характеристики дальней передачи, рассматривая ее оторванно от питающей станции и от приемной системы, что приводит его к неполным, а иногда и неверным выводам. В реальных условиях дальние передачи должны обладать весьма высокой степенью гибкости в регулировании режима работы. Крэри же считает, что методы компенсации линии находятся в противоречии с применением для дальних передач трансформаторов с регулируемым коэффициентом трансформации под нагрузкой.

Неправильно положение, что применение продольной емкостной компенсации ограничено линиями длиной выше 300 км и что применение напряжения выше 360 кВ ограничивает высокая стоимость трансформаторов. Число таких примеров можно было бы увеличить.

Последняя работа Крэри, опубликованная в ноябрьском номере Electrical Engineering за 1950 г., может служить иллюстрацией неправильной оценки им ряда вопросов исследования и проектирования дальних передач. Краткое содержание этой работы изложено ниже.

Пределы пропускной способности дальних передач и влияние отдельных факторов. Автор приводит результаты исследований двухцепной дальней передачи (рис. 1) длиной около 1 000 км (600 миль), сравнивая ее по пропускной способности с передачей длиной 320 км (200 миль). На рис. 2 для некомпенсированной передачи длиной около 1 000 км и для различных значений постоянной времени цепи возбуждения T_e приведены кривые пропускной способности двухцепной передачи при трехфазном коротком замыкании вблизи отправного конца передачи в функции времени устранения повреждения (время действия релейной защиты плюс время действия выключателя). Предельная мощность передачи дана в единичных значениях, за единицу приняты значения натуральной мощности, приведенные в таблице.

Натуральная мощность двухцепной линии при волновом сопротивлении одной цепи 400 Ом

Напряжение, кВ	Мощность, кВА	Напряжение, кВ	Мощность, кВА
360	650 000*	161	130 000
287	412 000	115	66 000
230	264 000	69	24 000

Для передачи длиной 320 км, при времени устранения повреждения $t = 0,06$ сек и $T_e = 0,68$ предельная мощность равна 1,065, или 440 000 кВА при 287 кВ, 692 000 при 360 кВ и 866 000 кВА при 360 кВ и расщепленных на два фазных провода. Для некомпенсированной линии длиной 1 000 км при той же присоединенной генерирующей мощности и при тех же t и T_e предельная мощность составляет 0,735 (330 000 кВА при 287 кВ), или 69% от пропускной способности передачи длиной 320 км.

Действие переключательных пунктов. Для дальней передачи на 1 000 км при постоянстве напряжения за переходным реактивным сопротивлением и суммарном времени устранения повреждения в 0,05 сек в случае отсутствия переключательных пунктов предел мощности равен 0,3; при трех переключательных пунктах — 0,63, при пя-

* Расщеплением проводов фазы на два натуральная мощность увеличивается приблизительно на 25% и для напряжения 360 кВ равна 813 000 кВА.

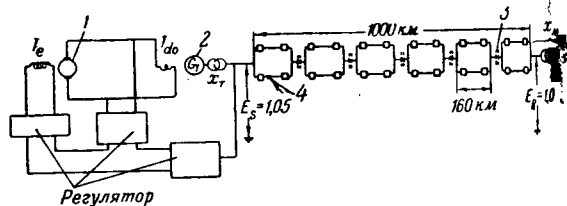


Рис. 1. Система передачи длиной 1 000 км.

1 — возбуждатель; 2 — генератор; 3 — батарея последовательно соединенных конденсаторов; 4 — место трехфазного короткого замыкания. E_s — напряжение на отправном конце; E_r — на приемном конце. Параметры системы: синхронная продольная реактивность генератора $x_d = 0,63$, поперечная $x_q = 0,42$; переходная продольная реактивность $x'd = 0,21$; постоянная инерции генератора $H_g = 5$ сек; потолок возбуждения возбуждателя $2,45 U_n$; реактивность трансформатора $0,1$; реактивность линии $x = 0,438$ Ом/км одной цепи; $r = 0,0745$ Ом/км одной цепи; эквивалентная реактивность приемной системы x_m ; постоянная времени приемной системы 50 сек).

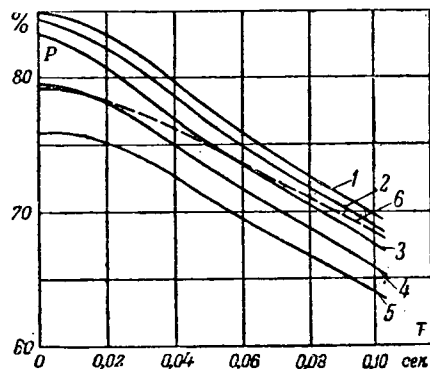


Рис. 2. Предел мощности отправного конца передачи P в зависимости от времени T устранения трехфазного короткого замыкания на головном участке передачи для различных значений постоянной времени T_e цепи возбуждения:

1 — $T_e = 0,42$ сек; 2 — 0,17; 3 — 0,68; 4 — 2,7; 5 — 11 сек. Кривая 6 — предел мощности P в зависимости от времени T устранения короткого замыкания при постоянном напряжении за переходной реактивностью.

ти он увеличивается более чем вдвое — до 0,735 (с 124 000 до 303 000 кВА при 287 кВ).

Продольная емкостная компенсация. Для той же дальней передачи (рис. 1) при 75% продольной емкостной компенсации пропускная способность увеличивается на 45% — до 1,07, или до 441 тыс. кВА при 287 кВ (рис. 3). Таким образом, 75%-ная компенсация увеличивает пропускную способность дальней передачи в 1 000 км до значения для передачи длиной 320 км.

Влияние величины продольной компенсации на пропускную способность дальней передачи рис. 5 показано на рис. 4.

Промежуточные установки синхронных компенсаторов Установка вдоль линии дальней передачи синхронных компенсаторов, имеющих пониженные переходные реактивные сопротивления по сравнению с обычными, является эффективным методом повышения пропускной способности передачи. Лучшее размещение синхронных компенсаторов вдоль линии зависит в числе других факторов также от положения места повреждения. Напряжения для системы рис. 5 установка синхронных компенсаторов мощностью 1,25 с активным сопротивлением 0,25 на половине длины линии увеличивает пропускную способность передачи с 0,71 до 0,90. Если ту же самую мощность синхронных компенсаторов разместить равномерно в пяти промежуточных пунктах, предел мощности передачи увеличивается до 0,98. Если система имеет промежуточные грузки, требующие установки синхронных компенсаторов, преимущества применения синхронных компенсаторов увеличиваются.

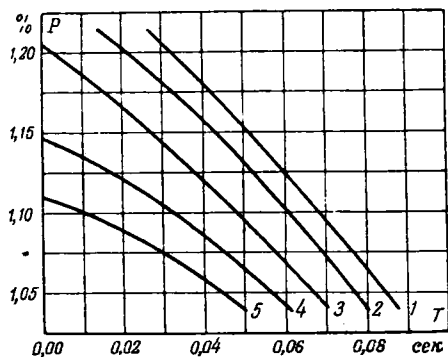


Рис. 3. Предел мощности отправного конца передачи рис. 1 в зависимости от времени устранения короткого замыкания для различных значений постоянной времени T_e цепи возбудителя. 1 — $T_e = 0,042$ сек; 2 — 0,17; 3 — 0,68; 4 — 2,7; 5 — 11 сек.

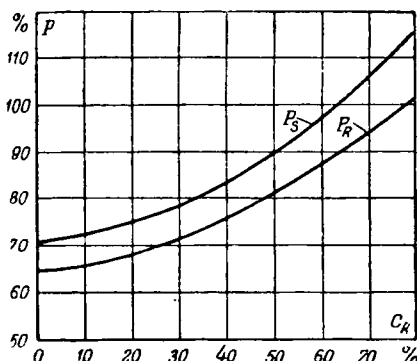


Рис. 4. Пропускная способность двухцепной передачи рис. 5 в зависимости от величины продольной емкостной компенсации. Пять переключаемых пунктов (P_S — мощность на отправном конце; P_R — на приемном).

Поперечная компенсация. Поперечная компенсация линии путем включения в промежуточные точки линии угловых реакторов с регулируемым потреблением энергии также увеличивает пропускную способность линии. Поперечная компенсация, установленная только по сере-

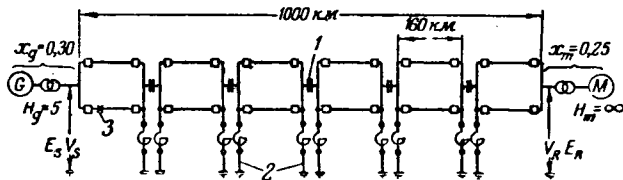


Рис. 5. Схема передачи продольной емкостной компенсации. 1 — последовательные конденсаторы; 2 — шунтовые реакторы; 3 — место трехфазного короткого замыкания.

дине линии, увеличивает предел мощности системы (рис. 5) с 0,71 до 0,95.

Соединение дальней передачи с промежуточной мощной системой. На рис. 6 приведена схема, на которой исследовалось влияние на ее пропускную способность мощной системы, присоединенной на половине длины линии.

На схеме а рис. 6 показана передача на первоначальной ступени развития; б — после присоединения дальней передачи к станции G_2 ; в — по середине линии подсоединена вторая промежуточная станция; г — применена продольная емкостная компенсация первой половине дальней передачи. Для схемы а предел мощности для станции G_1 равен 1,33, для схемы б и станции 1 — 1,33, а для станции 2 — 0,4.

В схеме в предельная мощность более удаленной станции G_2 увеличивается до 0,85, и общая предельная мощность составляет 2,18; в схеме г предел мощности этой станции равен 1,00, и общая предельная мощность двух станций достигает 2,33.

При 100%-ном увеличении эквивалентного реактивного сопротивления приемной системы пропускная способность дальней передачи уменьшалась на 15%; таким образом, при проектировании приемной системы, которая должна получать большую мощность от дальних передач, очень важно уменьшить ее эквивалентное реактивное сопротивление, насколько это практически возможно по разрывным мощностям выключателей.

При удвоении мощности промежуточной станции (рис. 6, б) предел мощности удаленной станции увеличился с 0,4 до 0,85, при утроении он становится равным 0,9. Сравнение схем в и г показывает, что присоединение мощной промежуточной системы может обеспечить с меньшими затратами пропускную способность дальней передачи того же порядка, что и при применении продольной емкостной компенсации.

Автор приходит к заключению, что передачу с высокой нагрузкой на цепь можно осуществить даже для расстояний порядка 1 000 км, если высоковольтные линии непосредственно связаны друг с другом и мощность станций приемной системы в 2—4 раза более мощности уда-

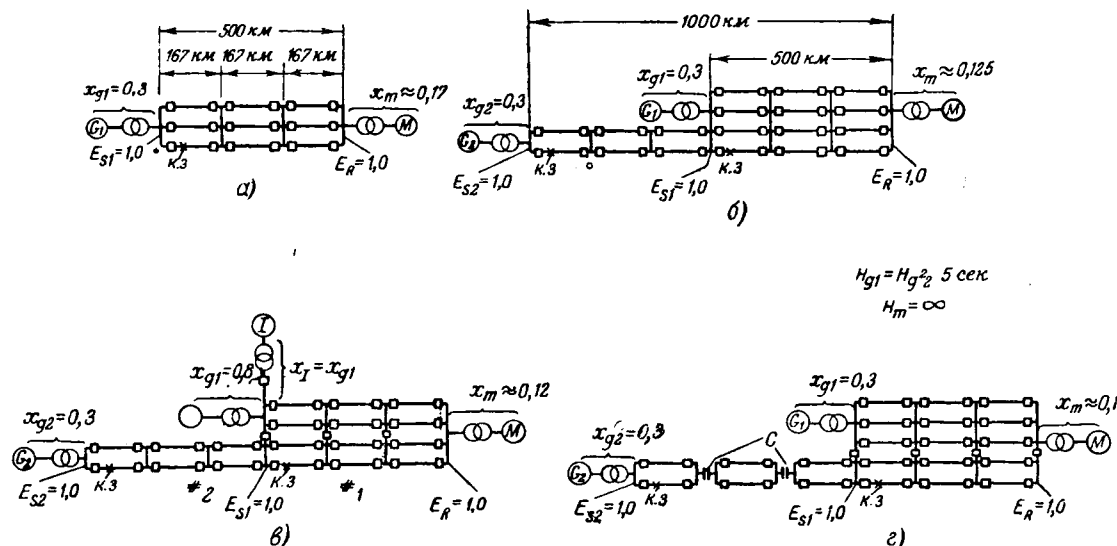


Рис. 6. Схема дальней передачи, связанной с промежуточной системой.

ленной станции. Следует иметь в виду, что применение переключательных пунктов и снижение реактивного сопротивления приемной системы также является необходимым.

Выводы. 1. Создание мощных электростанций, питающих удаленные от них центры энергопотребления по линиям дальних передач длиной порядка 1000 км с нагрузкой 500—600 тыс. квт на цепь, несовместимо с капиталистической системой хозяйства. Решение этой задачи возможно лишь в условиях социалистического общества.

2. Оценка использования присоединения к дальней передаче промежуточной системы для увеличения пропускной способности передачи завышена. Выводы сделаны в предположении присоединения через весьма низкое реактивное сопротивление промежуточной станции, мощность которой втрое превосходит мощность удаленной станции, причем при увеличении числа цепей дальней передачи пропорционально возрастает мощность приемной системы.

3. Осуществить продольную емкостную компенсацию 75% реактивного сопротивления линии практически затруднительно вследствие значительного повышения токов короткого замыкания и чрезмерного повышения напряжения на конденсаторах при авариях. Практически приемлемые значения компенсации лежат в пределах 20...50%.

Включение батарей статических конденсаторов между шинами переключательных пунктов является неправильным.

4. Использование для расчета случая трехфазного короткого замыкания с целью определения пропускной способности дальней передачи, по условиям динамической устойчивости, не оправдано для линий напряжением 220 кв и выше.

5. В работе недооценивается значение расщепления проводов дальней линии передачи как весьма эффективного мероприятия по повышению пропускной способности передачи.

6. Применение промежуточных установок синхронных конденсаторов является малоэкономичным средством повышения пропускной способности передачи.

7. Требование сохранения предельной пропускной способности линии при потере одного участка не оправдано и излишне утяжеляет передачу.

8. Ряд важнейших вопросов, имеющих решающее значение при проектировании схем дальних передач, в реферированной статье совершенно обойден, например, не рассмотрены: режим работы удаленной станции и стоимость ее энергии, график работы дальней передачи, характеристика и структура приемной системы, нестационарные и особые режимы работы дальней передачи, характеристики генераторов, требования к конструктивно-строительной части передачи, электрическим схемам, аппаратуре, к релейной защите и т. д. Вовсе не рассматривается вопрос о характеристиках и не дана оценка блочным схемам дальних передач

9. Работу Крэри можно рассматривать как попытку подвести итоги немногим, весьма предварительным, следованиям, содержащую к тому же ряд ошибок выводов.

