

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ОРГАН АКАДЕМИИ НАУК СССР, МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СССР  
МИНИСТЕРСТВА ЭЛЕКТРОПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

## СОДЕРЖАНИЕ

Д. И. Марьяновский — Электромашинные усилители в системах автоматического управления и регулирования электроприводов	3
Д. П. Морозов — Возбуждение электрических машин в схемах электромашиной автоматики	8
Н. А. Монозон — Некоторые особенности теории и проектирования электромашинного усилителя	13
Н. М. Якименко — Электромашинный усилитель как элемент регулирующей системы	20
Ф. А. Горяинов и Г. К. Салгус — Расчет магнитной цепи электромашинного усилителя	27
Ю. Е. Левин и Н. И. Черняк — Система Леонарда с управляющим возбудителем	31
М. И. Книгин — Расчет переходных процессов электропривода по схеме Леонарда с трехобмоточным возбудителем	36
В. П. Бычков — Характеристики двигателя в системе Леонарда при трех обмотках возбуждения у генератора	41
В. Л. Лычковский — Остановка и реверсирование гребных винтов при их электрическом приводе	47

## АВТОРЕФЕРАТЫ

А. С. Сандлер — Электрический привод для регулирования скорости мощных вентиляторов	54
А. Г. Ивахненко — Регулирование скорости трехфазного асинхронного двигателя при помощи схемы с тиратроном и серийными трансформаторами	57
Я. П. Селицкий и Г. А. Матвеев — Магнитная проницаемость некоторых материалов в слабых полях звуковой и надзвуковой частоты	60

## ДИСКУССИИ

К автореферату Р. Л. Аронова „Оптимальное передаточное отношение при меняющемся моменте двигателя“	63
--	----

## ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

М. И. Радовский — Роль Б. С. Якоби в развитии русской и мировой электротехники	65
--	----

## ОБЗОРЫ И РЕФЕРАТЫ

Б. С. Данилин — Высоочастотный нагрев в электровакуумной промышленности	77
---	----

## ЗАМЕТКИ И ПИСЬМА

### ХРОНИКА

Второе совещание по координации научной деятельности энергетических учреждений Академии наук СССР и академий наук союзных республик	81
Всесоюзная научно-техническая сессия по обобщению опыта эксплуатации кабелей и кабельных сетей	82
Всесоюзная научно-техническая сессия по городским электрическим сетям	84
Вопросы электротранспорта на Всероссийской научно-технической конференции по городскому транспорту	87
Обсуждение деятельности журнала „Электричество“	88

## БИБЛИОГРАФИЯ

С. В. Страхов — Книга А. С. Касаткина и М. А. Перекалина „Электротехника“	89
Б. В. Горелик и Б. М. Тареев — Книга Е. К. Лашева „Слюда“	91
Книги по вопросам электричества, электротехники и электроэнергетики, изданные в 1946—1948 гг.	92

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

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

**Секретарь редколлегии инж. Я. А. Климовицкий**

**Адрес редакции:** Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2, тел. К4-24-80.

**Адрес для телеграмм:** Москва Электричество

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

# Электромашинные усилители в системах автоматического управления и регулирования электроприводов

Кандидат техн. наук Д. И. МАРЬЯНОВСКИЙ

Автоматизация производственных процессов — одна из основных задач развития промышленности СССР в послевоенной пятилетке. Эта задача может быть решена только при использовании новейших достижений электротехники.

Применение этой новой техники в электроприводах привело к большим и принципиальным изменениям в схемах автоматического управления последними.

Задачи автоматического управления электроприводами до последнего времени решались путем использования реле и контакторов, включаемых по самым различным схемам. Это привело к конструктивной разработке серий реле и контакторов, допускающих комплектование ими возможно большего числа схем разного целевого назначения.

По мере усложнения технологических процессов появляется необходимость в глубоком регулировании скорости двигателей. С увеличением скорости и производительности машин возрастает мощность электродвигателей, доходя до десятков тысяч киловатт. Частота их включений и реверсов достигает в некоторых случаях многих сотен в час. Эти требования оказались возмозможным удовлетворить с помощью схемы Леонарда, которая получает широкое применение в автоматическом управлении. Задача управления при этом решается не непосредственным воздействием на двигатель, а путем включения добавочных сопротивлений и переключений обмотки возбуждения специального генератора или его возбуждителя. Все переключения в цепи обмотки возбуждения производятся релейно-контакторными схемами.

В связи с усложнением требований, предъявляемых промышленностью к автоматическому управлению электроприводами, возникло стремление удовлетворить их путем использования принципов, лежащих в основе построения систем автоматического регулирования. Создание электромашинного усилителя явилось решающим шагом в развитии систем автоматического управления электроприводами, при котором они как бы сливаются с системами автоматического регулирования, приобретая их характерные черты. В результате применения электромашинных усилителей управление и регулирование двигателей осуществляются путем непрерывного изменения параметров по практически наиболее выгодным характеристикам. На основе критического анализа развития схемы электропривода Леонарда рассматриваются возможности электромашинных усилителей и намечаются задачи в области теории и методики их проектирования. После вводного обзора Д. И. Марьяновского публикуются статьи Д. П. Морозова, Н. А. Моносозона, Н. М. Якименко, Ф. А. Горяинова и Г. К. Салгуса, Е. Ю. Левина и Н. И. Черняка, М. И. Книгина, освещающие отдельные вопросы электромашинной автоматики.

Однако, релейно-контакторной аппаратуре при использовании ее по схеме Леонарда, а также и еще в большей степени при применении ее в схемах непосредственного воздействия на двигатель, присущ ряд недостатков, которые давали все сильнее себя чувствовать по мере возрастания требований, предъявляемых промышленностью к системам автоматического управления.

Эти недостатки состоят в следующем:

1. Прерывистое изменение управляемых параметров (тока, момента, скорости, напряжения), обусловленное релейным характером действия системы управления, замедляет скорость протекания производственных процессов и уменьшает производительность машин-орудий. Например, ток в цепи якоря при пуске в ход двигателя постоянного тока не должен превосходить некоторую, заранее заданную величину и вместе с тем должен быть, по возможности, больше, чтобы пуск совершался как можно быстрее. Поэтому в процессе пуска двигателя по мере увеличения скорости его сопротивление в цепи якоря или обмотки возбуждения генератора Леонарда шунтируется пусковыми контакторами. При каждом срабатывании контакторов ток в цепи якоря растет до заданной величины, а затем по мере нарастания скорости двигателя постепенно падает. Очевидно, что в процессе пуска двигателя ток якоря имеет предельно допустимое значение только в течение небольшой части времени, а остальное время пуска значение его меньше допустимого. Если бы этот процесс осуществлялся устройством, непрерывно поддерживающим постоянство тока, то пуск в ход совершался бы быстрее.

2. Установка значения управляемой величины достигается только тем, что для параметров системы управления выбираются значения, равные заранее вычисленным при проектировании системы и соответствующие некоторому режиму работы двигателя. Если режим работы двигателя (нагрев, напряжение, момент нагрузки и т. д.) отклоняется от предусмотренного, то соответственно меняется установленное значение управляемого параметра. Таким образом, релейно-контакторная система не стабилизирует заданное значение управляемой величины.

3. По мере роста требований, предъявляемых к системе управления, схемы управления усложняются, увеличивается количество релейно-контакторной аппаратуры, необходимой для комплектования панелей управления, что влечет за собой неприемлемую громоздкость щитов управления и значительно увеличивает трудоемкость монтажных работ. Применение контакторов на большую номинальную мощность со значительными временами втягивания и отпадания также помимо причин, указанных выше, замедляет процессы управления.

Большая частота включения при значительных номинальных мощностях контакторов и необходимость частого выключения обмотки возбуждения генератора Леонарда или обмотки возбуждения его возбuditеля, имеющих большую индуктивность, влекут за собой частый осмотр, смену и ремонт контактов, что усложняет эксплуатацию.

Если бы развитие другой области техники — автоматического регулирования — не оказало бы влияния на развитие автоматического управления, то перечисленные выше недостатки схемы Леонарда с релейно-контакторной аппаратурой положили бы предел ее развитию. Однако,ряду с автоматическим управлением шло развитие систем автоматического регулирования, которые ставили перед собой задачу поддержания с большой точностью постоянства различных эксплуатационных параметров или обеспечение их изменения по заранее заданному закону. В процессе развития этого более широкого направления техники, чем автоматическое управление электроприводами, были разработаны новые принципы и приемы.

Системы автоматического регулирования строятся по следующей скелетной схеме. Регулируемая величина сравнивается с эталоном, определяющим собой то заданное значение, которое система регулирования должна поддерживать. Разность этих величин усиливается и воздействует на регулируемый объект так, чтобы сравнить значение регулируемого параметра с эталоном. Меняя эталон, можно устанавливать различные значения регулируемого параметра.

В скелетную схему системы регулирования вводятся еще так называемые внутренние гибкие обратные связи, назначение которых состоит в том, чтобы, во-первых, предотвратить появление незатухающих колебаний и, во-вторых, получить нужную форму переходного процесса.

По мере усложнения требований, предъявляемых к системам автоматического управления возникло стремление удовлетворить их путем использования изложенных принципов автоматического регулирования. Задача, которую предстояло при этом решить, сводилась в основном к созданию устройства, управляемого малым абсолютной величины мощностями, иначе говоря, обладающего свойствами усилителя и способного воздействовать на двигатель так, чтобы изменить регулируемый параметр его, например скорость, пропорционально управляющему воздействию.

Следует отметить, что любое реле или контактор можно также отнести к устройствам подобного рода, поскольку они осуществляют путем замыкания или размыкания контактов соответствующие воздействия на управляемый параметр двигателя. Мощность, необходимая для втягивания реле или контактора, может быть тысячи раз меньше изменения мощности, проходящего в результате перемещения их контактов. Однако, отсутствие пропорциональности между величиной импульса, приложенного к катушке, и изменением мощности, произведенным перемещением контактов, не дают возможности при помощи реле и контакторов создать схему автоматического управления, использующие идеи автоматического регулирования.

Из числа известных машин и устройств, которыми располагала электротехника, наиболее пригодными для использования в качестве усилителей оказались ионные приборы (тиратроны) и ртутные выпрямители с управляемой сеткой и генераторы постоянного тока, включенные в схему Леонарда.

Первой попыткой создания управляемых усилителей явилась разработка схем с применением тиратронов, питающих двигатель постоянного тока. Возможность изменения полярности плавного регулирования напряжения, приложенного к двигателю, путем воздействия на сетку тиратронов, позволила впервые создать схемы, которые соединили в себе принципы автоматического управления и регулирования. Схемы позволяли, например, плавно менять скорость двигателя в широких диапазонах. Любое установленное значение скорости можно стабилизировать с достаточной степенью точности так, что оно остается постоянным при значительных изменениях внешних факторов: колебаниях напряжения сети, изменениях нагрузки, а также при любых изменениях характеристик и параметров самого устройства автоматического управления.

Тиратроны применяются для сравнительно небольших мощностей, и схемы с их использованием можно было создать только для двигателей мощностью не более, чем в несколько киловатт. Такие схемы применяются до сих пор для управления двигателями небольшой мощности, например в приводе металлообрабатывающих станков, но вследствие ряда существенных недостатков, свойственных вообще ионным приборам, они не получили пока большого распространения.

Управление двигателями большей мощности можно было осуществить двумя вариантами: либо применением генератора по схеме Леонарда, обмотка возбуждения которого питалась бы от тиратронов, либо питанием двигателей от сети переменного тока через ртутные выпрямители с управляемой сеткой.

Первый вариант потерял практическое значение после появления электромашинного усилителя («амплидина»), что же касается второго варианта, то мощность, требуемая для управления сеткой, оказывается столь значительной, что для создания схем, способных конкурировать с упомянутыми ниже, пришлось бы применить усилители для питания сеток. Это обстоятельство, а также недостаточная надежность в эксплуатации привели к тому, что применение ртутных выпрямителей оказалось нецелесообразным для приводов, управление которыми содержит элементы автоматического регулирования, и осталось довольно ограниченным во всех прочих случаях.

Широкое применение электромашинных усилителей явилось тем направлением новой техники, которое обеспечило развитие систем автоматического управления в соответствии с требованиями, предъявляемыми промышленностью.

Под электромашинными усилителями понимают генераторы постоянного тока с относительно очень малой мощностью возбуждения. Если обычный генератор требует для возбуждения мощность порядка 1—5% номинальной, то усилитель возбуждается при мощностях в 50—100 раз меньших. Таким образом, номинальная или выходная мощность электромашинного усилителя в 2000—10 000 раз больше мощности, необходимой для его возбуждения.

Кроме того, усилитель имеет значительно меньшую постоянную времени сравнительно с обычным генератором постоянного тока той же мощности. Иными словами, нарастание напряжения на зажимах усилителя после приложения напряжения к его обмотке возбуждения происходит значительно быстрее.

Электромашинные усилители выполняются самым различным образом. Наибольшее распространение получила конструкция, выполняемая в виде машины постоянного тока с парой дополнительных короткозамкнутых щеток в поперечной оси и с дополнительной обмоткой, компенсирующей поле якоря в продольной оси. Усилители строятся на мощности от нескольких сот ватт до нескольких десятков киловатт. При этом мощность обмотки возбуждения составляет от десятых долей до 2—3 ватт.

Малая мощность, необходимая для возбуждения, позволяет иметь в продольной оси несколько так называемых управляющих обмоток. Эти обмотки используются как для целей возбуждения, так и для введения в систему противоколебательных воздействий, осуществляющих устойчивую работу, а также используются для автоматической форсировки работы двигателей и

для защиты их от перегрузки, от аварий при заклинивании и от коротких замыканий. Управляющие обмотки могут быть использованы для получения желательных характеристик двигателя, а также для стабилизации величины управляемого параметра. В последнем случае для сравнения величины управляемого параметра со значением эталона могут быть использованы магнитные потоки двух управляющих обмоток, питаемых напряжениями, пропорциональными этим величинам.

Управляющие обмотки должны допускать тем более высокие перегрузки, чем выше точность стабилизации управляемого параметра. Этим обстоятельством, а также малыми мощностями, которыми располагают для получения противоколебательных воздействий, для автоматической форсировки и других воздействий на кривые переходных процессов, объясняется особое значение больших по мощности коэффициентов усиления электромашинных усилителей.

Таким образом, система возбуждения электромашинных усилителей совмещает в себе целый ряд функций, которые ранее менее совершенно осуществляла сложная релейно-контактная схема.

Электромашинные усилители позволяют комплектовать схемы автоматического управления и регулирования, удовлетворяющие самым разнообразным техническим условиям, из стандартных, надежных и простых деталей (омические сопротивления малой мощности, конденсаторы, сухие выпрямители и трансформаторы).

Питание управляющих обмоток от электронных ламп осуществляется при требовании высокой точности стабилизации управляемого параметра и в некоторых специальных случаях, как, например, при использовании электромашинных усилителей в следящих системах.

Электромашинный усилитель может выполнять весьма разнообразные функции. Его можно использовать как: 1) генератор в схеме Леонарда, если мощность двигателя не превышает нескольких киловатт; 2) возбудитель в схеме Леонарда при мощности двигателя не выше нескольких сот киловатт; 3) подвозбудитель (возбудитель возбудителя) генератора в схеме Леонарда, если мощность двигателя порядка тысяч киловатт; 4) возбудитель синхронного двигателя, работающего с быстро меняющейся нагрузкой, или синхронного генератора при автоматическом регулировании генерируемого напряжения в случае, если мощность синхронной машины не превышает двух-трех тысяч киловатт; 5) подвозбудитель в системе возбуждения синхронного генератора практически любой мощности; 6) бустер в главной цепи генератора Леонарда или как возбудитель этого бустера; 7) промежуточный усилитель управляющего сигнала.

Замена контакторного управления двигателями управлением по схеме Леонарда вносит только количественные изменения в схему управления. Контактные элементы как основной элемент схемы попрежнему остаются, облегчается только

тип и уменьшается несколько число их вследствие некоторого упрощения схемы соединений. При замене обычного генератора или его возбuditеля в схеме Леонарда электромашиным усилителем происходит уже качественное изменение в схеме управления двигателем. Полностью исчезают контакторы и контакторные панели; дискретные — прерывистые — изменения параметров цепи, управляющей напряжением, приложенным к двигателю, заменяются непрерывным и плавным изменением, совершающимся автоматически. При применении электромашинных усилителей системы автоматического управления как бы сливаются с системами автоматического регулирования, приобретая их характерные черты.

Основные достоинства электромашинного усилителя как генератора или как возбuditеля в схеме Леонарда заключаются в следующем:

1. Достигается возможность пуска в ход реверса и торможения двигателя по любой характеристике, а также возможность регулирования любых величин, характеризующих работу двигателя, как функцию ряда параметров. Например, можно осуществить пуск двигателя так, чтобы ток во время пуска сохранял наперед заданную величину. Можно, например, обеспечить серийную пусковую характеристику шунтовому двигателю. Возможно поддерживать постоянное число оборотов двигателя или постоянное соотношение чисел оборотов нескольких двигателей. Осуществимы пуск и остановка двигателя в заданном положении ротора в кратчайшее время и с высокой точностью. Можно осуществить по сравнительно простой схеме силовой следящий привод, синфазное движение двух или нескольких осей и т. д.

Использование электромашинного усилителя для управления двигателями предоставляет неограниченные возможности в смысле регулирования любых величин, характеризующих работу двигателя, как функцию ряда параметров, а также неограниченные возможности в отношении дальнейшей автоматизации производственных процессов.

2. Управление двигателями при использовании электромашинных усилителей может совершаться путем непрерывного изменения параметров по практически наивыгоднейшим характеристикам, скорость всех производственных процессов и производительность машин с таким приводом благодаря этому значительно повышаются, а управление упрощается и облегчается.

3. Полностью отсутствуют контакторы и пусковые и регулировочные сопротивления в силовых цепях. Значительно уменьшается количество реле и другой аппаратуры. Сокращается число панелей щита управления, что приводит к экономии площадей и к уменьшению объема и продолжительности монтажа и наладки. Упрощается обслуживание, поскольку отпадает необходимость в частой регулировке контакторов и в осмотре и замене их контактов.

Приведем примеры установок, где электромашинный усилитель может быть применен как

элемент системы автоматического регулирования и управления электроприводами.

1. Регулировка скорости и синхронизация многомоторных бумагоделательных и типографских машин, разводных мостов и т. п., а также поддержание постоянного соотношения скоростей многоклетевых непрерывных прокатных станов.

2. Следящие системы с электродвигателями постоянного тока, включенными по схеме Леонарда.

3. Автоматическое управление и регулирование скорости в мощных приводах с частыми реверсами, реверсами, торможениями и другими специальными условиями, как, например: шахтные подъемные машины, реверсивные прокатные станы, экскаваторы.

4. Автоматическое регулирование подачи электроприводах лесопильных рам, буровых станков в нефтяной промышленности и т. д.

5. Автоматическое управление и регулирование скорости электроприводов металлорежущих станков, как, например, копировальных и строгальных.

6. Регулируемый и управляемый электроприводы вспомогательных механизмов прокатных станов (нажимных устройств, ножниц, рольгангов).

7. Прочие задачи электропривода: автоматическое регулирование натяжения ленты в электроприводах моталок (для станов холодной прокатки листов, намоточных станков), автоматическая перестановка электродов дуговых сталеплавильных печей и т. д.

Уместно отметить, что при ряде неоспоримых достоинств электромашинных усилителей и многочисленных областях их применения они, разумеется, не представляют собой единственного и универсального средства решения всех задач автоматического управления электроприводами. Имеется ряд других устройств, как, например, гидромолфы, ионные приборы (тиратроны) и электроионные лампы, электромагнитные муфты, ртутные выпрямители с управляемой сеткой и дроссели насыщения, которые в определенных условиях успешно конкурируют с ними.

Как указывалось выше, двигатель постоянного тока, питаемый от тиатронов, продолжает широко применяться в станочном приводе. В этой же области нашел применение и гидропривод. Иногда для питания обмотки возбуждения генератора электродвигателя, включенного по схеме Леонарда, особенно если мощность этой обмотки не превышает  $100 \div 200$  ватт, используются вместо электромашинных магнитные усилители. Также находят иногда применение для непосредственного питания от сети переменного тока мощных управляемых электроприводов ртутные выпрямители с управляемой сеткой, поскольку при их наличии отпадает необходимость в генераторе Леонарда. Если момент нагрузки падает с уменьшением скорости, то применяют дроссели насыщения для регулирования скорости мощных асинхронных двигателей изменением напряжения статора.

Другие виды приводов, особенно сильно конкурируют с электромашинными усилителями в области следящих систем. В тех случаях, когда для слежения требуется большая мощность, обычно применяется гидромuftа, как силовой привод, и только управление ею осуществляется электрическими средствами. В следящем приводе, где требуется мощность от 200 ватт до 2÷3 киловатт, применяется как гидромuftа, так и схема Леснарда с электромашинным усилителем.

Кроме основного своего применения в электроприводе электромашинные усилители, как уже указывалось, применяются также при регулировании напряжения, где они используются как возбудители или подвозбудители синхронных генераторов средних и больших мощностей.

Существенные преимущества такой системы возбуждения заключаются в следующем:

1. Исключаются из схемы реостаты в цепях возбуждения и приводы к ним.

2. Удастся избежать необходимости применения ионных ламп даже для синхронных генераторов мощностью до 100 000 киловатт.

3. Удастся создать достаточно быстродействующие системы регулирования, в которых управляющие обмотки электромашинных усилителей питаются постоянным током, выпрямляемым сухими выпрямителями и контролируемым магнитным усилителем. В таких схемах вовсе не используются электронные лампы даже при высокой точности регулирования.

4. Удастся осуществить простыми средствами компаундирование синхронных генераторов.

5. Обеспечивается автоматическая форсировка возбуждения в ряде специальных случаев.

6. Аппаратура автоматического регулирования синхронных генераторов получается исключительно компактная, надежная и простая.

В области автоматического регулирования напряжения с электромашинными усилителями успешно конкурируют дроссели насыщения, имеющие во многих случаях ряд преимуществ перед ними (см. статью «Развитие дросселей насыщения как элементов систем автоматического регулирования и управления», опубликованную в журнале «Электричество», № 5, 1948).

В развитии электромашинных усилителей значительную роль сыграли советские инженеры и ученые. Здесь следует отметить в первую очередь работы К. И. Шенфера. С помощью электромашинного усилителя, предложенного М. П. Костенко (Электричество, № 7, 1925), была впервые осуществлена силовая следящая система. Впервые СССР электромашинный усилитель в том конструктивном выполнении, какое он имеет в настоящее время, был построен А. Г. Иосифьяном в 1940 году, им же впервые была разработана общая теория электромашинных усилителей (см. Доклады Академии наук Армянской ССР, III, 3, 1945 г.). Разработка конструкций советских электромашинных усилителей и схем автоматического регулирования и управле-

ния, основанных на их использовании, начавшаяся еще задолго до Великой Отечественной войны, широко развернулась в СССР в послевоенное время (В. С. Кулебакин, В. П. Никитин, Н. П. Куницкий, Я. С. Эпштейн, М. И. Романов, М. В. Мееров и др.).