Литература

1. К. А. Круг. Проблема передачи электроэнергии на сверхдальние расстояния. *Электричество*, № 3, 1946.
2. П. С. Жданов. Устойчивость электрических систем при перегрузках. *Электричество*, № 3, 1946.
3. П. С. Жданов. Перспективы передачи энергии переменным током на большие расстояния. *Электричество*, № 4, 1946.
4. П. С. Жданов, В. А. Веников и Г. М. Романов. Электропередача 400 кв переменного тока. *Электричество*, № 11, 1948.
5. А. А. Вульф. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям. Госэнергоиздат, 1941.
6. А. А. Вульф. Некоторые характерные режимы длинной электропередачи. Соорник Гидроэлектропроект № 5, электротехнический выпуск, 1938.
7. С. А. Лебедев. Исследование искусственной устойчивости. Труды ВЭИ, вып. 40, Госэнергоиздат, 1948.
8. Г. И. Атабеков. Защита длинных и сильно нагруженных линий электропередачи. *Электричество*, № 1917.
9. Л. Е. Машкилейсон. Расщепление проводов линий электропередачи. *Электричество*, № 3, 1925.
10. Г. М. Розанов. Расчет расщепленных проводов линии 400 кв. *Электричество*, № 6, 1949.
11. В. А. Веников, Г. М. Розанов и Н. Н. Колов. Характеристика электропередачи переменного тока на большие расстояния. *Электричество*, № 7, 1948.
12. Н. Н. Крачковский. Блочная передача энергии. *Электричество*, № 4, 1950.
13. А. Б. Крикунчик. Наши задачи в области применения трехфазного тока 400 кв. *Электричество*, № 11, 1948.
14. S. V. Craгу and I. R. Johnson. Экономия передачи энергии переменным током на дальние расстояния. *AIEE Transactions*, v. 66, p. 1092, 1947.
15. S. V. Craгу. Экономические исследования дальних передач переменного тока. Доклад № 414 на 6-й мирной конференции по мощным сетям высокого напряжения, 1948.
16. S. V. Craгу. Влияние систем возбуждения на дальние передачи. *AIEE Transactions*, v. 65, p. 974, 1947.
17. Rathsmann and Rusck. Шведская система 380 кв. *El. Eng.*, v. 68, № 12, 1949.
18. S. V. Craгу. Дальняя передача энергии. *El. Eng.*, v. 69, p. 924, November 1950.

Инж. С. С. РОКОТЯ

МЕТАЛЛОБУМАЖНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

(Обзор)

Мы уже сообщали раньше о новом типе конденсаторов, изготовленных из оуаги, покрытой тонким слоем металла (порядка 0,1 мкм) и обладающих свойством самовосстанавливаться после пробоя¹.

В последнее время по вопросу о производстве и исследовании этого интересного типа бумажных конденсаторов был опубликован ряд работ. Обычно в качестве металла, служащего для создания проводящего слоя на бумаге, используется цинк; толщина цинкового слоя составляет 0,06 ÷ 0,12 мкм при толщине оуаги 7,5 мкм; имеется указание о применении алюминия вместо цинка; при этом приходится повышать температуру испарителя до 1500°С и снижать остаточное давление в металлизационной камере до 3 ÷ 4 · 10⁻³ мм рт. ст.

Замена цинка алюминием уменьшает угол потерь конденсатора и облегчает контактирование секций.

Перед металлизацией проводится лакировка бумаги. Обычно применяют ацетилцеллюлозный лак. Толщина лакового слоя около 0,7 ÷ 0,8 мкм. Применение лака дает следующие преимущества: улучшает электрическую прочность, повышает сопротивление изоляции, ослабляет атмосферную коррозию при хранении металлизированной оуаги и уменьшает опасность электролитического разрушения металлических конденсаторов, что дает увеличение срока службы конденсаторов.

Старение металлобумажных конденсаторов в отличие от обычных фольговых бумажных конденсаторов в большей степени обусловлено не постепенным разрушением диэлектрика, а постепенным разрушением обкладок, приводящим к снижению емкости и ухудшению других эл.

¹ *Электричество*, № 8, 1946 и № 7 и 9, 1947.

ческих характеристик. Скорость разрушения обкладок в первом приближении определяется уравнением

$$-\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{U_0 M}{160 D R n p},$$

δ — толщина слоя, Å;

τ — время в сутках;

U_0 — постоянное напряжение, приложенное к конденсатору, в;

ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;

D — толщина диэлектрика, тысячные дюйма;

R — сопротивление изоляции, мгом·мкф;

M — атомный вес металла, нанесенного на бумагу;

n — его валентность;

p — его плотность.

Испытательное напряжение для металлобумажных конденсаторов составляет $1,5 U_{\text{раб}}$. Они могут достаточно хорошо работать при напряжениях до $1,25 U_{\text{раб}}$. Кратковременное перенапряжение не представляет опасности, как после пробоя конденсатор самовосстанавливается, длительное приложение напряжения, равного $2 \div 3 U_{\text{раб}}$, один конденсатор из строя. Применение переменного напряжения с амплитудой, равной номинальному постоянному рабочему напряжению, конденсатор выдерживает хорошо. При хранении без напряжения в течение двух при $+20^\circ \text{C}$ и $+50^\circ \text{C}$ никаких признаков старения замечено не было. При температуре -40°C емкость металлобумажных конденсаторов снижается на 5%, а при температуре $+50^\circ \text{C}$ на 1,5% по сравнению с исходным значением, измеренным при комнатной температуре. Толщина времени при 25°C должна быть не менее мгом·мкф, фактически она составляет $2000 \div 6000$ мгом·мкф. Тангенс угла потерь для конденсаторов емкостью $0,1 \div 2$ мкф при 25°C составляет: при ω от 0,005 до 0,007, при 5 кГц от 0,008 до 0,011, при ω от 0,010 до 0,017 и при 50 кГц от 0,025 до 0,070; такие значения соответствуют большей емкости. При температуре $+65^\circ \text{C}$ и частоте 1 кГц угол потерь снижается на 30% по сравнению с его значением, измеренным при комнатной температуре. При работе в течение 1 час и номинальном рабочем напряжении при температуре $+65^\circ \text{C}$ снижения емкости не обнаружено, $\text{tg } \delta$ снижился на 20%; за то же время при $+85^\circ \text{C}$ произошло снижение емкости на 3% и увеличение $\text{tg } \delta$ на 1/2, при температуре 100°C за 5000 час емкость упала на 1/2, а $\text{tg } \delta$ возрос на 65%.

Ранее металлобумажные конденсаторы применялись только в радиотехнике и технике проводной связи. В последнее время их начали применять также и в технике сильных токов и высоких напряжений. В частности, следует отметить применение этих конденсаторов для повышения коэффициента мощности и для конденсаторов электродвигателей.

(Proceedings. IRE, т. 38, № 9, стр. 1010, 1950, D. M. Lean;

Proceedings. IRE, т. 38, № 9, стр. 1015, 1950, J. Weeks;

Electronics, т. 23, № 10, стр. 122, 1950, J. Fischer;

ETZ, т. 71, № 8—9, стр. 196, 1950, H. Wehe).

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ТРУБ

Выбор электрооборудования для привода вентиляторов аэродинамических труб представляется достаточно сложной задачей ввиду необходимости широкой регулировки скорости при большой мощности. На рис. 1 дан пример такого рода установки.

По своей простоте наиболее желательным типом двигателя является простой асинхронный с регулированием

скорости реостатом в цепи ротора. Однако несмотря на то, что при вентиляторной характеристике такой способ регулирования не вызывает больших потерь, он для привода аэродинамических труб мало пригоден. При скольжении, большем 50%, практически невозможно осуществить устойчивую работу вентилятора. Кроме того, на величину сопротивления реостата (обычно жидкостного) влияет его температура, что также затрудняет регулировку и поддержание заданной скорости.

Несмотря на это, асинхронные двигатели с регулируемой реостатом в цепи ротора применяли в некоторых больших трубах в США (Ланглей — два двигателя по 6000 кВт и Клевеленд — 13000 кВт).

Применяется также каскадное соединение с коллекторными машинами Шербиуса и Кремера. Иногда устанавливаются нерегулируемый двигатель возлагающий регулировку или на вентилятор (установка DLV в Берлине — 2000 кВт, регулировка поворотом лопастей вентилятора), или же на электродинамическую муфту, встраиваемую между двигателем и вентилятором (фирма Боинг, США, нерегулируемый синхронный двигатель 13000 кВт). Также применяются асинхронные двигатели, регулируемые изменением частоты (Ланглей — 12000 кВт, питаемые с ротора переменной частотой). Для питания таких приводов применяется синхронный генератор, приводимый от двигателя постоянного тока, питаемого, в свою очередь, от отдельного генератора (рис. 2).

Удобно для привода вентиляторов на постоянном токе использовать также схему двигатель—генератор (Англия — Фарнбор, 3000 кВт, регулировка 320—960 об/мин, Швейцария — Эмен — 2900 кВт). Иногда применяются двигатели постоянного тока, питаемые от управляемых выпрямителей (Германия, установка DLV, два двигателя по 4500 кВт на одном валу).

Для получения более экономичного устройства или при наличии особых требований удобны комбинированные установки. Так, например, в установке Керчис-Райт на одном валу два двигателя — асинхронный 6000 кВт с жидкостным реостатом в роторе и постоянного тока 900 кВт, питающийся от отдельного генератора. Регулировка от 50 до 570 об/мин.

Особый интерес представляют двигатели, применяемые для вращения воздушных винтов в макетах самолетов. Для соблюдения равенства аэродинамических условий число оборотов двигателя макета должно возрастать пропорционально уменьшению диаметра винта. Таким образом, если макет изготовлен в масштабе 1:10, то число оборотов должно увеличиться в 10 раз. Следовательно, двигатели макетов должны быть быстроходными. С другой стороны их диаметр должен быть незначителен для того, чтобы они могли разместиться в макете в предельно значенных им габаритах. Двигатели должны иметь водяное охлаждение, чтобы отбор воздуха для охлаждения не нарушил условий обтекания макета. Скорость их должна быть регулируема. Во Франции обычно применяются двигатели постоянного тока. В практике США мощности и скорости их весьма разнообразны — от 0,1 л. с. при 80000 об/мин и диаметре 4,5 см до 3000 л. с. при 2400 об/мин и диаметре 73 см. Питаются эти двигатели током переменной частотой от генератора, вращаемого двигателем с отдельным генератором постоянного тока.

В Швейцарской установке Эмен двигатели для макетов имеют мощность 31 л. с. при 3800 об/мин и 76 л. с. при 2350 об/мин. Двигатели имеют встроенную передачу, повышающую обороты до 10600 и 7050 об/мин. Диаметры их — 17 и 24 см. Частота питающего тока регулируется от 10 до 360 гц.

Автор подробно описывает две установки — Испано-Сюиза (Франция) и Эмен (Швейцария). Первая из них предназначена для испытания винтомоторных групп и фюзеляжей истребителей. Она оборудована асинхронным двигателем, 2850 кВт, 5500 в, 293 об/мин. Регулировка в сторону уменьшения от 293 до 100 об/мин жидкостным реостатом и в сторону увеличения от 293 до 330 об/мин системой Шербиуса. Все управление сосредоточено на центральном пульте вместе с измерительной аппаратурой аэродинамической части.

Установка Эмен рис. 2 предназначена для испытания макетов и небольших деталей — винтов, рулей и т. п. Двигатель постоянного тока 3900 л. с., 800 в питается от двух последовательно соединенных генераторов, сидя-

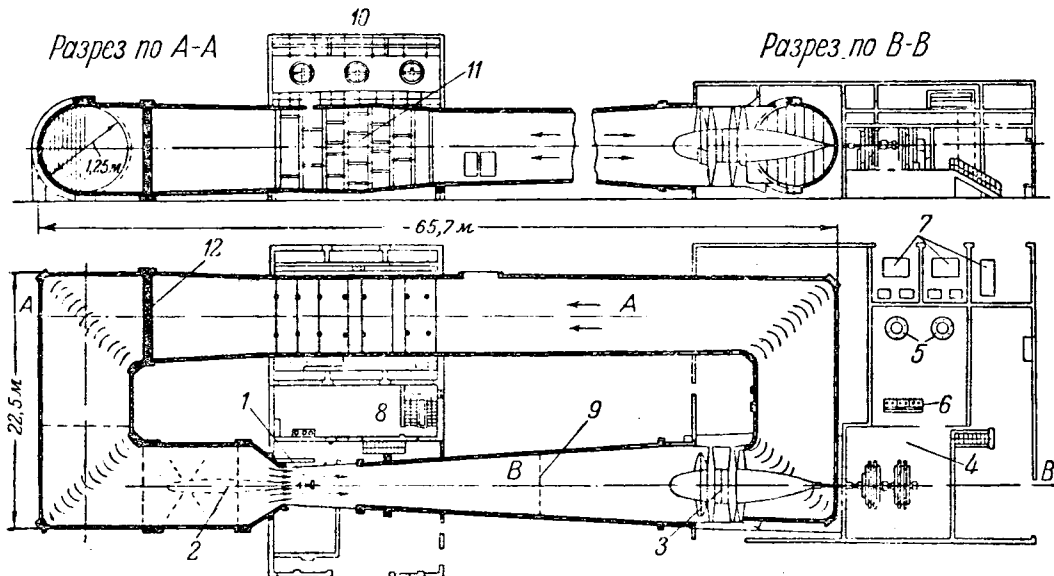


Рис. 1.

щих на одном валу с синхронным двигателем 3 550 квв, 3 000 в. Скорость регулируется от 100 до 4% с точностью $\pm 0,5\%$ от максимальной. В качестве компаратора в регуляторе использован резонансный контур, питающийся от тахогенератора переменного тока, связанного с валом главного двигателя. Нормально регулятор воздействует на

При необходимости экстренной остановки нажатие кнопки «стоп» выводит релюсты возбуждения генераторов и одновременно включается электрический тормоз тягача. Остановка от полной скорости требует 30 сек.

(Вулл. SFE, № 110, стр. 511)

Инж. Ю. И. АНОС

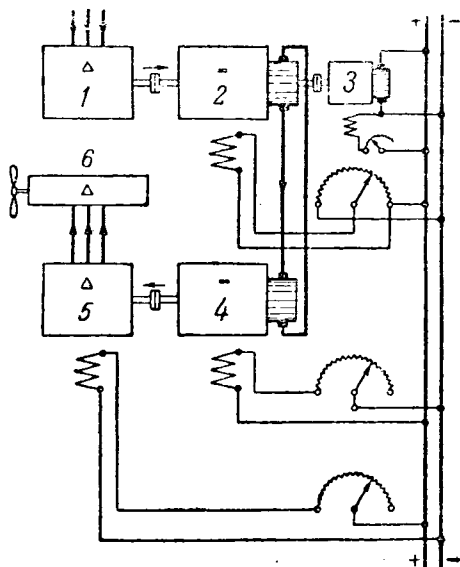


Рис. 2.

возбуждение двигателя. При отклонении скорости более чем на 1% регулятор воздействует на возбуждение генератора. Предусмотрен также регулятор, воздействующий на возбуждение двигателя при колебаниях частоты сети и быстродействующие регуляторы, стабилизирующие напряжение возбудителей. Помимо обычных защит—максимальной, дифференциальной и земляной на синхронном двигателе—между генераторами и двигателями установлен автоматический максимальный выключатель. Предусмотрены автоматы гашения поля генераторов при появлении кругового огня на коллекторе.

Механизмы защищены, кроме того, автоматом, быстро останавливающим установку в случае падения давления в системе смазки или при ненормальном повышении температуры подшипников.

ТАНТАЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Несмотря на то, что электролитические конденсаторы по своим электрическим свойствам уступают бумажным и выпрямленного тока, при напряжениях, не превышающих 500...600 в, в тех случаях, когда требуется максимальное снижение удельного объема конденсатора

Диэлектриком электролитического конденсатора служит тонкая пленка оксида алюминия, нанесенная электролитическим путем на фольгу, изготовленную из алюминия особо высокой степени чистоты (содержание примесей менее 0,05%). Алюминиевая фольга, несущая оксидную пленку, является первой обкладкой конденсатора; второй обкладкой служит электролит в виде водного раствора, налитого в конденсатор (жидкостный тип), или вязкого гликолевого раствора, пропитывающего бумагу или марлевую прокладку (сухой тип).

Кроме алюминия для изготовления электролитических конденсаторов был опробован также тантал (Transactions AIEE, т. 51, стр. 432 № 32, 1932). Однако его высокая стоимость заставила отдать предпочтение алюминию.

Применение тантала все же позволяет несколько улучшить характеристики электролитического конденсатора, что по своему качеству он начинает приближаться к бумажному конденсатору. Прежде всего оксид тантала обладает резко улучшенной химической стойкостью, расширяет номенклатуру электролитов, которые могут быть использованы в танталовых конденсаторах. Это обстоятельство значительно увеличивает срок службы и продолжительность хранения танталовых конденсаторов по сравнению с алюминиевыми. Удельное сопротивление оксида тантала резко повышено по сравнению с оксидной пленкой на алюминии, что позволяет заметно улучшить постоянную времени электролитического конденсатора, т. е. преодолеть один из главных недостатков конденсаторов этого типа—низкое сопротивление изоляции (большой ток утечки). Морозостойкость танталовых конденсаторов также выше, благодаря большей морозостойкости алюминия.

Диэлектрическая проницаемость оксида тантала на 50% больше проницаемости оксида алюминия, а механическая прочность тантала такова, что позволяет применять кладки меньшей толщины. Благодаря этим особенностям объем танталового конденсатора на 30% меньше объема обычного алюминиевого электролитического конденсатора.

Если принять объем бумажного конденсатора с фольжными обкладками за 100%, то при тех же номинальных значениях емкости и рабочего напряжения конденсатор из металлизированной бумаги имеет объем, равный 15%, обычный алюминиевый электролитический конденсатор — 15%, а танталовый — 10%.

В настоящее время применяют два типа танталовых конденсаторов — жидкостный и сухой. В жидкостном конденсаторе использован пористый цилиндрический анод, изготовленный прессованием из порошкообразного тантала последующим спеканием в вакуумной печи. В качестве электролита используется корпус конденсатора, представляющий собой тонкостенный цилиндр из серебра. В качестве электролита применен водный раствор хлористого натрия. Конденсатор рассчитан на рабочее напряжение 50 в и имеет емкость 4 мкф. При рабочем напряжении и температуре 25°С и выдержке под напряжением 10 мин конденсатор имеет постоянную времени 1000 мгом·мкф; при времени выдержки 30 мин — 1500 мгом·мкф. При температуре +60°С это значение снижается до 1000 мгом·мкф.

Сухой конденсатор изготавливается путем намотки двух танталовой фольги, одна из которых оксидирована, другая не оксидирована (у неполярных конденсаторов оксидированы обе фольги). Ленты разделены двумя слоями пористой бумаги, пропитанной электролитом, представляющим собой вязкий гликолевый раствор. Корпус конденсатора представляет собой медную серебряную трубку, закрытую с торцов резиновыми пробками, через которую пропущены выводные проводники. Конденсатор рассчитан на рабочее напряжение 150 в и имеет номинальную емкость 1 мкф; он может быть изготовлен в двух модификациях: полярной и неполярной. Постоянная времени этого конденсатора при рабочем напряжении и температуре 25°С после выдержки под напряжением 10 мин составляет 70 мгом·мкф, а после выдержки 30 мин увеличивается до 105 мгом·мкф (для обычного алюминиевого конденсатора при тех же условиях соответственно имеем 30 мгом·мкф). При температуре 60°С и выдержке 30 мин танталовый конденсатор имеет постоянную времени 40 мгом·мкф. Для алюминиевых конденсаторов характерно значительное возрастание тока утечки (снижение постоянной времени) при длительном хранении без напряжения; у танталовых конденсаторов это явление («расформовка») выражено гораздо слабее; по окончании 10 000 час. хранения в бездействии ток утечки алюминиевого конденсатора возрастает в 9 раз, а танталового только в 3 раза. Потери в танталовых конденсаторах относительно велики и мало снижены по сравнению с электролитическими конденсаторами; коэффициент мощности при 20°С и частоте 50 гц равен 1,5...1,7, а при частоте 1000 гц равен 6,5...9%.

В реферируемой статье особо отмечается, что танталовые конденсаторы сухого типа имеют резко повышенную морозостойкость и пригодны для работы при температуре до минус 60°С, в то время как нижний предел работоспособности у обычных алюминиевых конденсаторов составляет минус 40°С. В статье указано, что при минус 60°С танталовый конденсатор снижает емкость на 30% в то время как алюминиевый конденсатор при минус 60°С дает снижение емкости на 85%. Эти данные справедливы при частоте 1000 гц. Следует отметить, что электролитические алюминиевые конденсаторы типа, изготавливаемые в СССР, могут применяться при температуре до минус 60°С, максимальное снижение их емкости при этой температуре не превосходит 50% (при 50 гц). В любом случае можно полагать, что в отношении морозостойкости танталовый конденсатор будет иметь неоспоримое преимущество и при сравнении его с алюминиевыми конденсаторами отечественного изготовления. Основным преимуществом, несомненно, является повышенная постоянная времени.

Применение тантала, повидимому, не позволит изготовить конденсаторы нового типа с большими значениями

номинальной емкости, характерными для обычных электролитических конденсаторов, и заставит ограничиться значениями емкости, не превышающими нескольких микрофарад при относительно небольших рабочих напряжениях, когда размеры танталового анода могут быть достаточно малы.

(Bell. Laboratory Record, № 10, 1950, M. Whitehead)

Кандидат техн. наук В. Т. РЕННЕ

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ПОПЕРЕЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

В начале 40-х годов была разработана установка для горячего лужения стальной ленты шириной около 0,75 м, движущейся со скоростью около 400 м/мин. Мощность установки была 1200 квт. Применялся переменный ток радиочастоты, пропускавшийся по прямоугольному соленоиду, сквозь который двигалась лента. Магнитное поле, направленное вдоль ленты, индуцировало в ней вихревые токи, которые и нагревали ее.

В результате дальнейших опытов было установлено, что нагрев ленты из немагнитных материалов таким «продольным» магнитным полем неэффективен, так как из общего магнитного потока, развиваемого соленоидом, полезно используется лишь небольшая часть, проходящая через малое сечение ленты. На этом основании направление магнитного поля было изменено на перпендикулярное к поверхности ленты. При таком устройстве лента движется между противоположными полюсами

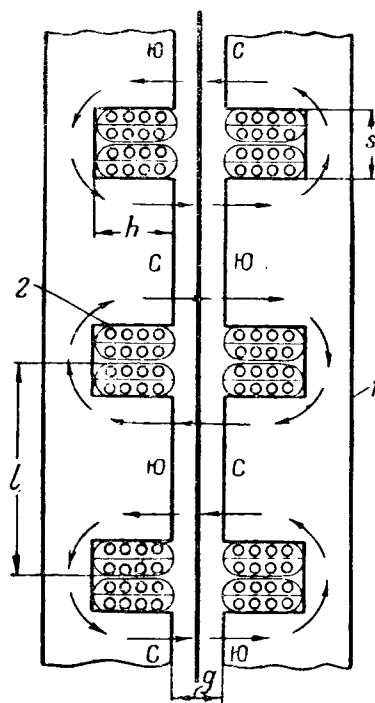


Рис. 1. Устройство электромагнитов и направление поперечных магнитных потоков.

1 — наборное ядро электромагнитной системы; 2 — изолированный медный провод обмотки; h — глубина паза; s — ширина паза; l — полюсное деление; g — воздушный промежуток.

электромагнитов и работает подобно короткозамкнутому витку в трансформаторе (рис. 1). Возникающие в ленте потери и производят желаемый нагрев.

Получение возможно лучшего соэф и к. п. д. связано с правильным выбором размеров воздушного промежутка в зависимости от удельного сопротивления материала ленты. На рис. 2 показаны кривые полного коэффициента

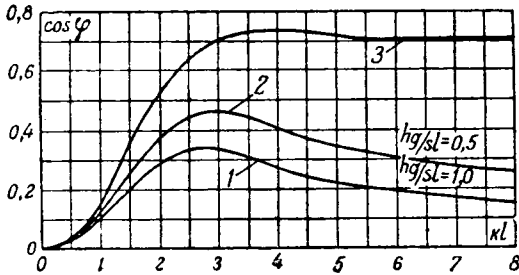


Рис. 2. Коэффициенты мощности катушки поля. 1 и 2 — коэффициент мощности на зажимах; 3 — внутренний коэффициент мощности.

мощности, на зажимах и внутреннего (в последнем не учтено рассеяние в пазу), как функции безразмерного параметра kl . В этом параметре l — полюсное деление, а

$$k = \sqrt{\frac{4\pi^2 ft \cdot 10^{-9}}{\rho g}} \quad (1)$$

где f — частота, $гц$;
 t — толщина ленты, $см$;
 ρ — удельное сопротивление, $ом/см$;
 g — воздушный зазор, $см$.

Две кривые коэффициента мощности на зажимах даны для пазов различной величины. Здесь h — глубина паза, а s — его ширина (то и другое в $см$). Как видно из рис. 2, коэффициент мощности на зажимах имеет максимум близ значения $kl \approx 2,5$.

Следует отметить, что автор не указывает, получены ли кривые на рис. 2 расчетным путем или на основании произведенных опытных измерений.

Расчет для определения частоты делается по уравнению (1), что дает:

$$f_0 = \frac{1,58 \rho g}{l^2} \cdot 10^8 \text{ гц.}$$

Некоторая осторожность должна быть проявлена при выборе полюсного деления по отношению к ширине ленты и при выборе размеров паза по отношению к полюсному делению. Автор рекомендует пользоваться величинами: $s/g = 1,0$; $s/l = 0,25$; $h/s = 2,0$ и $b/l = 4,0$ или больше (b — ширина ленты, $см$).

Если полюсное деление слишком велико по сравнению с шириной ленты, то трудно выдержать равномерный нагрев по всей ширине ленты.

Удельная мощность, вводимая в ленту,

$$w a = \frac{2,5 g f H_0^2}{t} M(kl) \cdot 10^{-8} \text{ вт/см}^3, \quad (2)$$

где $M(kl)$ — функция kl , показанная на рис. 3, а H_0 — намагничивающая сила на кромке полюсного деления рассчитанная по формуле

$$H_0 = \frac{0,4\pi(2\tau_c) I_c}{g} [\text{эп}],$$

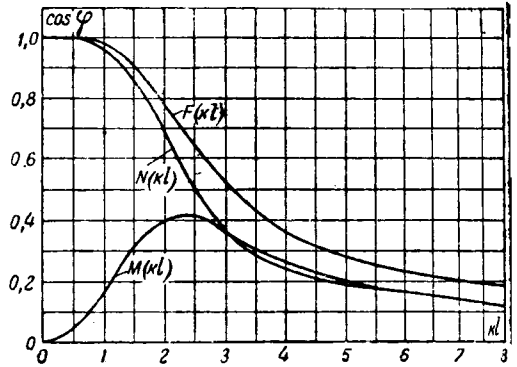


Рис. 3. Функции $F(kl)$, $M(kl)$ и $N(kl)$.

где τ_c — число витков в одной катушке;
 I_c — амплитудное значение тока в катушке, $а$.
 Функции $F(kl)$ и $N(kl)$, показанные на рис. 3, используются для расчета внутреннего коэффициента мощности $\frac{N(kl)}{F(kl)}$.

Воздушный промежуток может колебаться между и несколькими дюймами, в связи с чем и частота f колебаться от 60 до 10 000 $гц$.

На установке, предназначенной для нагрева алюминиевой ленты толщиной в 1 $мм$ и около 140 $см$ шириной оказалось возможным выбрать полюсные деления так, чтобы применить ток частотой в 60 $гц$. Электромагнит работали с отдаваемой мощностью в 300 $квт$, при $\cos \varphi = 0,3$ и к. п. д. 80%. Воздушный зазор был 70 $мм$. Ц. скорости ленты около 9,1 $м/мин$ выдерживалась конечная температура 400° С.

Как отмечалось в начале заметки, при движении ленты через воздушный промежуток должен быть обеспечен равномерный нагрев по всей ширине ленты. Если лента уже полюсного деления, края ленты перегреваются. Если лента шире, края не догреваются. Чтобы устранить этот дефект, было сделано простое приспособление, именно, обе противоположные системы электромагнитов устанавливались на роликах, и каждая из них перемещалась в направлении поперек ленты. Установка электромагнитов может быть произведена в соответствии с шириной ленты. Этот процесс был автоматизирован с помощью двух фотоэлементов и двух световых лучей пропущенных у краев ленты.

На практике, однако, выяснилось, что такое устройство имеет серьезный недостаток: на участке, где в обмотке электромагнита идет вдоль края ленты, край ленты стремится прижаться к сердечнику электромагнита выдающемуся за край ленты.

Отмеченный краевой эффект был удачно ликвидирован тем, что к боковой стороне электромагнита была прикреплена U-образная скоба из материала с малым сопротивлением, например меди. Эта медная скоба отодвигала край ленты и могла перемещаться вместе с электромагнитом, все время защищая край движущейся ленты.

(El. Engineering, № 10, 1953, К. М. В.)

Инж. Б. А. ПРОТОПОП



ПОЧЕМУ СИНУС ПОЛОЖЕН В ОСНОВУ ИЗМЕНЕНИЯ Э. Д. С. ВРАЩАЮЩИХСЯ ГЕНЕРАТОРОВ?

В некоторых учебниках по курсу общей электротехники или теории переменных токов содержится неправомерное указание о способах получения синусоидальной э. д. с. и совершенно не дается объяснения, почему вращающиеся генераторы конструируются так, чтобы их э. д. с. менялась по закону синуса.