Одна из основных задач, стоящих перед советскими учеными и инженерами в области дальнейшего развития и использования в промышленности электромашинных усилителей, заключается в разработке методов проектирования схем автоматического регулирования и управления электроприводов с их применением.

Для проектирования современных релейно-контакторных схем существуют хорошо разработанные расчетные методы (графические, аналитические и графоаналитические), с помощью которых выбираются их основные параметры. Предварительно разработанные и освоенные промышленностью серии реле, контакторов и прочей стандартной аппаратуры, необходимой для комплектования устройств автоматического управления и допускающие большое число разных форм выполнения, позволяют составлять из них схемы, имеющие предварительно рассчитанные значения параметров и удовлетворяющие поставленным техническим требованиям.

Нельзя, конечно, утверждать, что методы проектирования для схем автоматического управления и регулирования электроприводов с применением электромашинных усилителей будут аналогичны тем, о которых говорилось выше. Действительно, при проектировании систем с электромашинными усилителями приходится, например, обеспечивать динамическую устойчивость, определенную форму кривой переходного процесса и т. д. Это достигается путем введения в систему внутренних обратных связей, для которых приходится подбирать соответствующие параметры, определяя предварительно форму этих связей и место в системе, где они должны быть введены так, чтобы действие их было возможно более эффективным. Существует обычно несколько вариантов решения каждой такой задачи, представляющей собой, по существу, задачу динамики системы со многими степенями свободы. Из этих вариантов следует выбрать наилучшие.

Таким образом, наряду с разработкой стандартных элементов схем автоматического управления и регулирования электроприводов с электромашинными усилителями и методов их расчета придется разработать также методы расчета переходных процессов в проектируемых системах, удовлетворяющих поставленным техническим требованиям. Очевидно, эта методика будет состоять из параллельного использования расчетных приемов и экспериментов на специальных моделях.

Разработка таких моделей и соответственной методики теоретических расчетов представляет собой одну из первоочередных задач в области внедрения электромашинной автоматики.

# Возбуждение электрических машин в схемах электромашинной автоматики

Доктор техн. наук, проф. Д. П. МОРОЗОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

**Введение.** В современных весьма сложных схемах электромашинной автоматики возбуждение главной машины (генератора или двигателя) обеспечивается, помимо возбуждителя, одной или несколькими вспомогательными машинами. Таким образом, имеет место двухступенчатая (каскадная или квадратичная система), а в некоторых случаях и трехступенчатая система возбуждения. Для достижения оптимальных режимов электропривода, а также в целях регулирования или стабилизации его электрических и механических параметров (напряжения, тока, скорости вращения, натяжения), в схемах автоматики вводятся дополнительные элементы: вспомогательные электрические машины специального назначения, потенциометрические сопротивления, купроксные выпрямители в тех или иных сочетаниях. Электрические машины — главные и вспомогательные — имеют в таких схемах не одну, а несколько обмоток возбуждения, питание или присоединение которых, в зависимости от назначения, может осуществляться различным способом.

При многоступенчатой системе возбуждения

В схемах электромашинной автоматики применяются машины, имеющие несколько обмоток возбуждения. Дано исследование системы возбуждения с двумя обмотками — независимой и самовозбуждения — при согласном включении обмоток, применяемом в машине типа «рототрол» и противоположном, используемом в специальных схемах. Также рассматривается процесс возбуждения в насыщенном возбуждительном генераторе типа «регулекс».

аналитическое исследование переходных процессов на конечном или промежуточном звеньях ставится в связи с этим достаточной степени затруднительным. Поэтому будет целесообразно

исследовать свойства отдельных узлов схемы или главнейших методов возбуждения основных и вспомогательных машин. При таком методе исследования попутно выявятся соотношения между отдельными параметрами или величинами, а также определятся значения и формулы для основных коэффициентов и физических величин (постоянные времени).

В данной работе производится исследование процесса возбуждения для некоторых весьма интересных и часто применяемых в настоящее время узлов схем. На рис. 1 изображена схема соединений машины постоянного тока, у которой имеются две обмотки возбуждения — независимая и самовозбуждения. Согласно включению обмоток самовозбуждения и независимой применяется в машинах типа «рототрол», противоположное их действие используется в специальных схемах электромашинной автоматики.

**Шунтовая обмотка размагничивающая.** Исследуем процесс возбуждения, считая, что входным импульсом является замыкание ключа в обмотке независимого возбуждения, подключенной к источнику постоянного напряжения. Обозначим через  $\Phi$  результирующий поток якоря от суммарных ампервитков обеих обмоток, а через  $e$  — э. д. с., наводимую этим потоком в якоре. Будем предполагать, что между обеими обмотками возбуждения имеет место полное магнитное сцепление, т. е. индуктивность от потоков рассеяния равна нулю. Будут пренебрегать токами Фуко в массивных частях магнитопровода, следующие уравнения переходного процесса:

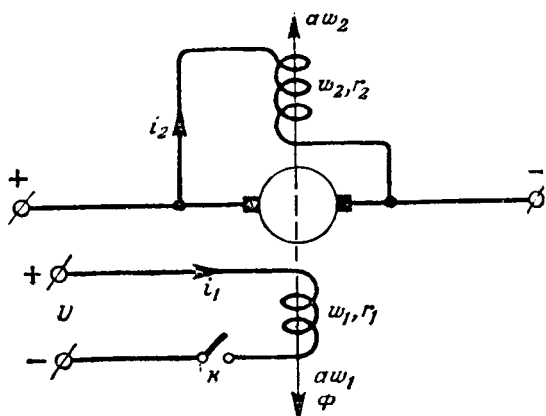


Рис. 1. Схема включения генератора постоянного тока с двумя обмотками возбуждения.

$$U = i_1 r_1 + w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8}, \quad (1)$$

$$e = i_2 r_2 - w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8}, \quad (2)$$

$$e = (i_1 w_1 - i_2 w_2) \beta. \quad (3)$$

Величинам, относящимся к обмотке независимого возбуждения, приписан индекс 1, а относящимся к шунтовой обмотке индекс 2. Величина  $\beta$  есть коэффициент пропорциональности между э. д. с. генератора и его ампервитками возбуждения, она легко может быть найдена по характеристике намагничивания, которая предполагается прямолинейной.

Преобразуем написанные уравнения, для чего все члены первого разделим на  $r_1$  и умножим на  $w_1$ , а все члены второго разделим на  $r_2$  и умножим на  $w_2$ . Кроме того, примем во внимание известные из теорий электрических машин соотношения:

$$e = \frac{p \cdot n}{60} \frac{N}{a} \Phi \cdot 10^{-8} = k \Phi \cdot 10^{-8}, \quad (4)$$

$$k = \frac{pn}{60} \cdot \frac{N}{a}, \quad (5)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{k \cdot 10^{-8}} \frac{de}{dt}. \quad (6)$$

После выполнения указанных преобразований получим:

$$\frac{U w_1}{r_1} = i_1 w_1 + \frac{w_1^2}{k r_1} \cdot \frac{de}{dt}, \quad (7)$$

$$\frac{e w_2}{r_2} = i_2 w_2 - \frac{w_2^2}{k r_2} \cdot \frac{de}{dt}. \quad (8)$$

Если произвести почленное вычитание соотношения (8) из (7) и принять во внимание (3), то получим в окончательном виде дифференциальное уравнение переходного процесса возбуждения:

$$\frac{de}{dt} + \frac{(r_2 + \beta w_2) k r_1}{\beta (w_1^2 r_2 + w_2^2 r_1)} e = \frac{U \cdot k w_1 r_2}{r_2 w_1^2 + r_1 w_2^2}. \quad (9)$$

Из этого уравнения следует, что нарастание э. д. с. генератора, а значит, и его потока возбуждения подчиняется закону простой экспоненциальной функции. На основании (9) эквивалентная постоянная времени процесса возбуждения может быть выражена формулой:

$$T_s = \frac{\beta (w_1^2 r_2 + w_2^2 r_1)}{k r_1 (r_2 + \beta w_2)}. \quad (10)$$

Если положить  $r_2 = \infty$ , что будет иметь место при разомкнутой шунтовой обмотке, то из выражения (10) получим формулу для электромагнитной постоянной времени обмотки независимого возбуждения:

$$T_1 = \frac{w_1^2 \beta}{k r_1} = \frac{L_1}{r_1}. \quad (11)$$

По аналогии, электромагнитная постоянная времени обмотки самовозбуждения

$$T_2 = \frac{w_2^2 \beta}{k r_2} = \frac{L_2}{r_2}. \quad (12)$$

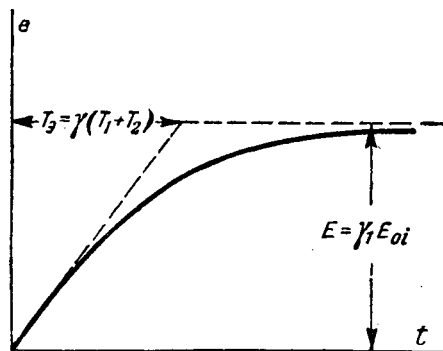


Рис. 2. Изменение э. д. с. генератора во времени.

В связи с этим

$$T_s = \frac{r_2}{r_2 + \beta w_2} \left( \frac{w_1^2 \beta}{k r_1} + \frac{w_2^2 \beta}{k r_2} \right) = \gamma_1 (T_1 + T_2), \quad (13)$$

где

$$\gamma_1 = \frac{r_2}{r_2 + \beta w_2}. \quad (14)$$

Из уравнения (9) получается также величина установившегося значения э. д. с. генератора

$$E = \frac{U w_1 \beta}{r_1} \cdot \frac{r_2}{r_2 + \beta w_2} = \gamma_1 E_{01}, \quad (15)$$

так как

$$\frac{U w_1 \beta}{r_1} = I_{01} w_1 \beta = E_{01}, \quad (16)$$

здесь  $I_{01}$  — установившийся ток в обмотке независимого возбуждения;

$E_{01}$  — э. д. с. генератора в том случае, если бы действовала только эта одна обмотка.

Дифференциальное уравнение (9) согласно всем принятым обозначениям может быть записано теперь в следующем виде:

$$\frac{de}{dt} + \frac{e}{\gamma_1 (T_1 + T_2)} = \frac{E}{\gamma_1 (T_1 + T_2)}. \quad (17)$$

и его решение, если при  $t=0$ ,  $e=0$ ,

$$e = E \left( 1 - e^{-\frac{t}{\gamma_1 (T_1 + T_2)}} \right) = \gamma_1 E_{01} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\gamma_1 (T_1 + T_2)}} \right). \quad (18)$$

При оценке продолжительности переходного процесса (рис. 2) необходимо учесть, что при данном способе включения обмоток возбуждения коэффициент  $\gamma_1$  — есть величина, меньшая единицы. Эквивалентная постоянная времени, определяемая согласно формуле (13), по своей величине может быть близка к величине постоянной времени обмотки независимого возбуждения. При очень же малых значениях  $\gamma_1$ , когда ампервитки обеих обмоток возбуждения близки друг к другу, эквивалентная постоянная времени может получить весьма небольшую величину.

Намагничивающие токи  $i_1$  и  $i_2$  в обмотках независимого и самовозбуждения легко определяются, если использовать исходные уравнения (1), (2) и (3).

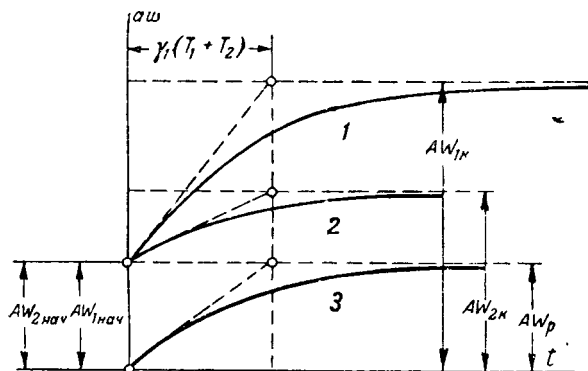


Рис. 3. Кривые изменения ампервитков обмоток возбуждения и результирующих ампервитков.