Обратимся, например, к «Курсу общей электротехники» проф. Е. В. Китаева и доц. Н. Ф. Гревцова (издание 3-е, 1945 г.), которым пользуются студенты и нашего института. В гл. IV, § 43, стр. 97—98 получение переменного синусоидальной э. д. с. рассматривается как результат вращения прямоугольного витка в равномерном магнитном поле между полюсами *N* и *S*. Рисунок, изображающий вращение витка в равномерном поле между двумя полюсами, приводится и другими авторами. Подобное объяснение происхождения синусоиды э. д. с. приводит к выводу, что применение синусоидальной формы к переменным токам обуславливается «неизбежной синусоидальной формой кривой э. д. с. в генераторах». Известно, что на таком принципе не работает ни электрическая машина; наоборот, при конструировании генераторов приходится принимать целый ряд специальных мер, чтобы в максимальной степени приблизить э. д. с. к синусоиде.

Необходимо подчеркнуть, что наличие вполне одного магнитного поля на подобных рисунках не соответствует действительности. Даже для приблизительного получения подобного поля необходимо было бы во избежание влияния краев полюсов *N* и *S* удалить их на значительное расстояние друг от друга и получить весьма высокую напряженность поля, что практически неприемлемо. Следовательно, не может быть и речи о строго синусоидальном характере изменений э. д. с. на подобном рисунке.

Многие авторы приводят в начале курса этот же рисунок, а затем указывают, что в действительности подобная картина... не существует. Объяснение получения синусоидальной формы э. д. с. эти авторы сводят к специальным мерам, применяемым при проектировании генераторов (получение магнитной индукции нормальной плотности якоби и изменяющейся вдоль окружности по закону синуса).

Мы считаем, что подобное толкование с методической

точки зрения не оправдывается, так как у студента создается неясное и не четкое представление о том, как практически получают синусоидальную форму э. д. с. в генераторе.

Некоторые авторы ограничиваются упоминанием, что в технике стремятся к получению токов и напряжений, изменяющихся по закону синуса, но не объясняют почему. Такова, например, книга Н. Н. Мансурова и В. С. Попова «Теоретическая электротехника» (Госэнергоиздат, 2-е издание, стр. 196, 1949 г. и 3-е издание стр. 205, 1950 г.).

Другие авторы, обосновывая причины выбора синусоидального изменения э. д. с., указывают, что острые пики кривой напряжения излишне подвергают опасности изоляцию машин и аппаратов, а резкое убывание и возрастание тока является причиной появления э. д. с. самоиндукции и т. д. Все это так, но это не главное!

В основе работы всех электрических машин лежит закон электромагнитной индукции. В математическую формулировку этого закона входит производная; следовательно, при трансформировании и передаче электроэнергии на расстояние, от генератора к потребителям, происходит многократное дифференцирование кривой тока и напряжения по времени. Одним из самых главных требований при этом является неизменность формы кривой напряжения и тока при таком дифференцировании. Вращающаяся машина дает периодическую кривую, а из периодических кривых лишь синусоида сохраняет свою форму после дифференцирования.

Неизменность формы кривых является основной причиной выбора синусоиды, и это необходимо особо подчеркнуть в самом начале изложения курса, не осложняя вопроса различными дополнительными соображениями. Лишь в дальнейшем следует указать на все другие явления и причины.

При изложении вопроса получения синусоидальной э. д. с. в генераторах традиционный рисунок, изображающий вращение витка в равномерном магнитном поле между полюсами *N* и *S*, необходимо заменить рисунком, отображающим принцип действительного способа получения синусоидальной э. д. с.

Инж. В. Е. БОЧКОВ

Ивановский текстильный институт



НОВЫЙ ДОКУМЕНТ О П. Н. ЯБЛОЧКОВЕ (к 75-летию изобретения электрической свечи)

давно мной найдено в архиве XIX в.¹ письмо полка И. И. Филипенко, написанное им 3 августа 1876 г. из Парижа в Петербург в Главное инженерное управление (генералу Э. И. Тотлебену).

В письме, написанное через 4 месяца после взятия Яблочковым первой привилегии на изобретенную им электрическую свечу (23 марта 1876 г., Франция), свидетельствует о желании Павла Николаевича видеть распро-

странение своего изобретения на родине; письмо подтверждает, что он предлагал свой прибор — электрическую свечу — русскому военному министерству еще в 1876 г., т. е. вскоре после ее изобретения.

«Ваше высокопревосходительство, Эдуард Иванович! На днях я имел случай видеть в Париже в мастерских Vreguet электрический прибор для освещения местности. Простота устройства и употребления этого прибора поразила случайных посетителей мастерских Vreguet, в числе которых были военные агенты русского и итальянского правительств.

¹ Ц. А. Центрального государственного военно-исторического музея в Ленинграде; ф. 3, дело № 168.

Когда я предложил изобретателю послать свой прибор нашему инженерному ведомству, то в ответ на предложение изобретатель обратился ко мне с просьбой, чтобы я в качестве лица незаинтересованного, или вернее заинтересованного исключительно только пользой, какую может принести употребление сказанного прибора в наших войсках, передал бы прибор на благоусмотрение Вашего высокопревосходительства.

Я принял на себя смелость этого посредничества, во-первых, вследствие глубокого убеждения в пользе испытания прибора у нас, а во-вторых, еще и потому, что какая бы будущность ни предстояла этому изобретению, Вашему высокопревосходительству, во всяком случае, приятно будет узнать, что изобретатель, бывший воспитанник инженерного училища, отставной саперный офицер, поручик Яблочков, пользующийся в Париже до того лест-

ной репутацией как техник, что недавно послан в Лондон на выставку научных и учебных аппаратов и представитель весьма известной фирмы Breguet».

На первой странице этого письма имеется следующая надпись Э. И. Тотлебея на имя А. Д. Зверева: «Почнейше прошу по получении этого прибора испытать в гальванической команде и потом сообщить, полезно ли выписать несколько приборов или — только поблагодарить изобретателя, уплатив ему стоимость прибора по соглашению с полковником Филипенко».

Письмо, судя по резолюции, было переадресовано тем генералу Г. Л. Вансовичу, начальнику Технического гальванического заведения инженерного ведомства.

Кандидат техн. наук В. Н. ГОЛУШК



ФИЗИК БИША О ПРИОРИТЕТЕ А. С. ПОПОВА

В начале текущего столетия французский физик Биша (Bichat) читал в Электротехническом институте в г. Нанси (Франция) лекции по основам электротехники.

В сохранившемся у меня литографированном издании этих лекций на стр. 158 сказано следующее.

использована в беспроволочной телеграфии; она была известна сначала русским ученым г-ном Поповым в 1895 г., затем итальянцем г-ном Маркони в 1896 г.

Полагаю, что в большой группе имеющихся документов приоритета А. С. Попова свидетельство о

158.

certainement. Le reactif le plus sensible que l'on connait des ondes electro-magnetiques.

Telegraphie sans fil. L'idée de produire des oscillations electriques au moyen d'un oscillateur et de les recevoir a grande distance au moyen du tube Branly a été utilisée dans la Telegraphie sans fil; elle a été réalisée d'abord par un savant Russe, M. Popoff en 1895, puis, par un Italien, M. Marconi, en 1896.

Le transmetteur se compose de deux bobines A et B, (fig. 1111), mises en relation

Привожу перевод:

«Телеграфия без проводов. Идея производить электрические колебания с помощью осциллятора и принимать их на большом расстоянии с помощью трубки Бранли была

го французского физика может оказаться не безинтересным для читателей.

Проф. Я. Л. ФРАНКОФ



К СТАТЬЕ „ДИНАМИЧЕСКИЕ УСИЛИЯ В РАСПЛАВЕ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ“

(„Электричество“, № 12, 1950)

В статье „Динамические усилия в расплаве индукционных печей“ содержится следующая ошибка.

На стр. 35 в конце левого столбца имеется фраза: «формула (11) показывает, что при неизменной мощности P_2 высота мениска с ростом частоты постоянна [см. формулу (10)]. В этой фразе следует заменить слово „мощности“ словом „напряженности“ и соответственно букву P_2 буквой H_0 . Что же касается зависимости высоты мениска от частоты при постоянной мощности P_2 , то ее можно усмотреть из выражения

$$h = 1,02 \frac{10^{-5} \mu_r P_2}{g \rho l} \tau(x),$$

где $x = \frac{\sqrt{2} r_0}{z_1}$ пропорционально \sqrt{f} , если полагать

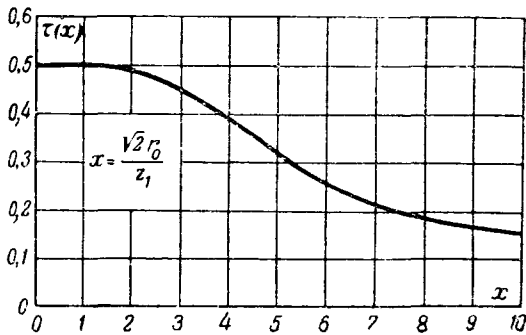
$$P_2 = \text{const.}$$

Здесь:

$$\tau(x) = \frac{\text{ber}^2 x + \text{bei}^2 x - 1}{x [\text{ber} x \text{ber}' x + \text{bei} x \text{bei}' x]};$$

μ_r — относительная магнитная проницаемость расплава (почти всегда μ_r);

$\rho = \frac{1}{\gamma}$ — удельное сопротивление расплава, ом·см



P_2 — мощность, генерируемая в садке, *вт*;
 l — высота садки, *см*;
 q — удельный вес расплава, *г/см³*;

r_0 — наружный радиус объема, занятого расплавом, *см*;

$z_1 = \frac{\sqrt{2}}{V \omega \mu}$ — глубина проникновения тока в расплав, *см*,
 где $\mu = 0,4\pi \cdot 10^{-8} \mu$, [*гн/см*] и $\omega = 2\pi f$.

Значения $\tau = \tau(x)$ даны на рисунке.

При $x > 10$ приведенная выше формула переходит в упомянутое выражение (11). Из (11) видно, что высота мениска обратно пропорциональна \sqrt{f} только при $x > 10$. Кроме отмеченной ошибки, следует функции Бесселя первого порядка нулевого и первого порядка, которые обозначены в статье $J_0(\sqrt{jx})$ и $J_1(\sqrt{jx})$, обозначить $I_0(\sqrt{jx})$ и $I_1(\sqrt{jx})$, потому что в соответствии с принятой системой обозначений: $I_0(\sqrt{jx}) = J_0(\sqrt{-jx})$ и $I_1(\sqrt{jx}) = -jJ_1(\sqrt{-ix})$.

Кандидат техн. наук Г. В. ДЕРШВАРЦ

◇ ◇ ◇

Проника

Пленум секции промэлектротехники МОНИТОЭ

В декабре 1950 г. в Доме инженера и техника им. Дзержинского состоялся пленум секции промышленной электротехники МОНИТОЭ, посвященный *электромашинным аппаратам в схемах управления прокатными станами*. работе пленума приняло участие свыше 150 специалистов, в том числе представители металлургических предприятий, научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений.

Инж. О. А. Синицын (Центроэлектромонтаж) выступил с докладом «Практические методы расчета параметров схем электромашинной автоматики». Вопросы выбора параметров данных схем обычно представляют значительные трудности, ибо учащаемые переходные процессы описываются уравнениями высокого порядка (5-го и выше). С целью облегчения расчетов можно применять более простые способы предельного выбора параметров схем и расчета переходных процессов. Напряжение якоря электромашинного усилителя при его насыщении можно выбирать по простому равенству, обеспечивающему поддержание заданной величины пускового тока двигателя в конце процесса его пуска. Цепи стабилизирующего трансформатора удобно брать одной эквивалентной цепью, состоящей из последовательно соединенных: омического сопротивления, индуктивности. Без существенной погрешности получаемых кривых переходных процессов для двигателя можно не учитывать рассеяния стабилизирующего трансформатора и инерцию электромашинного усилителя. Это позволит вместо уравнения 5-го порядка рассмотреть упрощенное уравнение 3-го порядка.

Инж. Н. Н. Стефанович (Центроэлектромонтаж) в докладе «Некоторые вопросы проектирования схем электромашинной автоматики» отметил льготы испытания схем с источниками стабилизации напряжения для питания потенциометров, регуляторов и др. Схемы с применением электромашинных усилителей дешевле, чем схемы нормальных машин постоянного тока с регулятором напряжения. Особый интерес представляет схема с применением стабиливольта, включенного в цепь одной из обмоток управления электромашинного усилителя.

Кандидат техн. наук О. В. Слежановский (трест «Электропривод») в докладе «Усовершенствование схем управления главных приводов прокатных станов с электромашинными усилителями» отметил общее направление в развитии электропривода обжимных прокатных станов: увеличение веса слитка, повышение средней скорости прокатки, комплексная автоматизация прокатки. Следует решительней перейти к индивидуальному приводу валков, применять машины с двухходовыми обмотками якорей, отказаться от контактно-релейных схем управления, осуществлять регулирование интенсивности прокатки в зависимости от нагрузки прокатных двигателей. Пути улучшения типовой системы управления главными приводами заключаются в уменьшении постоянных времени возбуждения от 1,5 до 0,1—0,06 сек, в увеличении коэффициента усиления регуляторов нагрузки путем оптимального выбора твердых выпрямителей и увеличения мощности потенциометров и др. Анализ осциллограмм режимов управления вхолостую и при прокатке показывает отрицательное влияние ампервитков управляющей обмотки в процессах разгона и реверса, плохое торможение, очень сильное влияние параметров стабилизации на характер и время протекания переходных процессов. В результате правильного выбора параметров схемы действие регулятора нагрузки и ограничение тока рекуперации позволяет контролировать режимы управления в функции тока главной цепи.

Инж. А. Б. Челюсткин (Центральная лаборатория автоматики МЧМ) выступил с докладом «Примеры комбинированного (электромашинного и электронного) управления электроприводами прокатных станов».

В рецензиях пленума отмечены достигнутые отечественной техникой успехи в области совершенствования методов расчета и построения схем управления механизмами прокатных станов с электромашинными усилителями и одобрен ряд практических методов расчета параметров схем.

Инж. А. А. ТАЙЦ

Председатель секции промэлектротехники МОНИТОЭ

◇ ◇ ◇

Профессор А. Я. Бергер

К 30-летию научной, инженерной и педагогической деятельности

В 1950 г. исполнилось 30 лет с начала научной, инженерной и педагогической работы профессора Ленинградского заочного индустриального института (ЛЗИИ) А. Я. Бергера.

Александр Яковлевич Бергер родился в 1894 г. В 1920 г. он окончил Харьковский технологический институт с отличием. С тех пор А. Я. Бергер ведет многогранную деятельность в области электромашиностроения, совмещая научно-педагогическую работу с практической работой в электропромышленности.

До 1927 г. А. Я. Бергер заведывал расчетным бюро асинхронных, а затем синхронных машин на Харьковском электромеханическом заводе, затем там же созданным им заводским бюро исследований, а с 1930 г. турбогенераторным бюро Харьковского турбогенераторного завода. В 1930 г. проф. А. Я. Бергер организовал в ХЭТИ кафедру турбогенераторостроения.

С 1931 г. до начала Великой Отечественной войны А. Я. Бергер работал профессором Ленинградского политехнического института на кафедре электромашин.

Во время Великой Отечественной войны А. Я. Бергер работал шеф-электриком завода, профессором Томского индустриального института, заведующим кафедрой Московского института стали им. Сталина, состоял членом Техсовета МЭП, а также консультантом завода. В 1944 г. А. Я. Бергер возглавил кафедру электромашин Ленинградского электротехнического института связи и работал консультантом завода «Электросила».

А. Я. Бергер является автором 70 печатных трудов в том числе книг по электрическим машинам для студентов и инженеров и, в частности, капитального труда о турбогенераторах. В трех томах этого труда, изданных в 1935, 1937 и 1941 гг., дано комплексное рассмотрение турбогенератора (расчеты, конструкции, производство, номинака, эксплуатация и т. п.).

Помимо книг для высшей школы А. Я. Бергером писаны книги для повышения квалификации рабочих мастеров.

А. Я. Бергер был одним из организаторов известной в свое время школы мастеров на ХЭМЗ.

За годы своей деятельности А. Я. Бергер прилагал много усилий для улучшения электротехнического образования и внедрения в широкие массы работников электропромышленности и энергоцехов новейших достижений в области теории электромашин.

А. Я. Бергер принимает активное участие в работе ЛОНИТОЭ и Ленинградского отделения Всесоюзного общества по распространению политических и научных знаний.

Академик В. С. КУЛЕБАКИН, заслуженный деятель науки и техники, проф. С. А. РИНКЕВИЧ, доктор техн. наук, проф. Д. А. ЗАВАЛИШИН, доктор техн. наук, проф. Л. М. ПИОТРОВСКИЙ, кандидат техн. наук, доц. Г. Б. МЕРКИН, кандидат техн. наук, М. И. ОРАНСКИЙ



Академик К. И. Шенфер

18 мая с. г. исполняется пять лет со дня смерти выдающегося советского ученого электротехника академика Клавдия Ипполитовича Шенфера.

К. И. Шенфер родился 7 июня 1885 г. в городке Радзивилишки бывшей Ковенской губернии в семье рабочего железнодорожных мастерских Ипполита Иосифовича Шенфера. Детство К. И. Шенфера протекало в тяжелых материальных условиях Литовское происхождение, при шовинистической политике, проводившейся царским правительством, мешало продвижению отца по службе. В поисках лучшей работы И. И. Шенфер вместе с семьей переезжает сначала в Орел, затем в Абдулино и, наконец, в 1892 г. в Екатеринодар (ныне Краснодар). В этом городе прстекли детские и юношеские годы Клавдия Ипполитовича. В 1903 г. он блестяще окончил Екатеринодарскую гимназию, но по материальным условиям поступить сразу в высшую школу ему не удалось. Идя по стопам отца, Клавдий Ипполитович вначале работает помощником машиниста на местной ж. д., затем разметчиком при постройке ж. д. моста близ Ставрополя.

Интерес к электротехнике проявился у К. И. Шенфера еще в юношестве и с годами непрерывно рос. В 1904 г. Клавдий Ипполитович поступил в Варшавский политехнический институт. Усиление реакции в конце 1905 г. принудило его уехать из Варшавы. Вскоре он перешел в Московское высшее техническое училище. Здесь с 1905 г. была организована специализация по электротехнике. К. И. Шенфер получил, наконец, воз-



можность подготовиться к инженерной работе в той области, о которой он мечтал многие годы.

В 1910 г. К. И. Шенфер окончил МВТУ со званием инженера-механика. С сентября того же года начал работать в качестве лаборанта электротехнической лаборатории МВТУ. Большие экспериментальные способности молодого инженера обратили на себя внимание его старших товарищей К. А. Круга и Б. Угрюмова. По их рекомендации молодой лаборант получил годовую научную командировку в Германию где в г. Карлсруэ он работал в лаборатории проф. Э. Арнольда. В 1911 и 1912 гг. К. И. Шенфер опубликовал свои первые экспериментальные работы по коммутации коллекторных машин (Электротехническое, № 10, 1912). Пытливый молодой ученый стремился к исследованию наиболее сложных вопросов теории электрических машин. Успешно работая в области коллекторных машин переменного тока, Клавдий Ипполитович выпустил в 1916 г. на русском языке монографию «Коллекторные машины переменного тока».

Особенно широкие возможности для развития творческого таланта К. И. Шенфер получил в годы Советской власти. С 1917 г., будучи избран профессором кафедры электротехники, Клавдий Ипполитович принимал деятельное участие в организации нового Электротехнического факультета МВТУ. В 1918—1919 гг. он был избран заместителем декана факультета. В дальнейшем К. И. Шенфер руководил постановкой преподавания по проектированию электрических машин. Из первых

сков инженеров нового факультета К. И. Шенфер под-
говил значительную группу молодых научных работни-
ков, которые деятельно помогали ему развивать начатое
дело (Б. П. Анаров, И. С. Брук, А. Н. Ларионов, А. И.
Оскавитин, Е. В. Нитусов, Г. Н. Петров, С. А. Погожев
др.).

Работая в высшей школе, К. И. Шенфер поддержи-
вал тесную связь с молодой развивающейся советской
электропромышленностью. С 1917 г. по 1926 гг. он рабо-
тал в качестве инженера-консультанта в проектно бюро
«Динамо». С 1921 г. в течение ряда лет он руко-
водил в НКПС испытаниями электрооборудования под-
земного состава железных дорог.

В 1921 г., когда по указанию В. И. Ленина был
организован в Москве Государственный эксперименталь-
ный электротехнический институт (ГЭЭИ, ныне ВЭИ),
К. И. Шенфер возглавил его в качестве заместителя ди-
rektора по научно-исследовательской работе, а в даль-
нейшем в течение многих лет заведывал Машинно-аппа-
ратным отделом. В эти годы научная работа Клавдия
Ипполитовича получила особенно широкое развитие. Со-
стоял в своем лице замечательного экспериментатора
изобретателя-новатора, он с большим увлечением рабо-
тал в самых разнообразных областях электротехники,
куда отдавая все же предпочтение электрическим ма-
шинам.

Безреостатный пуск асинхронных двигателей, асин-
хронные двигатели с массивным ротором, каскадное ре-
гулирование скорости вращения асинхронных двигателей,
математически регулируемые синхронно-индукционные дви-
гатели, исследования коммутации машин постоянного то-
ка и однофазных преобразователей — вот далеко не
полный перечень тех проблем в области электрических
машин, над которыми успешно работал Клавдий Ипполи-
тович в эти годы. В 1930 г. К. И. Шенфер был избран
членом-корреспондентом Академии наук СССР, а в 1932 г.
— действительным ее членом.

К. И. Шенфер является автором многократно пере-
печатанных учебников по машинам постоянного то-
ка, асинхронным двигателям и коллекторным двигателям.
В его книгах, ясно и доходчиво изложенным, изучали
электрические машины тысячи советских электротехников.

«Когда я пишу книгу, — не раз говорил Клавдий Иппо-
литович, — я представляю себе, что выступаю перед огром-
ной аудиторией советских инженеров и техников, и я пи-
шу так, чтобы эта аудитория меня понимала». Лекции,
которые К. И. Шенфер читал всегда с большим увлече-
нием перед студенческой аудиторией, отличались строй-
ностью и ясностью изложения.

В 1938 г. К. И. Шенфер прекратил из-за плохого
состоянии здоровья преподавание в высшей школе, со-
средоточив свою работу, главным образом, в Энергетиче-
ском институте Академии наук СССР.

В годы Великой Отечественной войны, несмотря на
все ухудшающееся состояние здоровья, К. И. Шенфер
проводил большую работу, связанную с усилением бое-
способности советского государства, и до последних дней
своей жизни был пламенным патриотом нашей великой
Родины.

Заслуги К. И. Шенфера как ученого и гражданина,
высоко были оценены правительством. Он был награжден
орденами Ленина и Трудового Красного Знамени, ему
была присуждена Сталинская премия первой степени за
многолетнюю выдающуюся работу в области электротех-
ники. Более 80 научных работ опубликовано К. И. Шен-
фером по различным вопросам электротехники; он яв-
ляется автором многих десятков изобретений. Основной
чертой этих работ является их тесная связь с практикой,
стремление дать в результате исследования конкретное
улучшение конструкций.

Тяжелая болезнь вырвала К. И. Шенфера из рядов
советских электротехников в расцвете его творческих сил,
когда еще очень многие его замыслы не были приведены
им в исполнение.

Память об этом замечательном ученом, выдающемся
учителе первого поколения советских электротехников и
электромашиностроителей, человеке исключительных ду-
шевных качеств, навсегда сохранится в памяти тех, кто
когда-либо знал Клавдия Ипполитовича и соприкасался
с ним.

Имя академика К. И. Шенфера прочно вошло в исто-
рию советской науки и электротехники.

Проф. Г. Н. ПЕТРОВ



Памяти И. Г. Александрова

(1. 9. 1875—2. 5. 1936)

Пятнадцать лет назад умер выдающийся советский
гидротехник академик Иван Гаврилович Александров, автор
проекта Днепрогэса и других крупных гидротехнических
руководств.

И. Г. Александров принимал активное участие в со-
здании плана ГОЭЛРО, им были выполнены основные
задания по составлению плана электрификации Южного
Украина. Будучи членом президиума Госплана, он приня-
л активное участие в разработке народнохозяйствен-
ных планов.

При составлении проекта Днепрогэса И. Г. Алексан-
дров исходил из решения народнохозяйственной задачи:
получения энергии на базе дешевой электроэнергии энергоемких
производств. За участие в разработке проекта и в строи-
тельстве Днепровской гЭС Иван Гаврилович был награж-

ден орденом Ленина и по рекомендации научно-техниче-
ской общественности был избран действительным членом
Академии наук СССР.

После Днепрогэса И. Г. Александров посвятил себя
задаче, связанной с комплексным использованием водной
энергии рек Средней Азии (проект Чирчикского комбина-
та и расширение орошаемого хлопководства).

И. Г. Александровым составлялся эскизный проект
использования энергии р. Ангары. В 1932—1934 гг. при
его участии разрабатывался проект орошения Южного
Заволжья с гидроэлектростанцией у Камышина.

И. Г. Александрову принадлежит ряд научных тру-
дов по вопросам гидротехники и энергетики, изданных
в 20-х и 30-х годах.

Д. С. НИКОЛАЕВ



М. А. ПЕРЕКАЛИН. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ. 511 стр., ц. 25 руб. Госэнергоиздат, 1950.

Новая книга проф. М. А. Перекалина представляет несомненный интерес. Автор книги обладает большим педагогическим опытом и излагает материал с большим мастерством. Несмотря на ограниченный объем книги, в ней изложены основные методы расчета и анализа линейных электрических цепей, а также, хотя несколько менее полно, магнитные цепи, электрические цепи со стальными сердечниками и другие нелинейные цепи.

При изложении основных методов расчета электрических цепей автор наряду с методом контурных токов излагает и метод узловых напряжений. К сожалению, даже в курсах теоретической электротехники метод узловых напряжений не всегда излагается, в то время как известно, что, если число узлов без единицы меньше, чем число независимых контуров, то метод узловых напряжений требует решения меньшего числа уравнений, чем метод контурных токов.

При рассмотрении цепей постоянного тока удачно методически использована потенциальная диаграмма, хотя соответствующий прием в цепи синусоидального тока, а именно топографическая диаграмма, изложена недостаточно хорошо. Излагая цепи постоянного тока, автор рассматривает также длинные линии постоянного тока с учетом утечки, что с одной стороны, может представлять самостоятельный интерес, а с другой стороны, облегчает переход к длинным линиям переменного тока.

Рассмотрению цепей со сталью предпосланы определения векторов B , J , H , причем подход к определению этих векторов в основном правилен, в то время как в других книгах по этому вопросу встречается немало путаницы. В параграфах, касающихся цепей со сталью, наряду с общеизвестными положениями рассмотрен также ряд более тонких вопросов и притом в доступном изложении.

В главе о переходных процессах удачно отгнетена физическая сторона вопроса и хорошо изложена математическая часть вопроса. Операторному методу предшествует изложение взаимно однозначной трансформации Фурье, хотя автор книги использует для нее несколько иную терминологию. Затем ясно показываются ограничения этого преобразования и пути их устранения при переходе к операторному методу. Если не говорить об отдельных шероховатостях в изложении, то такой путь представляется рецензенту правильным.

Можно признать удачным вынесение в отдельных параграфов вопроса об определении начальных значений в переходном процессе, т. е. значений, приобретаемых токами и напряжениями в момент времени, непосредственно следующий за коммутацией.

Терминология, применяемая в книге, за некоторыми небольшими исключениями является вполне современной. То же следует сказать об обозначениях и соблюдении стандартов.

Наряду с перечисленными положительными свойствами книги следует отметить и ряд недостатков. Не вполне ясно, на какого читателя рассчитана книга. Сам автор в предисловии говорит, что книга рассчитана, с одной стороны, на инженера, а с другой,— на техника. Вероятно, этим можно объяснить неоднородность изложения: некоторые параграфы и главы изложены крайне элементарно, в то время как другие мало в чем уступают по глубине изложения курсам теоретической электротехники.

В книге отражается роль русских ученых в развитии электротехники, главным образом на ее начальных этапах развития; роль же передовой советской электротехнической науки показана не в достаточной мере. Показывая во введении развитие электротехники в СССР, автор ограничивается данными пятнадцатилетней давности и говорит, что к 1936 г. план ГОЭЛРО был превзойден приблизительно в 4 раза. Целесообразнее было бы привести более новые данные.

Напрасно теория четырехполюсника не излагается сначала, как и остальные методы анализа цепей, в гла-

вах по постоянному току — это могло бы только способствовать усвоению.

В разделе о симметричных составляющих не проведена связь между симметричными составляющими фаз и линейных величин и практические выводы, которые можно отсюда сделать, а также возможность применения метода к расчету токов несимметричных коротких замыканий. Вряд ли целесообразно в такой книге излагать в общем виде многофазные системы; достаточно было бы ограничиться изложением трехфазных систем. Неясно, каков критерий, указывающий, какой из методов следует применять в том или ином частном случае: метод контурных токов или метод узловых напряжений. При изложении метода контурных токов отождествляется контур и ячейка, хотя это не одно и то же: контур может состоять из нескольких ячеек. Недостаточно ясно изложено определение эквивалентного генератора. Недостаточно обоснован метод зеркальных изображений. Вектор намагничивания в книге в μ_0 раз меньше, чем в основных книгах по ретической электротехнике. Пример тока, изменяющегося по параболе (стр. 363), нереален. Переход от метода Фурье к операторному методу изложен принципиально правильно, но недостаточно ясно. При изложении операторного метода (стр. 456—467) не учитывается, что элемент коммутации магнитные потоки и электрические токи могут быть не равны нулю.

Не везде выдерживается принятая система обозначений, например, на стр. 9 вдруг появляются гауссы, а на стр. 91 приведена формула

$$H_k = 0,8 B_k,$$

несправедливая в основной принятой системе единиц.