Если в уравнение (1) подставить производную  $\frac{de}{dt}$  из (18) и произвести необходимые преобразования, то для намагничивающего тока в обмотке независимого возбуждения будет получено уравнение;

$$i_1 = \frac{I_{01}T_2}{T_1 + T_2} + \frac{I_{01}T_1}{T_1 + T_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\gamma_1(T_1 + T_2)}}\right) \quad (19)$$

или

$$i_1 = I_{1нач} + (I_{01} - I_{1нач}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\gamma_1(T_1 + T_2)}}\right), \quad (19a)$$

где

$$I_{1нач} = \frac{I_{01}T_1}{T_1 + T_2} \quad (20)$$

есть начальное значение тока  $i_1$  при  $t = 0$ .

Ток в обмотке самовозбуждения может быть получен с помощью уравнения (3). После соответствующих преобразований

$$i_2 = \frac{w_1}{w_2} I_{01} \left[ \frac{T_2}{T_1 + T_2} + \left( \frac{T_1}{T_1 + T_2} - \gamma_1 \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\gamma_1(T_1 + T_2)}}\right) \right]. \quad (21)$$

Начальное значение тока в обмотке самовозбуждения

$$I_{2нач} = \frac{w_1}{w_2} \cdot I_{01} \frac{T_2}{T_1 + T_2} = \frac{w_1}{w_2} I_{1нач}. \quad (22)$$

Конечное значение тока в обмотке самовозбуждения

$$I_{2к} = \frac{w_1}{w_2} (1 - \gamma_1) I_{01}. \quad (23)$$

На рис. 3 построена примерная кривая изменения по времени ампервитков независимой обмотки (кривая 1); ампервитков обмотки самовозбуждения (кривая 2) и результирующих ампервитков (кривая 3) при условии отсутствия рассеяния. Результирующие ампервитки в начальный момент равны нулю, а ампервитки обеих обмоток порознь получают в начальный момент времени скачком некоторое конечное значение.

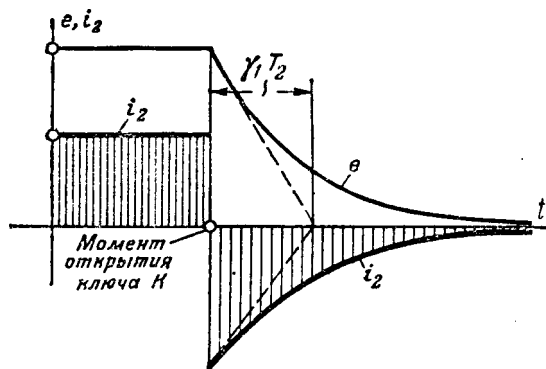


Рис. 4. Изменение э. д. с. и тока обмотки возбуждения при развозбуждении.

Представляет интерес процесс развозбуждения, который будет получен, если при установившемся значении э. д. с. генератора  $E$  (рис. 1) будет открыт ключ  $K$ . Исходные уравнения в данном случае будут составлены из (7), (8) и (3), если положить в них  $i_1 = 0$ . Будем иметь

$$e = L_2 r_2 - \frac{w_2}{k} \cdot \frac{de}{dt}, \quad (24)$$

$$e = -i_2 w_2 \beta. \quad (25)$$

После очевидных преобразований получим

$$-\frac{dt}{\gamma_1 T_2} = \frac{de}{e}. \quad (26)$$

После интегрирования и подстановки начальных условий (при  $t = 0$ ;  $e = E$ )

$$e = E e^{-\frac{t}{\gamma_1 T_2}} \quad (27)$$

и для тока

$$i_2 = -\frac{e}{w_2 \beta} = -\frac{E}{w_2 \beta} e^{-\frac{t}{\gamma_1 T_2}} = -\frac{w_1}{w_2} I_{01} \gamma_1 e^{-\frac{t}{\gamma_1 T_2}}. \quad (28)$$

Знак минус перед правой частью этой формулы показывает, что в начальный момент времени ток в обмотке самовозбуждения мгновенно меняет свою величину, и знак, для того чтобы обеспечить при отключенной обмотке независимого возбуждения прежнее значение потока машины. Поведение во времени тока обмотки самовозбуждения и э. д. с. генератора изображено в виде кривых на рис. 4.

Постоянная времени процесса определяется величиной  $\gamma_1 T_2$ . Если  $\gamma_1$  значительно меньше единицы, то процесс развозбуждения будет происходить весьма быстро. Подобная схема находит также применение для быстрого развозбуждения и одновременно для уменьшения влияния остаточного магнетизма. На основании формулы (15) нетрудно установить, что остаточная э. д. с. генератора

$$E_p = \gamma_1 E_{0p}, \quad (29)$$

где  $E_{0p}$  — величина э. д. с. генератора от остаточного магнетизма,

$\gamma_1$  — определяемая формулой (14) величина, меньшая единицы.

Шунтовая обмотка включена согласно. Если шунтовая обмотка будет иметь согласное включение с обмоткой независимого возбуждения, то исходные уравнения переходного процесса возбуждения при замыкании ключа  $K$  на схеме рис. 1 получат следующий вид:

$$U = i_1 r_1 + w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8}, \quad (30)$$

$$e = i_2 r_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8}, \quad (31)$$

$$e = (i_1 w_1 + i_2 w_2) \beta. \quad (32)$$

Интегрирование этих дифференциальных уравнений производится таким же порядком, как и в предыдущем случае. Уравнение для э. д. с. в окончательном виде:

$$e = E \left( 1 - e^{-\frac{t}{\gamma_2 (T_1 + T_2)}} \right) = \gamma_2 E_{01} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\gamma_2 (T_1 + T_2)}} \right). \quad (33)$$

Это выражение аналогично (18). Различие между ними состоит в величине коэффициента  $\gamma$ , который в данном случае определяется формулой

$$\gamma_2 = \frac{E}{E_{01}} = \frac{r_2}{r_2 - \beta w_2}. \quad (34)$$

Коэффициент  $\gamma_2$  больше единицы и в данном способе включения обмоток, характерном для электрических машин типа роторол, эквивалентная постоянная времени переходного процесса возбуждения больше суммы электромагнитных постоянных времени составляющих обмоток и по сравнению с каждой из этих последних может получить большие значения. В связи с этим необходимо отметить, что если вспомогательные машины типа роторол применяются в системе регуляторов того или иного назначения, то продолжительность переходных процессов пуска, торможения и реверса определяется не параметрами вспомогательных машин регулирования, а основными параметрами главной цепи возбуждения. Что же касается скорости самого процесса регулирования, то он протекает в достаточной степени удовлетворительно при наличии специальных мероприятий по форсированию или же благодаря неизбежному форсированию, обусловленному принципом действия подобного типа электромашинных усилителей и зависящему от коэффициента усиления. С помощью уравнений (33), (30) и (31) нетрудно вывести аналитические зависимости для токов в обеих обмотках таким же способом, как это сделано выше для встречного включения намагничивающих обмоток.

Уравнение (33) позволяет выяснить влияние величины остаточного магнетизма на продолжительность процесса самовозбуждения. Допустим, что обмотка независимого возбуждения в машине отсутствует. Обозначим величину э. д. с. генератора от остаточного магнетизма через  $E_{01}$ . После включения шунтовой обмотки будет про-

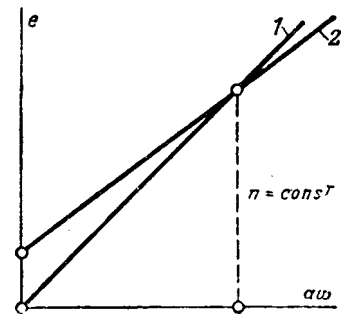


Рис. 5. Характеристики намагничивания и вольтамперная.

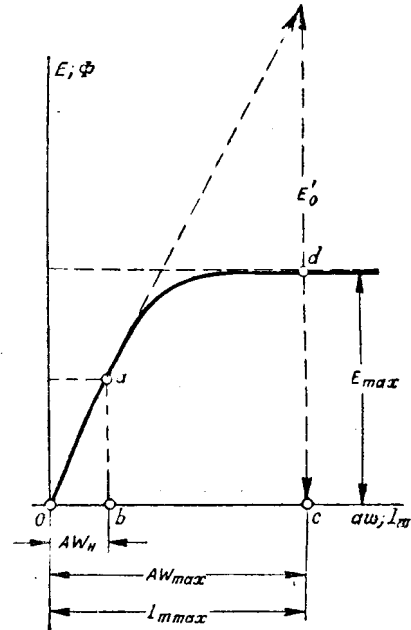


Рис. 6. Основные величины процесса возбуждения насыщенного генератора.

исходить процесс возбуждения генератора до величины  $E$ , определяемой точкой пересечения характеристики намагничивания и вольтамперной характеристикой (рис. 5). Поведение процесса возбуждения для данного случая может быть описано уравнением (33), если положить в нем  $T_1 = 0$ :

$$e = E \left( 1 - e^{-\frac{t}{\gamma_3 T_2}} \right) = \gamma_3 E_{01} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\gamma_3 T_2}} \right), \quad (35)$$

где

$$\gamma_3 = \frac{E}{E_{01}} = \frac{r_2}{r_2 - \beta w_2}. \quad (36)$$

Продолжительность процесса оценим примерно, как это принято при практических подсчетах, учетверенной величиной электромагнитной постоянной времени:

$$t_s = 4\gamma_3 T_2 = \frac{4E r_2}{E_{01}}. \quad (37)$$

Отсюда следует, что продолжительность процесса самовозбуждения обратно пропорциональна э. д. с. от остаточного магнетизма. Конечно, это

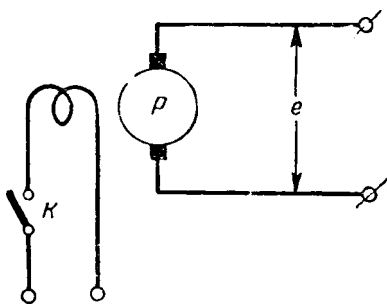


Рис. 7. Элементарная схема включения «регулекса».

положение является строгим для прямолинейной части характеристики намагничивания. Точное решение этого вопроса графическим методом и с учетом насыщения дано Рюденом [Л. 1].

**Возбуждение насыщенных машин.** Электромашиный усилитель («амплидин»), входящий в систему возбуждения генератора, питающего двигатель реверсивного исполнительного механизма, получает на первом этапе переходного процесса ампервитки, в несколько раз превышающие их номинальное значение. Коэффициент форсирования по ампервиткам (рис. 6)

$$\mu_a = \frac{AW_{\max}}{AW_n} = \frac{oc}{ob} \quad (38)$$

достигает значений, равных 10—20.

В аналогичные условия возбуждения ставится специальная вспомогательная машина «регулекс», у которой этот коэффициент имеет еще более высокие значения (20—30) в тех случаях, когда «регулекс» применяется в качестве подвозбудителя в системе электропривода.

Коэффициент форсирования по напряжению имеет (рис. 6) в обеих названных машинах значительно меньшие величины и лежит в пределах 3—4:

$$\mu_e = \frac{E_{\max}}{E_n} = \frac{dc}{ab}. \quad (39)$$

Прямолинейный участок характеристики намагничивания доходит примерно до 80—90% от потолочного напряжения  $E_{\max}$ .