В формуле (20-100) величина $d\omega$ не заменена на $d\omega$.

Что следовало бы сделать по смыслу преобразования в § 20-7 и 20-8 разные углы в одном и том же месте обозначены одной и той же буквой φ . На стр. 264 автор вводит «скалярное произведение» векторов тока и напряжения UI вместо общепринятого обозначения $ReUI$. Правая фраза § 14-7 (стр. 263) справедлива лишь для случая неравномерной нагрузки фаз, что следовало подчеркнуть.

Несмотря на то, что стиль изложения в целом вполне удовлетворительный, в книге встречаются отдельные неудачные выражения. Приведем некоторые из них. На стр. 83 вместо выражения «замена магнитного момента элемента dv током с эквивалентным магнитным моментом» написано: «замена намагниченности эквивалентным током».

На стр. 77 вместо слов «включено постоянное сопротивление r_2 » написано «включен реостат с постоянным сопротивлением r_2 ». Аналогично на стр. 488 сказано, что включается реостат с сопротивлением r_{c2} . На стр. 193 сказано, что емкость не влияет на величину тока в цепи постоянного тока, что несправедливо при последовательном включении емкости. На стр. 90 вместо того чтобы сказать, что линии будут близки к прямоугольникам, сказано, что линии превратятся в прямоугольные. На стр. 4 имеется неудачное выражение: «вместо номера гармонической k ввести ее частоту», а на стр. 483 «прямая волна в линии».

Несмотря на тщательную правку книги, в ней встречаются отдельные досадные опечатки.

В заключение хочется еще раз отметить, что, несмотря на отмеченные недостатки, книга в целом написана достаточно хорошо и, безусловно, принесет большую пользу. Внешнее оформление книги, бумагу, печать и рисунки можно признать удовлетворительными.

Кандидат техн. наук, доц. А. А. ЯНКО-ТРИНИЦКИЙ
Зав. кафедрой теоретической электротехники Урало-Сибирского политехнического института



Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ, В. В. ПАСЫНКОВ, Б. М. ТАРЕЕВ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.

Издано Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для энергетических и электротехнических институтов и факультетов. 436 стр. + 10 вклеек, ц. 16 руб. Госэнергоиздат, 1950.

В 1940 г. последний раз было выпущено известное учебное руководство по электротехническим материалам проф. М. М. Михайлова. Десять лет, прошедших с момента выхода в свет этого издания, явились периодом активного развития электротехнических материалов. Советском Союзе это развитие под влиянием бурного роста социалистической экономики, электропромышленности и промышленности средств связи, электрификации и механизации производственных процессов приобрело особенно широкий характер. Оно привело к установлению новых закономерностей, подчас коренным образом изменяющих прежние взгляды, и имело результатом появление ряда электротехнических материалов с исключительно благоприятными показателями, вызвав при этом целый ряд новых видов конструкций аппаратуры и электрооборудования. В разработке указанных выше теоретических и практических проблем участвовали и авторы рассматриваемой книги.

Выход в свет книги, авторы которой поставили перед собой задачу — составить современный учебник по электротехническим материалам — следует всячески приветствовать.

Книга является плодом коллективного труда; в сочинении ее принимали участие кафедры электротехнических материалов Ленинградского электротехнического института им. Ульянова (Ленина) и Всесоюзного заочного энергетического института, а в рецензировании рукописи — ответственные кафедры Московского энергетического института им. Мелетова и Ленинградского политехнического института им. Калинина.

В первую очередь книга предназначается в качестве учебника для студентов электротехнических и энергетических вузов. Она содержит основы физики явлений, наблюдаемых в электротехнических материалах, и описание методов и технологий производства этих материалов. Изложение некоторых вопросов выходит за рамки учебника и иногда частично приобретает характер монографии, в которой находят отражение многие ценные результаты, полученные самими авторами. Первая часть книги отведена электроизолирующим материалам, а вторая — проводникам, полупроводникам и диэлектрическим материалам.

Вводный раздел содержит основные представления о строении атомов и молекул, о видах связи между молекулами, о нейтральных и дипольных молекулах. К тому же приведены основные понятия из кинетической теории газов и из физики жидких и твердых тел. Назначение этого раздела — напомнить читателям необходимые представления из курса физики, поэтому едва ли целесообразно было выводить выражение для средней кинетической энергии газов (стр. 20). Установленное различие между диэлектриками и проводниками, заключающееся в том, что в диэлектриках электрическое поле может существовать длительно, в то время как в проводниках электрическое поле исчезает почти мгновенно (стр. 27) справедливо лишь для электростатического поля.

Главы I—IV посвящены физике диэлектриков. В вопросах отведено свыше 40% всего объема первой части. Таким образом, дается достаточно обширная теоретическая основа для дальнейшего понимания свойств и свойств многочисленных изолирующих материалов. Следует одобрить расширение физического раздела курса и мнение авторов обосновать поведение и характеристики диэлектриков, исходя из современных научных представлений.

В главе I устанавливается связь между поляризабельностью, смещением и диэлектрической проницаемостью; выводится уравнение Клаузиуса-Мосоттского (степень применимости этого уравнения указывается в тексте). Охарактеризовав различные виды поляризации, авторы подразделяют диэлектрики по признаку преобладающего из видов поляризации и рассматривают диэлектрическую проницаемость газов, жидких и твердых диэлектриков. Читатель получает отчетливое представление о поляризации и о диэлектрической проницаемости изолирующих материалов; освещены фундаментальные ра-

боты советских авторов П. П. Кобеко, Б. М. Вула, Г. И. Скани и др., в особенности по вопросам поляризации твердых тел, в том числе сегнетоэлектриков и ионных кристаллов.

Авторы допускают некоторую непоследовательность, не указывая на эквивалентной схеме диэлектрика (рис. 4) элемента, соответствующего спонтанной поляризации. Все уравнения как в главе I, так и в последующих, даны в нерациональной форме, в то время как учащимся высших технических учебных заведений соотношения электромагнитного поля излагаются на основе рациональной формы уравнений. В § 11 дается метод измерения диэлектрической проницаемости с помощью прибора ГБЕ-2; желательным являлось бы описание более совершенного прибора ГБЕ-3.

Вопросы электропроводности жидких, газообразных и твердых диэлектриков рассмотрены в главе II. Авторы ограничиваются определением междуслойной поляризации, не вдаваясь в описание этого явления. Зависимость электропроводности различных жидких диэлектриков от температуры убедительно иллюстрирована экспериментальными данными, полученными советскими авторами для полимеризованного льняного масла и для трансформаторного масла. Особое внимание уделено электропроводности твердых тел, в частности, электропроводности стекол и ее зависимости от содержания окислов щелочных и тяжелых металлов. Главные закономерности в этой области, как известно, установлены советскими авторами, в том числе одним из авторов книги.

Достаточно подробно обсуждение поверхностной электропроводности авторы развертывают, подразделяя диэлектрики на нерастворимые, частично растворимые и обладающие пористой структурой.

В разделе о методах измерения электропроводности (§ 17) следовало бы указать на ограниченность использования в технической практике метода электрометра ввиду появления усилителей на электротехнических лампах, позволяющих получить столь же высокую чувствительность, как и при помощи электрометра, но при значительно большей простоте установки и удобства использования.

В главе III дается понятие о диэлектрических потерях и разбираются потери в газообразных, жидких и твердых диэлектриках; описываются также методы измерения потерь. Авторы правильно подчеркивают влияние значительных потерь в диэлектрике на его емкость и на изменение параметров эквивалентной схемы в зависимости от частоты. Касаясь вопроса об ионизационных потерях (стр. 86), следовало бы кратко остановиться на самом процессе ионизации, учитывая, что этот вопрос освещается лишь в следующей главе. По характеру и величине потерь жидкие диэлектрики подразделяются на нейтральные, не содержащие примесей (с малыми потерями), и на диэлектрики, представляющие собой полярные вещества или смеси полярных и нейтральных веществ.

Значительное место отведено диэлектрическим потерям в твердых диэлектриках, которые при рассмотрении этого вопроса разбираются на диэлектрики с электронной поляризацией, неорганические монокристаллы с электронной и ионной поляризациями, стекла, неорганические поликристаллические диэлектрики, содержащие полярные примеси, органические диэлектрики и сегнетоэлектрики. Потери в неорганических монокристаллах ионной структуры определяются в основном электропроводностью, хотя недавние исследования со слюдой-флюопитом, гипсом и каменной солью показывают наличие потерь, отличных от потерь проводимости. Диэлектрические потери в стеклах зависят от наличия слабо связанных ионов, значительно роль играет нейтрализационный эффект, изученный Г. И. Скани. В разделе о потерях в органических диэлектриках с дипольными примесями представлены оригинальные работы школы П. П. Кобеко.

К небольшим недостаткам главы III относятся следующие. Площадь петли диэлектрического гистерезиса пропорциональна потерям энергии за один период

(стр. 81 и 117) лишь при отсутствии дополнительных потерь; удельная электропроводность обозначена через γ (стр. 83), хотя согласно списку обозначений (стр. 9—10) этот символ относится к удельному весу; измерениям потерь отведено непропорционально много места (20 из 38 страниц); в схеме, примененной Б. М. Вулом для исследования титаната бария (рис. 58), емкость C должна быть выполнена в виде магазина емкостей и должна шунтироваться активным сопротивлением, а вывод от пластины электронно-лучевой трубки должен быть присоединен к движку, позволяющему изменять соотношение между сопротивлениями r_1 и r_2 .

Глава IV посвящена электрической прочности диэлектриков и методам испытаний на пробой. В теории пробоя газов роль стримеров и фотоионизации в объеме газа изложена весьма кратко. На основе U-образной зависимости пробивного напряжения от произведения давления на расстояние показаны возможности увеличения пробивных напряжений; эта же возможность на основе изменения состава газа продемонстрирована на основе оригинальных работ советских авторов; подчеркнута влияние частоты на электрическую прочность газов. Обращено внимание на экспериментальные данные, показывающие снижающее влияние примесей на электрическую прочность жидких диэлектриков.

Значительно полнее рассмотрен пробой твердых диэлектриков. Наряду с методикой расчета напряжений при тепловом пробое по В. А. Фоку и Н. Н. Семенову чрезвычайно подробно изложена методика расчета температуры и допустимых напряжений для изоляторов стержневого типа как без учета, так и с учетом перепада температур по толщине изолятора согласно работам отечественных исследователей.

Описанные испытания диэлектриков на пробой охватывают испытания при переменном и постоянном токе и на импульсах; желательно было бы указать способы определения напряжения импульса при пробое.

В главе V разобраны свойства диэлектриков по отношению к действию влаги, нагрева и механических нагрузок и даны понятия о некоторых физических (плотность, пористость, воздухопроницаемость) и химических (растворимость, химическая стойкость, кислотность) показателях. На основе работ школы М. М. Михайлова показано, что в зависимости от структуры вещества одно и то же количество влаги может по-разному сказываться на электрических свойствах. Ценны также систематизация и развитие представлений о нагревостойкости на основе работ Б. М. Тареева. Слишком кратко освещены вопросы морозостойкости.

Подразделение изолирующих материалов на высоковольтные и низковольтные (§ 33) представляется спорным. Часто требования к тем и другим совпадают; например, желательность низких потерь относится как к первым, так и ко вторым. Классификацию по применению целесообразно было бы развить и поместить в конце первой части книги.

В главе VI описаны органические изолирующие материалы — жидкие и воскообразные диэлектрики, смолы, битумы, высыхающие масла, лаки и компаунды, волокнистые материалы, пластмассы, каучук и кремнийорганические материалы. Изложение в основном построено на базе общих представлений о строении и свойствах диэлектриков (главы I—V), хотя эту линию и не удалось провести последовательно для всех видов органической изоляции. Фундаментальные исследования в наиболее важных областях органической изоляции были проведены в Советском Союзе. Эти исследования, как показано в рецензируемой книге, не только способствовали созданию правильных представлений о закономерностях, определяющих свойства этих веществ, но послужили базой для производства нашей промышленностью новых ценных материалов. На протяжении всей главы уделяется внимание работам русских и советских авторов. Помимо данных о составе, свойствах и основах технологии производства читатель знакомится и с вопросами использования материалов. Следует одобрить также включение в учебник некоторых производственных процессов, весьма важных с точки зрения условий применения изолирующих материалов (пример: компаундирование изоляции).

К числу второстепенных недостатков главы VI отно-

сится отсутствие данных о карбинольном клее; не все указываются значения ϵ , $\text{tg } \delta$ и других характеристик (винилфлекс — стр. 213, лаки — стр. 219—224, компаунды — стр. 225—226), а диэлектрические характеристики некоторых материалов приводятся по два раза: в первых семи главах и в главе VI, что иногда влечет появление неточностей; так, для касторового масла согласно табл. $\epsilon = 4$, а на стр. 193 указано $\epsilon = 4,2 \div 4,5$. Едва ли таким вильным является повторное рассмотрение свойств клеев без наполнителя в разделе пластмасс (стр. 261). В разделе о слоньих пластиках отмечены слоистые листовые материалы, но не описано производство намотанных изделий.

Неорганические материалы — керамика, стекло, слюда (включая и сложные материалы на ее основе), каменные породы, асбест, оксидная изоляция — достаточно полно и последовательно изложены в главе VII, с указанием новых достижений в этой области, преимущественно на основе работ советских авторов. Конечно, в области конденсаторной и установочной керамики выдающееся место принадлежит советским исследователям — Н. П. Богородицкому, Б. М. Вулу, Г. И. Сидору и др. Обращает на себя внимание перегруженность учебным материалом (в § 45 и 46 на 35 страницах помещено 12 таблиц), что скорее подходило бы для справочника, а не для учебника. При ознакомлении с технологией кварцевого стекла (стр. 308) у читателя может сложиться представление о том, что это стекло способно перейти в жидкое состояние. Между тем, кварцевое стекло не только не размягчается, при дальнейшем повышении температуры начинается испарение кварца. Именно это обстоятельство и составляет одну из основных трудностей при производстве изделий из кварцевого стекла. Желательно было бы в главе VII осветить свойства стеклоактивов и также серы.

В главе VIII изложены свойства обмоточных проводов и силовых кабелей. Возможно, лучше было бы поместить эту главу после рассмотрения проводниковых материалов. Сведения о физике металлической проводимости и о характеристиках металлов и сплавов приводятся в главе IX. После этого дается обзор проводниковых материалов, применяемых для проводов, токоведущих деталей и соединений. Охват этих вопросов соответствует учебной программе; однако описательный материал не всегда согласуется с теоретическими представлениями. Касаясь закономерностей в области твердых растворов, установленных Н. С. Курнаковым, авторы пишут, что в некоторых случаях эти закономерности нарушаются (стр. 351). В действительности эти закономерности справедливы во всей области; когда же заходит речь о сплавах, представляющих собой химические соединения или механические смеси, естественно, зависимости имеют иной характер. Физические химические основы получения сплавов высокого сопротивления желательно было бы несколько систематизировать. В числе проводниковых материалов следовало рассмотреть также цинк, применяемый в производстве конденсаторов с металлизированной бумагой. Способность металлов противостоять окислению при высокой температуре (стр. 352) характеризуется не только объемным коэффициентом расширения; условием $K > 1$ является необходимым, но недостаточным — важную роль играет прочность и непрерывность пленки оксида и связанная с этим возможность диффузии металла на поверхность. Едва ли целесообразно говорить, что энергия электронов при столкновении с узлами решетки передается «металлической основе проводника» (стр. 344). На рис. 174 неудачно показано расположение электронов — между разрешенными энергетическими уровнями. Кроме того, обязательно присутствие только одного электрона на данном уровне; здесь могут находиться и два электрона с противоположными спинами. Касаясь сплавов, предложенных И. И. Корниловым, следовало бы указать, что известны четыре сплава с наивысшей рабочей температурой одного из них 1500°C .

Глава X посвящена полупроводникам; здесь описаны электротехнический уголь, материалы для терморезисторов, разрядников, выпрямителей, фотоэлементов и т. д. Материал, изложенный в этой главе, отличается большой наглядностью, однако физические процессы в полупроводниках освещены слабо; предоставляется возможность причисления графита к полупроводникам. П.

ичине удельного объемного сопротивления (10^{-3} ом.см) фит располагается на границе между проводниками и полупроводниками; свойствами испускания электронов, возбуждения э. д. с. и изменения сопротивления под действием света, так же как и свойствами выпрямления тока, фит не обладает. Правда, температурный коэффициент сопротивления для графита отрицателен ($\sim 10^{-3}$ град $^{-1}$), по абсолютной величине он значительно меньше, чем большинства полупроводников ($\sim 3 \cdot 10^{-2}$ град $^{-1}$). По мере использования электротехнический уголь также же к проводниковым материалам.

В главе XI излагаются представления о природе ферромагнетизма и классификация магнитных материалов; на этой основе разбираются магнитномягкие и высокочастотные материалы, конструкционные чугуны и, наконец, магнитножесткие сплавы. Особый интерес представляют новые магнитные сплавы, полученные в результате настоящей работы советских исследователей — сталь ХВП, альниси, магнико и другие. Внешнюю линию постоянного магнита

$$W_e = \frac{B_e H_e}{8\pi}$$

вильнее было бы определить как энергию магнитного поля, заключенную в единице объема воздушного зазора. К сожалению о том, что не объяснено действие пружинных элементов в магнитножестких сплавах, не ясны причины высокой проницаемости пермаллоя и альфера, не упомянуты электротехнические стали для полных частот типа ВПТ; однако это могло быть вызвано недостаточностью предоставленного объема книги. Учебник написан в согласии с программой Министерства высшего образования по электротехническим материалам, хотя и имеет некоторые отличия от нее; в частности, рассмотрены материалы для электрических контактов. Кроме учебника приведен список книг, позволяющих

углубить знания в области электротехнических материалов.

Издана книга хорошо. Число опечаток невелико, но некоторые из них являются досадными; например, в подписи к рис. 4 вместо слова «ионной» напечатано «иной». Следует с положительной стороны отметить многокрасочные изображения образцов материалов и некоторых изделий. Ознакомление учащихся с внешним видом материалов помогает их изучению. Необходимо, однако, улучшить художественное оформление некоторых цветных рисунков (например, в табл. I — шеллак, кремнийорганическая жидкость, в табл. II — пресспорошок), а также добавить рисунки, относящиеся к области проводников, кабельных изделий, магнитных материалов и полупроводников.

Подводя итог сказанному, следует отметить, что наряду с теоретическими основами электроматериаловедения в книге сообщаются главные сведения о строении, свойствах и технологии производства электроматериалов на основе современных данных. Убедительно показано первенствующее значение работ русских и советских авторов. Достоинством являются конкретные указания о практическом использовании и о технологических особенностях материалов, позволяющие наметить пути дальнейшей совместной деятельности работников науки и промышленности.

В целом рецензируемая книга представляет собой не только нужное пособие для изучающих электротехнические материалы, но может оказаться во многом полезной для лиц, сталкивающихся с вопросами использования материалов в разнообразных электротехнических устройствах, аппаратах и установках.

Кандидат техн. наук, доц. Д. М. КАЗАРНОВСКИЙ
Ленинград



С. П. ЖЕБРОВСКИЙ. ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ. 254 стр., ц. 14 руб. Госэнергоиздат, 1953.

Советский Союз — единственная страна в мире, где систематически издается специальная литература по вопросам электрической очистки газов. Эта отрасль техники являла исключительное развитие именно в Советском Союзе, где вопросами коронного разряда занимается большой круг научно-исследовательских институтов, лабораторий, проектных организаций и вузов.

Книга рассчитана на инженеров, работающих по исследованию и эксплуатации электрофильтров, а также для студентов, интересующихся коронным разрядом.

Она состоит из введения и двух частей, состоящих из пяти глав и приложений.

Введение содержит сведения о значении электрической очистки газов для народного хозяйства. Здесь дается краткая характеристика взвешенных в газе частиц; так же кратко поясняется принцип действия электрофильтров и устройство.

Часть первая — электрический разряд в газах при атмосферном давлении — состоит из пяти глав. В главе I описывается характеристика поведения ионов в газе. Глава II посвящена коронному разряду в газах. Глава III описывает развернутую теорию короны постоянного тока с подробным решением уравнения Пуассона, разбором теории и выводами основных расчетных формул для определения величины тока и короны в системах двух coaxialных цилиндров, одного и многих проводов между плоскостями. Глава IV трактует вопросы искрового разряда. Пятая глава посвящена опытным вольтамперным характеристикам короны для незапыленных газов.

Часть вторая — практическое применение коронного разряда — также состоит из пяти глав (VI—X). Шестая глава рассматривает конструкции электрофильтров, применяемых в различных отраслях промышленности СССР. Глава VII подробно разбирает физические процессы в электрофильтре. Глава VIII посвящена источникам питания электрофильтра током. Глава IX содержит характеристику условий работы, особенностей конструкции и выбора решений по изоляторам, служащим для ввода электрофильтра тока высокого напряжения. Глава X

трактует о сепарационных свойствах электрофильтра, а также об использовании этих свойств в специальных устройствах — сепараторах.

Приложения содержат графический расчет пластинчатого электрофильтра и сводку расчетных формул для определения напряженности поля и тока короны в системах.

Отдельные главы книги написаны не на одинаково высоком уровне. Хорошее впечатление оставляет материал первой части книги, в которой затронуты теоретические вопросы. Отдельные проблемы физики и техники электрической очистки газа рассматриваются в книге с неодинаковой полнотой. Наряду с хорошо развитым и детальным освещением физической стороны процесса имеет место некоторая лаконичность в разборе важных технологических факторов работы электрофильтров и влияния их на эффективность электрофильтра, в частности, влияния состава и параметров газа, дисперсности пыли, электрического режима и др.

Достоинством книги является систематичность изложения материала. Сложные процессы электрического разряда в газах при атмосферном давлении изложены на научно-строгим языком, математически интерпретированы. Конечные формулы даны в виде, пригодном для практического применения.

В книге помещено много графиков иллюстрирующих большинство математических и физических формулировок. Приводится большой экспериментальный материал, подкрепляющий теоретические выкладки. Читатель, таким образом, получает ясное и достаточно полное представление о физике и технике электрического разряда в газах при атмосферном давлении.

Вообще в первой части книги автор сумел при небольшом объеме дать весьма интересный систематизированный материал по коронному и искровому разряду в газах, отражающий результаты научно-исследовательских работ советских специалистов.

Ухудшает общее впечатление о книге сырой и местами устаревший материал, относящийся к практическому применению электрофильтров коронного разряда, помещен-

ный в главах: VI (Конструкция электрофильтров) и VIII (Источники питания). Материал, помещенный в главах VI и VIII, отражает состояние данного вопроса в период примерно 1935—1940 гг., в нем не нашли отражения опыт и достижения отечественного электрофильтростроения последних десяти лет, являющихся наиболее плодотворными и характерными годами развития данной отрасли техники в СССР.

По второй части книги необходимо сделать ряд существенных замечаний.

Глава VI, как уже указывалось выше, содержит устаревший материал по электрофильтростроению. Например, автор указывает, что для очистки дымовых газов электростанций от золы в СССР применяются сотовые электрофильтры типа ДВ и ДВМ и подробно описывает их устройство. Следовало оговорить, что указанные типы электрофильтров с 1940 г. уже не устанавливаются на электростанциях в Советском Союзе. В последние годы электростанции оборудуются более совершенными электрофильтрами типов ДВП и ДГП с карманными осадительными электродами и непрерывным встряхиванием электродов, конструкции треста «Газоочистка». То же самое относится и к описываемому автором комбинированному золоуловителю БЦЭ. Несколько таких золоуловителей было сооружено до войны на одной-двух электростанциях. В настоящее время ни электрофильтры, ни батарейные циклоны описанного типа не применяются. Сконструированы более совершенные аппараты.

Автор утверждает далее, что на металлургических заводах получили распространение три типа установок для электрической очистки доменного газа (сухая одноступенчатая очистка, двухступенчатая очистка, мокрая одноступенчатая очистка). Следовало оговорить, что в СССР на металлургических заводах получила распространение только мокрая одноступенчатая электрическая очистка, разработанная впервые в Советском Союзе и оказавшаяся самой эффективной и рентабельной. Последние конструкции этих электрофильтров с непрерывной промывкой электродов установлены и работают на нескольких заводах (например, скруббер-электрофильтры типа ДМ-156).

Электрофильтры в установках по концентрированию серной кислоты именуется в книге установками «Хемико». В связи с этим необходимо отметить, что приобретенные много лет назад у фирмы «Хемико» установки (весьма несовершенные и малопроизводительные) в нашей промышленности развития не получили. Советскими специалистами были разработаны более совершенные концентраторы, которые примерно при равных габаритах в несколько раз производительнее концентраторов «Хемико». Соответственно и электрофильтры к ним значительно отличаются от описанного в книге старого электрофильтра К-56.

В главе VII выведенные автором зависимости, относящиеся к физическим процессам в электрофильтре, справедливы лишь для идеального электрофильтра, питаемого строго постоянным током. Для реального электрофильтра, питаемого выпрямленным током от механического выпрямителя, для которого характерно наличие слагающих переходного режима при замыкании и размыкании контактов, приведенные в книге зависимости могут отличаться от действительных значений. Приведенные в этой же главе характеристики электрофильтра не следовало обобщать, так как для некоторых типов электрофильтров, например для золотых электрофильтров с непрерывным встряхиванием, они непоказательны.

В главе VIII данные об электроагрегатах ТУ-200 и ТУ-335 вызывают следующее замечание. Эти агрегаты

производились отечественной промышленностью до 1954. Позже выпускался уже электроагрегат типа АФ-18, который отличается от прежних типов конструктивными дополнениями и схемой коммутации. Приведенная же фиг. 120 схема питания электрофильтра не соответствует ни схеме старых агрегатов ТУ-200 (ТУ-335), ни схеме нового агрегата АФ-18.

Описывая системы регулирования напряжения, автор выражает мнение, что применяемая система регулирования с помощью автотрансформатора и коммутатора является слабым местом агрегата, так как коммутаторы быстро выходят из строя и будто бы правилами эксплуатации не допускается регулирование напряжения во время пробоев в электрофильтре. Это мнение автора в таком обобщенном виде нельзя считать достаточно обоснованным.

Следует высказать сожаление о том, что в материале главы VIII не нашли отражения довольно распространенные системы трехфазных агрегатов питания электрофильтров; описанный в книге трехфазно-двухфазный агрегат системы А. М. Бамдаса не применяется в электрических очистных установках.

Спорные физические предпосылки, положенные в основу предлагаемой в § 63 новой импульсной схемы питания. Автор считает, что если бы удалось поднять напряжение на электрофильтрах при данных их геометрических размерах, то это имело бы следствием существенное увеличение к. п. д., так как мы имели бы увеличение поля и значит и усиление поля. Автор предлагает питать электрофильтры импульсным напряжением, не учитывая при этом, что импульсная схема питания приведет к уменьшению тока, а не к увеличению, так как величина полезного напряжения ограничивается электрической прочностью электрофильтра, которая при импульсном питании немного больше, чем при обычном двухполупериодном.

Действительно, градиент поля, от величины которого зависит эффективность работы электрофильтра, определяется средним значением выпрямленного тока. Среднее значение тока, как известно, равно:

$$I_{cp} = \frac{1}{\sigma} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} f(x) dx.$$

Из приведенной зависимости следует, что с уменьшением площади, ограниченной кривой, среднее значение тока будет уменьшаться. При импульсном питании среднее значение тока при равных напряжениях будет значительно меньше, чем при применении двухполупериодного питания. Значительное повышение напряжения на электрофильтре при импульсном питании примерно более 110—120% невозможно из-за превышения электрической прочности электрофильтра. Поэтому и увеличение среднего значения тока (т. е. градиента) в этом случае мало вероятно.

Отмеченные недостатки, значительная часть которых могла бы быть устранена при условии более тщательного редактирования книги, необходимо ликвидировать при следующем издании.

Общее впечатление от книги положительное. Книга безусловно является ценным пособием для инженеров, занимающихся исследованием коронного разряда, а также для специалистов, работающих в области конструирования и эксплуатации электрофильтров.

Инж. В. Н. УЖ

Технический отдел треста «Газоочистка»



А. Г. КАЛАШНИКОВ. ФЛЮКСМЕТР. ТЕОРИЯ, ОПЫТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА. 158 стр., ц. 9 руб. Из-во Академии наук СССР, 1949.

Рассматриваемая работа представляет собой монографию, целью которой, по мысли автора, является показ возможностей флюксметра, как измерительного прибора, на основе теоретического и экспериментального исследования его работы и условий применения этого прибора в различных областях науки и техники. Монография состоит из введения, шести основных глав и заключения.

При оценке рецензируемой книги необходимо прежде всего отметить стремление автора разработать полную

теорию работы флюксметра (что в значительной мере и удалось осуществить), а также подтверждение отдельных положений этой теории данными экспериментальных исследований и иллюстрацию расчетными кривыми, полезными для конкретных примеров.

Автор книги установил, что представления, даваемые в общих курсах по электрическим измерениям и в различных справочниках о флюксметре как о разновидности баллистического гальванометра, не соответствуют физическим

сущности. Он показал, что теория работы флюксметра совершенно отлична от теории гальванического гальванометра и что по своим свойствам флюксметр противоположен гальванометру — баллистическому и постоянного тока.

В книге показано, что работа флюксметра зависит от формы изменения магнитного потока во времени. При этом рассмотрены три практически важных вида функций, характеризующих указанную форму изменений — линейный, экспоненциальный и периодический. Произведенный в книге анализ работы флюксметра в зависимости от формы изменения магнитного потока и от размеров цепи его рамки позволяет рассчитать величину погрешности и чувствительности этого прибора.

Разработанная автором книга теории работы флюксметра позволила ему дать основы расчета электрических параметров конструкции прибора с учетом различных вариантов схемы, в которых прибор может изменяться, а также показать, что ранее применявшиеся формулы расчета флюксметра без достаточных оснований были составлены по аналогии с расчетом чувствительных гальванометров постоянного тока.