Рассмотрим процесс возбуждения в насыщенном возбудительном генераторе «регулекс», схема которого в простейшем случае представ-

ляет обычную машину постоянного тока с независимым возбуждением, согласно схеме рис. 7. Выразить его аналитически в полном объеме, очевидно, нельзя. Но для прямолинейного участка кривой намагничивания, т. е. пока процесс возбуждения будет протекать при  $L = \text{const}$ , поведение во времени тока возбуждения и э. д. с. генератора подчиняется законам обычной экспоненциальной функции. При замыкании ключа  $K$  на схеме рис. 7 ток в обмотке возбуждения нарастает, причем пусть установившееся его значение будет  $I_{\max}$ , что соответствует  $AW_{\max}$ . Пока в процессе нарастания между намагничивающим током и э. д. с. имеет место линейная зависимость, их поведение во времени подчиняется уравнениям:

$$i_m = I_{m \max} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = \mu_a I_{m.n} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (40)$$

$$e = E_0' \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = \mu_e E_n \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (41)$$

Так как

$$\frac{AW_{\max}}{AW_n} = \frac{E_{01}'}{E_n} = \mu_a.$$

Величина  $E_0'$  определяется по рис. 6 точкой пересечения продолжения прямолинейной части механической характеристики и ординатой, проведенной через точку  $c$ .

Из рассмотрения этих уравнений следует, что наличие большого насыщения может быть использовано как очень эффективный метод форсирования переходного процесса в начальной и средней части его протекания, которые обычно являются рабочими участками процесса возбуждения. Этот принцип действия «регулекса» и кладется в основу его применения в качестве быстродействующего возбудителя в схемах электропривода с электромашиной автоматикой.

#### Литература

1. Р. Рюденом. Явления неустановившегося режима в электрических установках. Государственное издательство, 1930.
2. Ф. А. Горянов. Время возбуждения регулятора. Электричество, № 12, 1946.
3. Д. П. Морозов. Влияние насыщения на переходные режимы двигателя. Электричество, № 15, 1930.



# Некоторые особенности теории и проектирования электромашиного усилителя

Кандидат техн. наук Н. А. МОНОСЗОН

Завод „Электросила“ и.м. Кирова

Сравнение электромашиного усилителя с квадратичной системой возбуждения. По своим основным свойствам электромашиный усилитель эквивалентен двум машинам постоянного тока —

генератору 1 и возбудителю 2 (рис. 1), образующим квадратичную систему возбуждения. Якорь (рис. 2) с системой рабочих щеток, установленных по продольной оси  $d$  полюсов усилителя, образует эквивалентный генератор. Якорь с системой замкнутых накоротко щеток, установленных по поперечной оси  $q$ , образует эквивалентный возбудитель.

Таким образом, электромашиный усилитель представляет собой машину, значительно более сложную, чем обыкновенный генератор постоянного тока, вследствие удвоенного щеточного аппарата, большого количества обмоток, одновременного существования мощных магнитных полей, создаваемых рабочим током, и весьма слабых магнитных полей, создаваемых обмотками управления, при помощи которых задается режим работы усилителя. Естественно, возникает вопрос о возможности и целесообразности замены одной такой сложной машины обычными квадратичными системами, состоящими из двух машин нормального типа.

Для того, чтобы ответить на этот вопрос, остановимся на основных требованиях, предъявляемых к усилителям. Как известно, такими тре-

Устанавливается связь между коэффициентом усиления и постоянными времени электромашиного усилителя («амплитудина»), вводится понятие коэффициента добротности и дается сравнение этого усилителя с квадратичной системой возбуждения. Также рассмотрены некоторые особенности расчета электромашиного усилителя и дана система дифференциальных уравнений электромашиного усилителя в относительных единицах.

бованиями, необходимыми для обеспечения высококачественной работы системы с электромашиными усилителями, являются: 1) высокий коэффициент усиления; 2) малые постоянные времени

его цепей. Высокий коэффициент усиления создается благодаря тому, что усилитель представляет собой две машины и общий его коэффициент усиления равняется произведению коэффициентов усиления составляющих его машин. Малые постоянные времени обеспечиваются правильным проектированием усилителя.

Рассмотрим, от чего зависит коэффициент усиления обыкновенного генератора постоянного тока, имеющего независимое возбуждение<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Коэффициент усиления генератора есть отношение развиваемой им электрической мощности к мощности, потребляемой для его возбуждения.

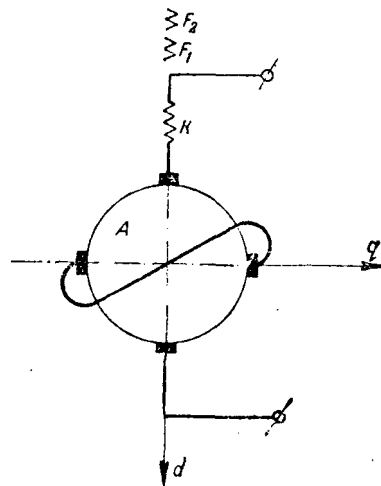


Рис. 2. Принципиальная схема электромашиного усилителя.

A — якорь; K — компенсационная обмотка;  $F_1$ ,  $F_2$  — обмотки управления.

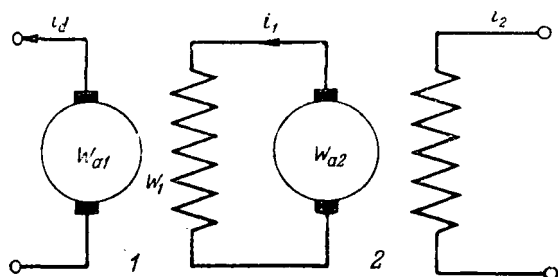


Рис. 1. Квадратичная система возбуждения.

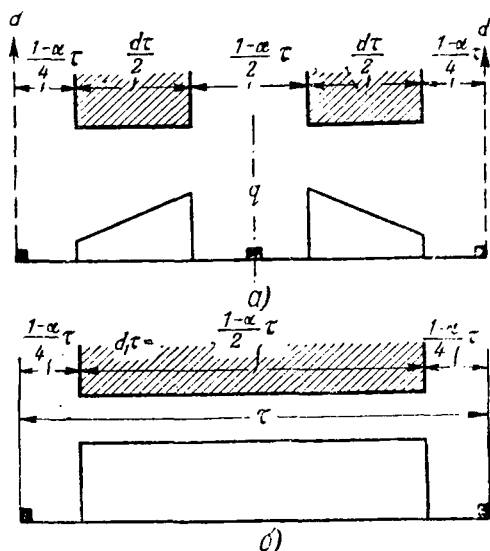


Рис. 3. Идеализированное распределение индукции в электромашинном усилителе (а) и генераторе (б).

Полная электрическая мощность генератора постоянного тока

$$P = EI = \frac{pn}{60a} N \Phi \cdot 10^{-8}. \quad (1)$$

Мощность, затрачиваемая в цепи его возбуждения,

$$P_f = i_f^2 r_f. \quad (2)$$

Коэффициент усиления

$$\mu = \frac{P}{P_f} = \frac{pn}{60a} \frac{IN \Phi \cdot 10^{-8}}{i_f^2 r_f}. \quad (3)$$

Или, проведя элементарные преобразования,

$$\mu = 4 \frac{pn}{60} = \frac{pW_f \sigma'_f \Phi \cdot 10^{-8}}{i_f r_f \sigma'_f} \cdot \frac{IN}{2a2\pi i_f w_f} = \frac{2\omega T_f AW_a}{\pi \sigma'_f AW_f}. \quad (4)$$

Как видим, коэффициент усиления генератора постоянного тока прямо пропорционален частоте, отношению ампервитков реакции якоря  $AW_a$  к ампервиткам обмотки возбуждения  $AW_f$ , постоянной времени  $T_f$  обмотки возбуждения и обратно пропорционален коэффициенту  $\sigma'_f = \frac{L_f i_f}{\Phi W_f}$ ,

большому единицы и учитывающему потоко-сцепления обмотки возбуждения с потоками рассеяния.

Важным следствием, вытекающим из формулы (4), является то обстоятельство, что коэффициент усиления генератора растет одновременно с увеличением постоянной времени его обмотки возбуждения. Таким образом, требования одновременного увеличения коэффициента усиления и уменьшения постоянной времени являются в известном смысле противоречивыми. Целесообразно в связи с этим ввести некоторое новое понятие о коэффициенте добротности генератора, учитывающее одновременно и коэффициент усиления и постоянную времени, представляющие собой отношение коэффициента усиления к по-

стоянной времени. Этот коэффициент добротности представляет интерес, если рассматривать машину как усилитель.

Коэффициент добротности  $\xi$  может быть выражен следующим образом через основные параметры, характеризующие машину:

$$\xi = \frac{\mu}{T_f} \approx \frac{5,2}{\sigma'_f} \frac{n}{1000} \frac{AS}{100} \frac{1000}{B_\delta} \frac{D}{\delta}. \quad (5)$$

Это выражение получается путем простых преобразований из выражения (4).

Как легко видеть, коэффициент добротности  $\xi$  генератора постоянного тока растет с увеличением скорости вращения, увеличением линейной нагрузки  $AS$ , увеличением отношения диаметра  $D$  к воздушному зазору  $\delta$  и с уменьшением индукции  $B_\delta$ . Таким образом, для увеличения коэффициента добротности необходимо применять малоиспользованные в магнитном отношении машины сравнительно больших габаритов.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что высокий коэффициент добротности электромашинного усилителя в значительной степени обязан тому обстоятельству, что в качестве эквивалентного возбудителя, которым у него является короткозамкнутый контур, возбуждаемый обмоткой управления, взята машина таких же габаритов, как и сам генератор (в данном случае используется один и тот же якорь и одна и та же магнитная система).

Применяя формулу (4) для эквивалентного генератора типа электромашинного усилителя, получим для его коэффициента усиления  $\mu_1$  следующее выражение:

$$\mu_1 = \frac{2\omega}{\pi} \frac{AW_d}{AW_q} \frac{T_q}{\sigma'_q}, \quad (6)$$

здесь  $AW_q$  — поперечные ампервитки, вызванные током в короткозамкнутой цепи;

$AW_d$  — продольные ампервитки реакции якоря, определяемые рабочим током;

$T_q$  — постоянная времени поперечной короткозамкнутой цепи<sup>2</sup>;

$$\sigma'_q = \frac{L_q i_q}{\Phi_q W_a}, \quad (7)$$

где  $L_q$ ,  $\Phi_q$  и  $i_q$  — индуктивность, поток и ток короткозамкнутой цепи;

$W_a = \frac{N}{4ap}$  — число последовательно соединенных витков обмотки якоря на пару полюсов.

Коэффициент усиления эквивалентного возбудителя

$$\mu_2 = \frac{2\omega}{\pi} \frac{AW_q}{AW_f} \frac{T_f}{\sigma'_f} \quad (8)$$

<sup>2</sup> Величина  $\sigma'_q$  близка к 0,5. При расчете  $\sigma'_q$  для трапециoidalного распределения индукции в зазоре (рис. 3а) без учета потоков рассеяния легко получить:  $\sigma'_q = 0,5 \left(1 + \frac{\alpha^2}{3}\right)$ .

и полный коэффициент усиления электромашинного усилителя

$$\mu = \mu_1 \mu_2 = \frac{4\omega^2}{\pi^2} \frac{AW_d}{AW_f} \cdot \frac{T_q T_f}{\sigma'_f \sigma'_q} \quad (9)$$

Иначе говоря, коэффициент усиления пропорционален квадрату угловой частоты, отношению продольных ампервитков реакции якоря к ампервиткам цепи возбуждения и произведению постоянных времени короткозамкнутой цепи управления.