Показано также, что при помощи флюксметра можно не только отмечать конечные изменения магнитного потока, но и решать более сложные задачи: измерять мгновенные значения потоков в течение определенного (не слишком малого) промежутка времени, осуществлять непрерывную регистрацию изменений магнитного потока или тока, запись кривых намагничивания и т. д. Наряду с перечисленными выше положительными сторонами книги необходимо указать и на некоторые ее недостатки.

Недостаточная полнота изложения темы. Основное внимание в книге уделено флюксметрам с рамкой на подвесе, т. е. приборам лабораторного типа, а флюксметры с рамкой, укрепленной на опорах или на оси, рассмотрены лишь в одном частном случае. На наш взгляд это является серьезным недостатком монографии, так как в ней не описаны, по существу, не изученными специфические особенности работы распространенной в инженерной практике группы технических флюксметров переносного типа. Не рассмотрена работа флюксметров с рамкой на подвесе в схеме с шунтом при импульсном изменении внешнего магнитного потока. Разбор режима работы флюксметра с рамкой на подвесе, в случае когда сопротивление цепи флюксметра меньше критического, не доведен до конца. Чувствительность, в книге не рассмотрено поведение рамки прибора после выключения внешней э. д. с. Между тем, описание картины работы флюксметра при сопротивлении цепи рамки ниже критического является необходимым условием выявления роли этого сопротивления и установления рекомендуемых значений последнего при применении флюксметра для разного рода измерений.

Недостатки методического характера. Порядок изложения материала в книге недостаточно выдержан методически. Например, исследование работы флюксметра при импульсном изменении внешнего магнитного потока проведено вначале для схемы без шунта и лишь после этого — для более сложной схемы с шунтом, тогда как логичное исследование при периодическом изменении магнитного потока, наоборот, вначале для схемы с шунтом и лишь после этого — для схемы без шунта.

В таблице параметров флюксметров было бы более целесообразно привести пределы их значений, а не частные значения для конкретных приборов.

Для возможности более наглядного сопоставления результатов флюксметра в различных режимах следовало бы привести экспериментальные исследования, пользуясь которыми можно было бы сравнивать параметры. То же самое следует отметить и в отношении приведенных примеров, которые следовало бы рассчитать для однотипных приборов. Аналитические выводы по теории работы флюксметра в схеме с шунтом при равномерном изменении внешнего магнитного потока проверялись экспериментально на установке с образцовой катушкой магнитного потока, т. е. при равномерном изменении потока.

Неточность формулировок, отступления от принятой терминологии. В книге нет четких указаний в отношении рекомендуемых соотношений и предельно допустимых величин индуктирующего и добавочного сопротивлений в цепи

рамки флюксметра, когда требуется понизить его чувствительность. Также нельзя найти ясного ответа на практически важный вопрос — достаточно ли аналитически определить чувствительность флюксметра в схеме с шунтом (и добавочным сопротивлением) или же рекомендуется производить градуировку приборов на специальной установке.

Не отмечено, что теоретически наимыгоднейшей величиной сопротивления цепи рамки флюксметра является критическое ее значение, когда $\beta = 0$ и $\alpha - \beta = \text{макс}$. Следовательно, сопротивление цепи рамки, близкое к критическому, может служить той отправной величиной, на которую можно ориентироваться при использовании флюксметра для измерения магнитных потоков (когда индуктивность цепи рамки достаточно велика).

Не дано пояснений, почему «можно считать, что если разность $(\alpha - \beta)$ в уравнении (37) становится меньше единицы, то прибор при данном сопротивлении работает как гальванометр» (стр. 75). Нет пояснений, из которых можно было бы видеть, почему приведенные в табл. 5 значения t_k несколько изменяются с изменением частоты, хотя в выражение для t_k частота не входит. Не сказано, для каких параметров флюксметра получены кривые на фиг. 49 и 50, а также экспериментальные данные табл. 4.

Недостаточно четко сформулированы пояснения к вопросу колебаний, происходящих в начале движения рамки флюксметра при большой индуктивности ее цепи. Следовало бы более четко подчеркнуть, что колебания в начальный период движения рамки возникают практически лишь при $t_1 < t_0 < 1$ и не возникают если $t_0 > 1$ или если t_1 существенно $> t_0$, а в конечный период движения возникают при $t_0 < 1$. На стр. 11 книги дано недостаточно ясное определение величины φ_1 .

Формула (118), выражающая ту часть отклонения рамки флюксметра, которая связана с периодическим режимом, получена, по видимому, из формулы (116а) путем исключения из нее последнего слагаемого в квадратных скобках. При этих (не оговоренных в книге) преобразованиях время действия э. д. с. (t_0) заменено текущим значением времени (t) без каких-либо пояснений и обоснований. В результате вывод: «как видно из формулы (118), конечные колебания рамки в случае достижения ею установившейся скорости не зависят от времени действия э. д. с.» — по меньшей мере не ясен, а возможно, и неверен.

Пользование многими приведенными в книге формулами затруднено, так как в ряде случаев одни и те же понятия обозначены разными символами, а иногда, наоборот, разные понятия имеют одинаковые обозначения. Автор книги не везде придерживается терминологии и обозначений, принятых в электроприборостроении и электроизмерительной технике. Это относится к таким терминам, как «возвращающий момент» вместо «противодействующий момент», «постоянная момента кручения» вместо «удельный противодействующий момент», «нормальная катушка» вместо «образцовая катушка магнитного потока» и др.

Неясна фиг. 64.

Ошибки и опечатки. При проверке расчета кривых ω и ω_k получаются значения иные, чем те, которые следуют из фиг. 32. Так, например, согласно фиг. 32 при $t = 0,6 \text{ сек}$ $\omega = 0,8$ усл. ед., тогда как по формуле (110) получается $\omega = 1 \cdot (1 - 0,004 \cdot 0,6) \approx 1,0$ усл. ед., если считать согласно сноске на стр. 87 $t_1 = 0,6 \text{ сек}$ и принять что $\frac{\Phi_0}{\varphi_0} = 1,0$ усл. ед.

Значения $t_1 = 0,35 \text{ сек}$ (стр. 73) и $t_1 = 0,6 \text{ сек}$ (сноска на стр. 87) не соответствуют получаемым из формулы (99) при заданных значениях α и β .

Кривые $\frac{d\Phi}{dt}$ на фиг. 19 и 20 для участка $t > 30 \text{ сек}$ показаны неверно, поскольку для этого участка $\Phi = \text{const}$.

В книге имеется довольно большое количество опечаток, не отмеченных в приложении к ней перечне.

Подводя итоги, необходимо наряду с отмеченными выше недостатками и погрешностями монографии подчеркнуть большой интерес этого, безусловно, своевременного издания.

Кандидат техн. наук А. М. ЛЕВИТСКИЙ
Ленинград

Новые книги по электричеству, электротехнике и электроэнергетике

(издания 1950 г.)

АЙЗЕРМАН М. А. ВВЕДЕНИЕ В ДИНАМИКУ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ. 151 стр., ц. 6 руб. 20 коп. Машгиз.

АНТИСЕПТИЧЕСКАЯ ПРОПИТКА ДРЕВЕСИНЫ ОПОР ДИФФУЗИОННЫМ СПОСОБОМ (МЭС СССР. Оргрэс). 64 стр., ц. 2 руб. 80 коп. Госэнергоиздат.

БЛОХ Э. Ш. РЕГУЛИРОВАНИЕ МАШИН. 360 стр., ц. 13 руб. 20 коп. Гос. изд-во технико-теоретической литературы.

В основу книги положен курс лекций, прочитанных автором в Московском механическом институте для студентов, инженеров и аспирантов. Книга состоит из двенадцати глав, в которых рассмотрены: схемы регулирования машин, статика регулятора, расчет регулятора с малой степенью неравномерности по методу Чебышева, основные уравнения динамики регулирования, анализ устойчивости систем регулирования, влияние параметров регулируемой системы на устойчивость процесса регулирования, критерий устойчивости Михайлова, анализ устойчивости по уравнению разомкнутой цепи регулирования, критерий аperiodической устойчивости, анализ качества процесса регулирования, критерий монотонности переходных процессов, определение параметров регуляторов для заданного регулируемого объекта.

БУРСАКОВСКИЙ Д. А., СТАНКЕЕВ Б. М. ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ РАБОТЫ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ (Библиотека рабочего-строителя гЭС, вып. 4). 51 стр., ц. 2 руб. Госэнергоиздат.

ВИНОГРАДОВ Н. В. ЭЛЕКТРОСЛЕСАРЬ ПО РЕМОНТУ И МОНТАЖУ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ. Учебник для ремесленных училищ. 236 стр., ц. 7 руб. 50 коп. Гострудсервисиздат.

ВОРОНОВ А. А. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ. 317 стр., ц. 11 руб. 50 коп. Военное изд-во.

ВОРОНОВ В. И., ЛОВЦКИЙ Н. Н. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 406 стр., + вклейка, ц. 22 руб. 85 коп. Госэнергоиздат.

ГЕНЗЕЛЬ Г. С., МОРОЗ Л. И. ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА. 200 стр. Речиздат.

ДОБРЫНИН И. Ф. ЭЛЕКТРОПРИБОРЫ В БЫТУ (Научно-популярная библиотека). 64 стр., ц. 95 коп. Гос. изд-во технико-теоретической литературы.

ИОГАНСОН Е. И. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ РЕК НА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ (Библиотека рабочего строителя гЭС, вып. 1). 56 стр., ц. 2 руб. 10 коп. Госэнергоиздат.

КАГАНОВИЧ Я. М. ЭЛЕКТРОВОЗНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ ЭП-370 и ЭЖН-350. Руководство по уходу и эксплуатации. 87 стр. Углетехиздат.

* **КИТАЕВ Е. В., ГРЕВЦЕВ Н. Ф.** КУРС ОБЩЕЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Изд. 4-е (переработанное). Допущено в качестве учебного пособия для высших учебных заведений. 808 стр., ц. 27 руб. 30 коп. Госэнергоиздат.

* **КОТЕЛЬНИКОВ В. А., НИКОЛАЕВ А. М.** ОСНОВЫ РАДИОТЕХНИКИ, ч. I. Допущено МВО СССР в качестве учебника для электротехнических вузов. 371 стр., ц. 14 руб. 10 коп. Связьиздат.

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ. Перевод под редакцией Е. Я. Пумпера, ч. I—331 стр., ц. 16 руб.; ч. II—331 стр., ц. 15 руб. Изд-во «Советское радио».

Освещены основные свойства кристаллических детекторов и полупроводников, вопросы преобразования частоты, современные взгляды на природу выпрямления кристаллическими детекторами, схемы кристаллических усилителей, типы и особенности кристаллических детекторов.

* Звездочкой отмечены книги, по которым предполагается помещать рецензии.

КУЛЕШОВ В. Н., СОКОЛОВ В. В. ПУПНИЗАЦИЯ ЛЕЙ НА ГОРОДСКИХ И ПРИГОРОДНЫХ ТЕЛЕФОННЫХ ТЯЖ. 96 стр., ц. 5 руб. 50 коп. Связьиздат.

МЕШЕРЯКОВ В. В., ЧЕННОВ И. М. ПЕРЕСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ТАБЛИЦЫ ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ. 175 стр., ц. 21 руб. Госэнергоиздат.

НЕЙМАН М. С. ТРИОДНЫЕ И ТЕТРОДНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ. 284 стр., ц. 15 руб. Изд-во «Советское радио».

НИКЕЛЬБЕРГ Е. Д., ДИВИНСКИЙ А. Б. СПРАВОЧНИК ЭЛЕКТРОМОНТАЖНИКА (МСПМ СССР, Главиздат, промонтаж). 111 стр. Машстройиздат.

ПАНКРАТЪЕВ О. Ф. и др. СПРАВОЧНИК ЭЛЕКТРОМОНТАЖНИКА НА СТРОИТЕЛЬСТВЕ. Под редакцией Н. Н. Лебедева. 335 стр. Стройиздат.

ПОПЫЛОВ Л. Я., КОЗЛОВСКИЙ Л. И. ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ. 127 стр. Машгиз.

РАКИТО Э. И. МОНТАЖ УСТРОЙСТВА СБЕ. МЕХАНИЧЕСКАЯ ЦЕНТРАЛИЗАЦИЯ, ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ БЛОКОВАЯ И ЭЛЕКТРОЖЕЛОВАЯ СИСТЕМА. 382 стр., ц. 11 руб. Трансжелдориздат.

РУКОВОДЯЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИСПЫТАНИЮ БЕЗОПАСНЫХ СТАТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ (Министерство тяжелой промышленности СССР. Главное управление энергетической промышленности СССР. Главное управление энергетической промышленности СССР). 64 стр., беспл. Металлургиздат.

ТУМАНОВ К. А., ШАРВИН Ю. В. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ. О работах лауреата Сталинской премии А. И. Шальникова. Ученые труды Академии наук СССР. Советской науки). 56 стр., ц. 95 коп. Гос. изд-во технико-теоретической литературы.

ЦЕКУЛИНА А., ЗЕБЕРГ Р., НЕЙЛАНД Р. ЭЛЕКТРОФИЗИКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАБОТ. 224 стр., ц. 3 руб. 30 коп. Латгосиздат (на латышском языке).

ЦЫКИН Г. С. ТРАНСФОРМАТОРЫ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ. Теория, расчет и конструирование. 419 стр., ц. 28 руб. 20 коп. Связьиздат.

ЧИСТЯКОВ Н. И. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АВИАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ. 534 стр., ц. 18 руб. Оборонгиз.

Книга является учебным пособием по курсу «Авиационные приборы» для вузов. В ней изложены общие вопросы расчета электрических и магнитных цепей в приборах, теория и практика расчета электрических датчиков дистанционных передач, систем и других элементов электрических и пилотажно-навигационных приборов и т. д.

Книга состоит из двадцати глав, в которых освещены методы расчета электрических и магнитных цепей в приборах электрические измерительные приборы на самолете, мостовые приборы с гальванометрическими указателями, стабилизация питания авиационных приборов, автоматические термометры с мопарами, магнитоэлектрические логометры, логометрические приборы, потенциометрические дистанционные передачи, дистанционная передача на переменном токе, самолетные тахогенераторы и расходомеры, элементы теории систем, дистанционный магнитный компас, гироскопические приборы, автоштурманы, радионавигационные приборы.

* **НИКЛЯРСКИЙ Ф. Н.** ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РУДНИЧНОГО ПОДЪЕМА. Учебное пособие для студентов вузов специальности «Горная электротехника». 268 стр., ц. 10 руб. 20 коп. Углетехиздат.

ШНЕЕРСОН Б. Л. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ. 192 стр., ц. 7 руб. 80 коп. Металлургиздат.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРОСТЕИ И ПОДСТАНЦИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ (Сборник статей) (Дом науки и техники им. Дзержинского). 316 стр., ц. 15 руб. 25 коп. Углетехиздат.