Отношение продольных ампервитков реакции якоря к ампервиткам обмотки управления ограничивается определенным значением, так как при чрезмерном увеличении этого отношения потребуются настолько точная компенсация реакции якоря, что практически в эксплуатационных условиях она окажется ненадежной. Таким образом, увеличение коэффициента усиления связано с неизбежным возрастанием постоянных времени машины.

Коэффициент добротности электромашинного усилителя

$$\xi = \frac{\mu}{T_q T_f} = \frac{4\omega^2}{\pi^2} \cdot \frac{AW_d}{AW_f} \cdot \frac{1}{\sigma'_f \sigma'_q} \quad (10)$$

На основании соотношений (4) и (9) нетрудно произвести сравнение электромашинного усилителя с квадратичной системой возбуждения, образованной двумя машинами постоянного тока. Произведем сравнение для случая, когда машины квадратичной системы имеют основные данные—размеры якоря, обмотку якоря и величину воздушного зазора,—совпадающие с основными данными усилителя. Вследствие перехода от усилителя, имеющего расщепленные полюсы, к нормальной машине, при сохранении ширины щели, обеспечивающей неизменные условия коммутации, полюсное перекрытие может быть увеличено от величины  $\alpha$  до величины  $\alpha_1 = \frac{1+\alpha}{2}$ ,

так это легко увидеть из рис. 3. Увеличение полюсного перекрытия уменьшает величину ампервитков возбуждения  $AW_1$  генератора  $I$  по сравнению с ампервитками  $0,5 AW_q$ , создающими основной поток, в следующем отношении:

$$\frac{AW_1}{0,5 AW_q} = \frac{\alpha}{\alpha_1} = \frac{2\alpha}{1+\alpha} \quad (11)$$

Следовательно, генератор  $I$  будет иметь коэффициент усиления

$$\mu_1 = \frac{2\omega}{\pi} \cdot \frac{AW_d}{0,5 AW_q \sigma'_1} \cdot \frac{T_1}{\frac{2\alpha}{1+\alpha}} \quad (12)$$

Величины  $\sigma'_1$  и  $T_1$  учитывают потокоцепление обмотки возбуждения генератора  $I$  и потокоцепления якоря возбудителя 2:

$$\sigma'_1 = \frac{L_1 + L_a}{L_1} = \sigma'_1 \left[ 1 + \frac{L_a}{L_1} \right], \quad (13)$$

$$T_1 = \frac{L_1 + L_a}{r_1 + r_a} = \frac{L_1 + L_a}{r_1 + r_q}$$

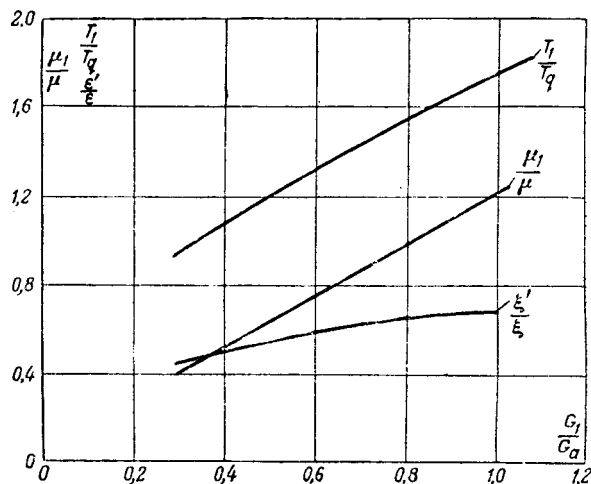


Рис. 4. Сравнительные показатели квадратичной системы.

Здесь  $r_1$ ,  $L_1$ ,  $r_a$  и  $L_a$ —сопротивления и индуктивности обмотки возбуждения генератора и обмотки якоря возбудителя.

Коэффициент усиления возбудителя 2

$$\mu_2 = \frac{2\omega}{\pi} \cdot \frac{AW_{a2}}{AW_2} \cdot \frac{T_2}{\sigma'_2} \quad (14)$$

Отношение ампервитков возбуждения  $AW_2$  возбудителя к ампервиткам  $AW_f$

$$\frac{AW_2}{AW_f} = \frac{i_2(r_1 + r_a)}{i_q r_q} \cdot \frac{2\alpha}{1+\alpha} = \frac{i_1}{i_q} \left( 1 + \frac{r_1}{r_q} \right) \cdot \frac{2\alpha}{1+\alpha}.$$

Учитывая, что средняя длина витка обмотки возбуждения генератора  $I$  приблизительно равна средней длине витка якоря, для отношения сопротивлений  $\frac{r_1}{r_q}$  найдем:

$$\frac{r_1}{r_q} \approx \left( \frac{W_1}{W_a} \right)^2 \cdot \frac{G_1}{G_a},$$

где  $w_1$ —число витков обмотки возбуждения на пару полюсов;

$w_a$ —число последовательно соединенных витков якоря на пару полюсов;

$G_1$ ,  $G_a$ —вес меди обмотки возбуждения генератора  $I$  и вес меди обмотки якоря.

Так как

$$\frac{i_1}{i_q} = \frac{aw_1}{aw_q} \cdot \frac{w_a}{w_1} = 0,5 \frac{w_a}{w_1} \cdot \frac{2\alpha}{1+\alpha}, \quad (15)$$

$$\frac{AW_{a2}}{AW_1} = \frac{w_a}{w_1},$$

$$\frac{L_1}{L_a} \approx \frac{1,25 p w_1^2 \frac{l \tau \alpha}{2\delta} \cdot 10^{-8}}{1,25 p \frac{(w_a \alpha_1)^2}{3} \cdot \frac{l \tau \alpha_1}{2\delta} \cdot 10^{-8}},$$

$$\frac{L_a}{L_q} \approx \frac{1,25 p \frac{(w_a \alpha_1)^3}{3} \cdot \frac{l \tau \alpha_1}{2\delta} \cdot 10^{-8}}{1,25 w_a^2 \frac{l \tau \alpha}{2\delta} \left( \frac{3+\alpha^2}{12} \right) \cdot 10^{-8}}.$$

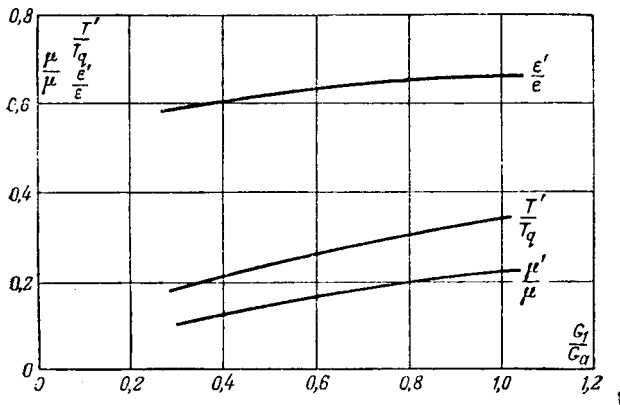


Рис. 5. Сравнительные показатели квадратичной системы.

После простых преобразований найдем следующие соотношения между показателями квадратичной системы и соответствующими показателями электромашинного усилителя:

$$\begin{aligned} \frac{\mu_1}{\mu} &= \frac{\mu'_1 \mu'_2}{\mu} \approx \frac{3}{2} \frac{(1+\alpha)^3}{\alpha^3(1+\alpha^2)} \frac{\left(\frac{w_1}{w_a}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{w_1}{w_a}\right)^2 \frac{G_a}{G_1}\right]^2} \cdot \frac{T_2}{T_f}; \\ \frac{T_1}{T_q} &\approx \frac{(1+\alpha)^3}{2\alpha(3+\alpha^2)} \frac{1 + \left(\frac{w_1}{w_a}\right)^2 \frac{12}{(1+\alpha)^3}}{1 + \left(\frac{w_1}{w_a}\right)^2 \frac{G_a}{G_1}}; \\ \frac{\xi'}{\xi} &= \frac{\xi'_1 \xi'_2}{\xi} \approx \frac{\left(\frac{1+\alpha}{2\alpha}\right)^2}{\left[1 + \frac{(1+\alpha)^2}{12} \left(\frac{w_a}{w_1}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{w_1}{w_a}\right)^2 \frac{G_a}{G_1}\right]}. \end{aligned} \quad (16)$$

На рис. 4 приведены кривые  $\frac{\mu_1}{\mu}$ ,  $\frac{T_1}{T_q}$ ,  $\frac{\xi'}{\xi}$  в зависимости от  $\frac{G_a}{G_1}$  при величине  $\frac{w_1}{w_a}$ , соответствующей максимальному коэффициенту добротности. Расчет произведен для  $\alpha=0,65$  и  $\frac{T_2}{T_f} = 1$ . (При

$T_2 = T_f$  вес меди обмотки возбуждения машины 2 приблизительно равен весу меди обмотки управления электромашинного усилителя). Из рисунка видно, что квадратичная система имеет сравнительно более низкий коэффициент добротности. Коэффициент усиления ее достигает величины коэффициента усиления усилителя при значительном весе обмотки возбуждения генератора 1 и при сравнительно большой постоянной времени  $T_1$ .

На рис. 5 приведены сравнительные показатели квадратичной системы при  $\alpha=0,65$  и  $\frac{T_2}{T_f} = 1$  в случае выполнения возбудителя 2 с компенсационной обмоткой, что, естественно, уменьшает величину  $T_1$ . Однако в этом случае коэффициент добротности остается также сравнительно низким, а коэффициент усиления квадратичной системы снижается еще ниже. Таким образом, электромашинный усилитель при значи-

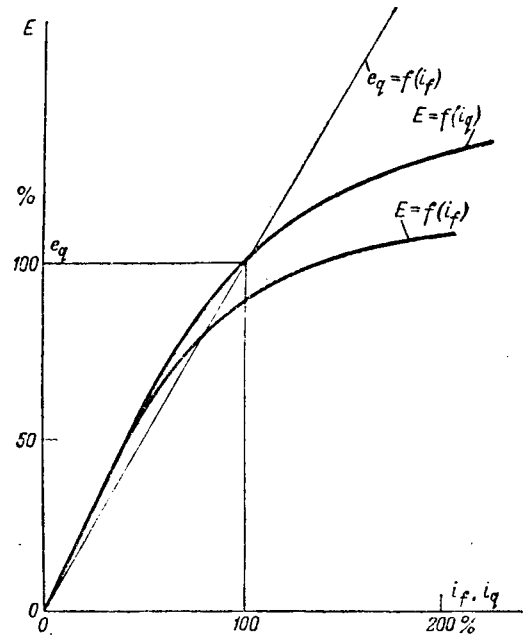


Рис. 6. Характеристика холостого хода электромашинного усилителя.

тельно меньших габаритах имеет более высокие показатели по сравнению с квадратичной системой, если рассматривать эти машины в качестве электромашинных усилителей.

**Некоторые особенности расчета.** При проектировании и расчете необходимо учитывать ряд специфических моментов, связанных, главным образом, с тем обстоятельством, что усилитель представляет собой определенную комбинацию систем обмоток, создающих весьма значительные, отличающиеся по величине ампервитки и магнитные поля. Эти обстоятельства требуют тщательного расчета компенсационной обмотки, обмотки управления, рационального выбора ширины и марки щеток и т. д.

Зависимость между э. д. с.  $E$  и током короткозамкнутой цепи  $i_q$  может быть легко рассмотрена (рис. 6), если учесть, что распределение индукции в воздушном зазоре имеет трапециoidalный характер вследствие треугольной формы распределения м. д. с. реакции якоря. Зависимость между э. д. с.  $e_q$ , необходимой для создания тока  $i_q$ , и током  $i_f$  обмотки управления (рис. 6,) носит приблизительно линейный характер, вследствие весьма малой величины потоков управления.

Таким образом, казалось бы, характеристика  $E = f(i_q)$  представляет собой в некотором другом масштабе характеристику холостого хода  $E = f(i_f)$ . Однако, в действительности эта зависимость имеет другой характер (рис. 6), что приводит к значительному уменьшению коэффициента усиления. Это объясняется влиянием насыщения, создаваемого магнитным потоком короткозамкнутого контура, на проводимость пути магнитного потока управления. Это влия-

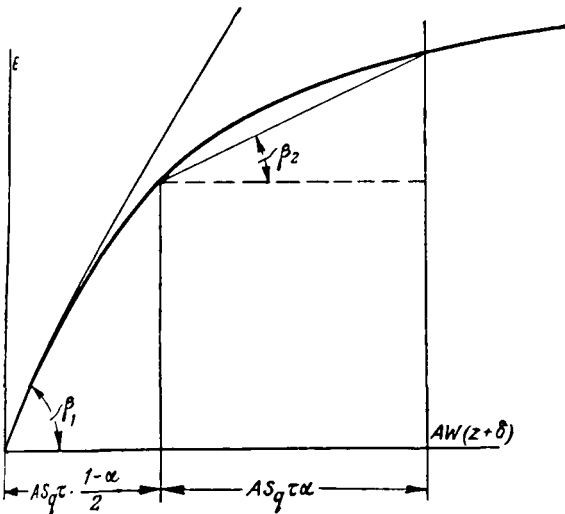


Рис. 7. Переходная характеристика электромашинного усилителя.

$AS_q$  — линейная нагрузка от тока  $i_q$ ;  $AW_z + \delta$  — ампервитки на зазор и зубцовую зону на пару полюсов;  $\tau$  — полюсная дуга;  $\alpha$  — полюсное перекрытие.

не соответствует замене воздушного зазора  $\delta$  некоторым эквивалентным воздушным зазором  $\delta'$ , который с достаточной точностью может быть определен по переходной характеристике, как это видно из рис. 7, по формуле

$$\delta' = \delta \frac{\operatorname{tg} \beta_1}{\operatorname{tg} \beta_2}. \quad (17)$$

Другой существенной особенностью, влияющей на коэффициент усиления, является реакция коммутационных токов секций, коммутируемых щетками короткозамкнутого контура.

Вопрос определения реакции коммутируемых секций в настоящее время нельзя считать достаточно разработанным и точное определение реакции коммутационных токов является достаточно сложной задачей. Как известно, в случае прямолинейной коммутации реакция коммутационных токов отсутствует. Однако, при замедленной коммутации, которая обычно имеет место при коммутации токов поперечной оси при отсутствии добавочных полюсов по этой оси, реакция коммутационных токов может достигнуть сравнительно большой величины, достаточной для значительного ослабления поля управления усилителя. В предельном случае при предельно-замедленной коммутации, которая может быть получена, если считать сопротивление щеточного контакта малым по сравнению с реактивным сопротивлением коммутируемой секции, характер коммутации представляется кривой 1 рис. 8. Такая картина коммутации имеет место, когда в коммутационной зоне отсутствуют посторонние поля. В этом случае, до момента окончательного разрыва цепи короткозамкнутой коммутируемой секции, ток в ней сохраняет свое прежнее значение. Соответствующая картина распределения тока в проводниках в коммутационной зоне изображена на рис. 9.

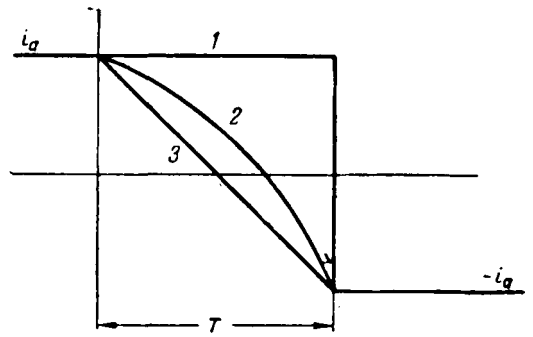


Рис. 8. Коммутация тока электромашинного усилителя. 1 — предельно-замедленная коммутация; 2 — замедленная; 3 — прямолинейная коммутация.

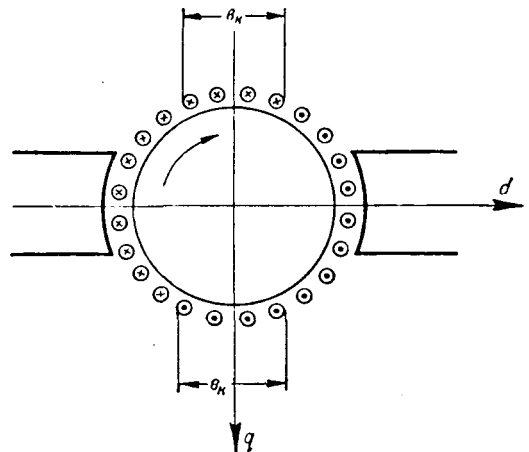


Рис. 9. Реакция коммутационных токов.

Из рисунка ясно, что коммутационными токами создаются на пару полюсов ампервитки

$$\Delta AW_q = AS_q b_k,$$

где  $b_k$  — ширина коммутационной зоны. Если учесть еще наличие посторонних магнитных полей в коммутационной зоне для предельного значения ампервитков реакции коммутационных токов, может быть получено следующее значение:

$$\Delta AW_q = \left( \frac{B_w}{AS_q \lambda} + 1 \right) AS_q b_k,$$

где  $B_w$  — индукция в коммутационной зоне;  $\lambda$  — проводимость потока рассеяния, приведенная к 1 см длины паза якоря.

В частности, отсюда видно, что при определенном значении магнитного поля в коммутационной зоне, когда  $\frac{B_w}{AS_q \lambda} + 1$  равняется нулю, получается нулевое значение ампервитков реакции коммутируемых секций, что соответствует прямолинейной коммутации. Если перейти от предельного случая к действительному, очевидно, получим:

$$\Delta AW_q = \eta \left( \frac{B_w}{AS_q \lambda} + 1 \right) AS_q b_k,$$

где  $\eta$  — некоторый коэффициент, меньший единицы.

Рассмотрим, чем определяется величина этого коэффициента.

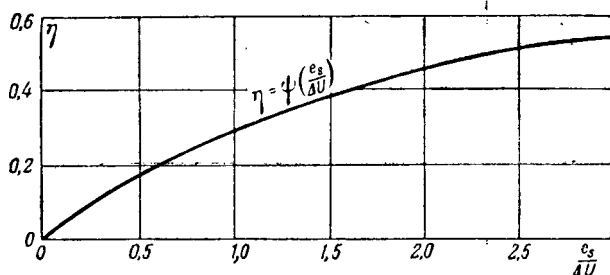


Рис. 10. Зависимость реакции коммутационных токов от реактивного напряжения.

Пока нет достаточно удовлетворительного аналитического выражения, определяющего протекание процесса коммутации, однако, как показывает эксперимент, для приближенного определения реакции коммутационных токов можно воспользоваться дифференциальным уравнением Арнольда, с известным приближением учитывающим основные факторы, влияющие на коммутацию:

$$\frac{di_z}{dx} + Ai_z \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{1-x} \right) = e_z \frac{T}{L}, \quad (18)$$

$$x = \frac{t}{T}, \quad A = \frac{R_z T}{L},$$

где  $i_z$  — добавочный коммутационный ток;  
 $e_z$  — э. д. с., действующая в коммутируемой секции (помимо  $L \frac{di_z}{dt}$ );

$T$  — период коммутации;

$L$  — индуктивность коммутируемой секции;

$t$  — время от начала коммутации;

$R_z$  — переходное сопротивление щеточного контакта.

Среднее значение добавочного тока  $i_{zc}$ , создающее размагничивающую реакцию,

$$i_{zc} = \int_0^1 \left[ \left( \frac{1-x}{x} \right)^A \int_0^x \left( \frac{x}{1-x} \right)^A \frac{e_z T}{L} dx \right] dx. \quad (19)$$

Учитывая, что

$$e_z = e_s + e_w = \frac{2i_a L}{T} + 2B_w w v l \cdot 10^{-8},$$

из (19) получим:

$$i_{zc} = 2i_a \int_0^1 \left( \frac{1-x}{x} \right)^A \left[ \int_0^x \left( \frac{x}{1-x} \right)^A \frac{e_z}{e_s} dx \right] dx \approx$$

$$\approx 2i_a \left( \frac{B_w}{AS_q \lambda} + 1 \right) \int_0^1 \left[ \left( \frac{1-x}{x} \right)^A \int_0^x \left( \frac{x}{1-x} \right)^A dx \right] dx. \quad (20)$$

Отсюда

$$\eta = \frac{i_{zc}}{i_a \left( \frac{B_w}{AS_q \lambda} + 1 \right)} = \varphi(A) =$$

$$= 2 \int_0^1 \left[ \left( \frac{1-x}{x} \right)^A \int_0^x \left( \frac{x}{1-x} \right)^A dx \right] dx, \quad (21)$$

т. е. коэффициент  $\eta$  является некоторой функцией  $A$ , которая может быть без труда получена

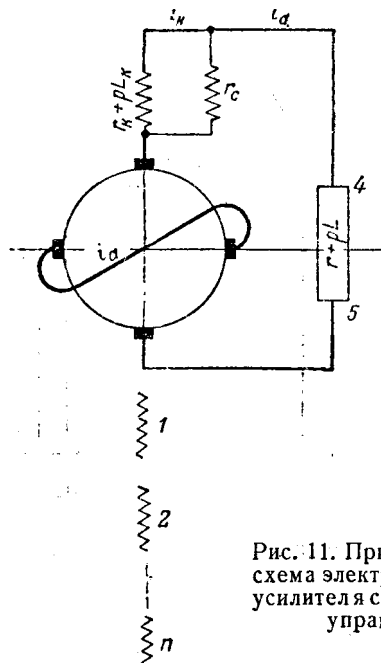


Рис. 11. Принципиальная схема электромашинного усилителя с  $n$  обмотками управления.

двукратным интегрированием. Параметр  $A$  имеет весьма простой физический смысл —

$$A = \frac{R_z T 2i_a}{L 2i_a} = \frac{\Delta U}{e_s}, \quad (22)$$

где  $\Delta U$  — падение напряжения под щеткой;  
 $e_s$  — средняя реактивная э. д. с..

На рис. 10 представлена зависимость

$$\eta = \psi \left( \frac{e_s}{\Delta U} \right). \quad (23)$$

Результаты экспериментального определения реакции коммутационных токов, произведенные на заводе «Электросила», дали удовлетворительное, для первого приближения, совпадение расчета с опытом.

**Система дифференциальных уравнений.** Основные связи между отдельными обмотками электромашинного усилителя при отсутствии насыщения сравнительно просто могут быть представлены системой линейных дифференциальных уравнений [Л. 1, 2]. Однако, при этом получаются довольно громоздкие выражения с большим числом самоиндуктивностей, взаимоиנדуктивностей и омических сопротивлений, которые изменяются в весьма широких пределах, в зависимости от обмоточных данных амплитудина, непосредственно не определяющих характер переходных процессов. Желательно было бы представить систему дифференциальных уравнений в таком виде, чтобы она зависела от основных, наиболее характерных для усилителя, параметров, как например, постоянных времени, коэффициента усиления, коэффициента компенсации и т. д. Этого можно достигнуть путем введения системы относительных единиц и соответствующего преобразования системы дифференциальных уравнений.

На рис. 11 представлена весьма общая схема усилителя с  $n$  обмотками управления и с сопротивлением  $r_c$ , шунтирующим компенсационную

обмотку и служащим для настройки компенсации реакции якоря по продольной оси.

Для отдельных цепей усилителя при отсутствии насыщения могут быть написаны следующие дифференциальные уравнения.

Для цепи короткозамкнутого контура

$$\left. \begin{aligned} (r_q + pL_q)i_q = e_q = \frac{\omega\omega_a}{\pi} \sum \Phi_d, \\ \sum \Phi_d = \sum_{e=1}^{e=n} \Phi_{ae} + \Phi_{ak} - \Phi_d, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где  $\Phi_{ak}$  — поток взаимной индукции компенсационной обмотки с обмоткой якоря;

$\Phi_{ae}$  — поток взаимной индукции  $e$ -ой обмотки управления с обмоткой якоря,

$\Phi_d$  — поток реакции якоря, вызванной током  $i_d$ ;

$\omega_a$  — число последовательно соединенных витков обмотки якоря.

Для цепи якоря и нагрузки

$$\begin{aligned} [i_d + r + p(L_d + L)]i_d + (i_d - i_k)r_c - \\ - p[M_{ak}i_k + \sum_{e=1}^{e=n} M_{ae}i_e] = \frac{2\omega\omega_a}{\pi} \Phi_q, \end{aligned} \quad (25)$$

где  $M_{ak}$ ,  $M_{ae}$  — взаимная индуктивность компенсационной обмотки и обмотки управления с обмоткой якоря.

Для цепи компенсационной обмотки и шунтирующего сопротивления

$$(r_k + pL_k)i_k + p \left[ \sum_{e=1}^{e=n} M_{ke}i_e - M_{ka}i_d \right] = (i_d - i_k)r_c, \quad (26)$$

где  $M_{ke}$  — взаимная индуктивность компенсационной обмотки и  $e$ -ой обмотки управления.

Для цепи  $m$ -ой обмотки управления

$$i_m + pL_m i_m + p[M_{mk}i_k - M_{ma}i_d + \sum_{e=1, 2 \dots m-1, m+1 \dots n} M_{me}i_e] = e_m. \quad (27)$$

Переходя к относительным единицам<sup>3</sup>, полагаем:

$$i_e = \frac{AW_e}{0,5AW_{an}} = \frac{\Phi_{ae}}{\Phi_{ad} \frac{i_N}{i_d}} = \frac{I_{ae} i_e}{M_{ae} i_N} = \frac{M_{ae} i_e}{\frac{L_{ad}}{1 + \frac{2}{3}} i_N};$$

$$\frac{r_d i_N}{U_N} = R_d; \quad \frac{r_a i_N}{U_N} = R_q; \quad \frac{r_k i_N}{U_N} = R_k;$$

$$\frac{r_i i_N}{U_N} = R; \quad \frac{r_c i_N}{U_N} = R_c.$$

Вводим обозначения:

$$\begin{aligned} \frac{L_q}{r_q} = T_q; \quad \frac{L_d + L}{r_d + r} = T; \quad \frac{L_k}{r_k + r_c} = T_k; \quad \frac{L_{ad}}{r + r_{ad}} = T_{ad}; \\ \frac{L_e}{r_e} = T_e; \quad \frac{i_{q0}}{i_N} = I_0; \quad \frac{\Phi_{ak} i_d}{\Phi_{ad} i_k} = \frac{M_{ak}}{L_{ad} \sigma_d} = \frac{\omega_k}{0,5\omega_a \sigma_d} = \epsilon, \end{aligned}$$

где  $\epsilon$  — коэффициент компенсации при отсутствии сопротивления  $r_c$  (т. е. при  $i_k = i_d$ ), представляющий собой отношение потока компенсационной обмотки, проникающего в якорь, к потоку реакции якоря при токе якоря, равном току компенсационной обмотки;

$\omega_k$  — число витков компенсационной обмотки;

$\sigma_d = \frac{\Phi_d}{\Phi_{ad}}$  — отношение полного потока реакции якоря к

потоку взаимной индукции реакции якоря с обмотками, установленными по продольной оси;

$i_{q0}$  — ток поперечной оси, соответствующий номинальному напряжению в холостом ходе.

Получим следующую систему дифференциальных уравнений в относительных единицах:

$$\begin{aligned} [1 + pT_q]I_q - \frac{1}{R_q I_0} \left[ \sum_{e=1}^{e=n} \frac{I_e}{\sigma_d} + \epsilon I_k - I_d \right] = 0, \\ [1 + pT]I_d + [I_d - I_k] \frac{R_c}{R + R_{ad}} - \\ - pT_{ad} \left[ \sigma_d \epsilon I_k + \frac{1}{1 + \frac{2}{3}} \sum_{e=1}^{e=n} I_e \right] - \frac{I_q}{R I_0} = 0, \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} [1 + pT_k]I_k + pT_{ad} \frac{R + R_{ad}}{R_k + R_c} \epsilon \sigma_d \left[ \frac{1}{1 + \frac{2}{3}} \sum_{e=1}^{e=n} I_e - I_d \right] - \\ - I_d \frac{R_c}{R_k + R_c} = 0, \end{aligned}$$

$$[1 + pT_m]I_m + pT_{am}[\epsilon \sigma_d I_k - I_d + \sum_{e=1, 2 \dots m-1, m+1 \dots n} I_e] - I_{m\infty} = 0,$$

где  $I_{m\infty}$  — установившееся значение тока в обмотке  $m$ .

Система (28) не учитывает действие реакции коммутационных токов короткозамкнутой цепи, ослабляющей поток обмоток управления и, как указывалось выше, в ряде случаев оказывающей заметное влияние на работу электромашинного усилителя. Это действие в первом приближении может быть учтено путем введения в суммы  $\sum I_e$  слагаемого  $\Delta I_q = \frac{\Delta AW_q}{0,5AW_q} I_q$ , учитывающего ампервитки реакции коммутационных токов.

При анализе переходных процессов в схемах с постоянными времени нагрузки, значительно превышающими постоянные времени цепей электромашинного усилителя, система (28) может быть существенно упрощена. В этом случае, в зависимости от типа и параметров схемы, целый ряд связей в электромашинном усилителе может быть опущен без заметного снижения точности результатов.

### Литература

1. С. Я. Эпштейн. Переходные процессы в амплидине. ВЭП, № 1—2, 1945.
2. А. Г. Иосифьян, В. М. Каган и Н. Н. Шереметьевский. Теория амплидино-сельсинной синхронно-следящей системы. Электричество, № 3, 1946.

<sup>3</sup> Ток  $I_e$  обмотки управления в относительных единицах представляет собой отношение ампервитков  $AW_e$  обмотки управления к ампервиткам  $0,5 AW_{an}$  реакции якоря, действующим по продольной оси при нормальном токе якоря.

# Электромашинный усилитель как элемент регулирующей системы

Кандидат техн. наук Н. М. ЯКИМЕНКО

Всесоюзный электротехнический институт им. Ленина

**Основные соотношения.** Систему, состоящую из электромашинного усилителя и приключенной к нему нагрузки в виде исполнительного двигателя постоянного тока с независимым возбуждением или обмотки возбуждения генератора Леонарда, исходя из известных представлений [1, 2] и идеализируя электромашинный усилитель, можно рассматривать как цепочку, составленную из нескольких описанных ниже элементарных звеньев.

Первым элементарным звеном является цепь возбуждения (рис. 1). Входной величиной звена служит действующая в цепи возбуждения приложенная извне э. д. с.  $U_1$ . В качестве выходной величины звена удобно рассматривать э. д. с. вращения  $E_2$ , индуцированную в поперечной цепи якоря потоком возбуждения:

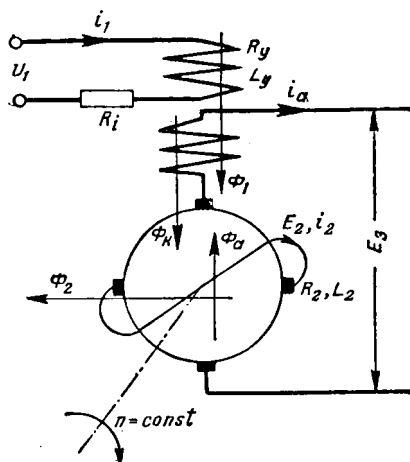


Рис. 1.

При использовании электромашинного усилителя («амплидина») в замкнутых регулирующих системах, а также при решении вопроса устойчивости этих систем, должна быть известна дифференциальная зависимость между входной величиной (э. д. с. источника, питающего обмотку управления) и выходной величиной усилителя. Эта зависимость рассмотрена в случае использования электромашинного усилителя для непосредственного управления скоростью приключенного к нему исполнительного двигателя постоянного тока, где скорость вращения исполнительного двигателя можно истолковать, как выходную величину, а также в случае использования электромашинного усилителя для управления возбуждением генератора, когда выходной величиной может служить ток возбуждения или пропорциональная ему э. д. с. якоря генератора Леонарда. Общие соображения иллюстрируются числовыми примерами, относящимися к реальному электромашинному усилителю на номинальную мощность 4,0 kW.

$$\Phi_1 = 0,4\pi\omega_1\lambda i_1 = \frac{L_y}{\omega_1} 10^{-8},$$

здесь  $i_1$  — ток управляющей обмотки;  
 $\omega_1$  — число витков управляющей обмотки;  
 $\lambda$  — магнитная проницаемость поперечной оси;

$L_y = 0,4\pi\omega_1^2\lambda \cdot 10^{-8}$  [H] — индуктивность управляющей обмотки.

Электродвижущая сила  $E_2 = 4\nu\Phi_1\omega_a \cdot 10^{-8}$ :

$= 4\nu L_y \frac{\omega_a}{\omega_1} i_1$  является мгновенной функцией от тока  $\Phi_1$  и тока  $i_1$ . В установившемся режиме между величинами  $E_2$  и  $U_1$  имеет место соотношение

$$m_1 U_1 = E_2,$$

где  $m_1 = 4\nu\tau_1 \frac{\omega_a}{\omega_1}$  — коэффициент усиления первого звена по напряжениям;

$\omega_a$  — число последовательно соединенных витков в каждой параллельной цепи обмотки якоря;

$\nu$  — частота вращения якоря  $\frac{1}{\text{сек}}$ ;

$\tau_1 = \frac{L_y}{R_1}$  — постоянная времени цепи управляющей обмотки, сек

$R_1 = R_y + R_i$  — электрическое сопротивление всей цепи управления,  $\Omega$ ;

$R_y$  — сопротивление управляющей обмотки;

$R_i$  — сопротивление источника возбуждения.

В переходном режиме (если в продольной цепи действует лишь поток  $\Phi_1$ ) зависимость между  $U_1$  и  $E_2$  выражается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$m_1 U_1 = (1 + p\tau_1) E_2. \quad (1)$$

Величину  $\frac{E_2}{U_1} = \frac{m_1}{1 + p\tau_1}$  можно назвать операторным коэффициентом усиления первого звена.

Вторым звеном системы является короткозамкнутая цепь якоря. Эта цепь обладает индуктивностью

$$L_2 = 0,4\pi\omega_a^2 \frac{\lambda}{3} 10^{-8}, \quad (2)$$

сопротивлением  $R_2$  и постоянной времени  $\tau_2 = \frac{L_2}{R_2}$ . Входной величиной звена служит э. д. с.

$E_1$ , обуславливающая в поперечной цепи ток  $i_2$ . В качестве выходной величины удобно считать э. д. с. вращения  $E_3$ , индуцированную поперечным потоком  $\Phi_2 = 0,4\pi \cdot \omega_a \frac{\lambda}{2} i_2$ . Электродвижущая сила  $E_3 = 4\nu\Phi_2 \omega_a \cdot 10^{-8} = 6\nu L_2 i_2$  является мгновенной функцией поперечного потока  $\Phi_2$  и тока  $i_2$ . В установившемся режиме между э. д. с. имеется зависимость:

$$m_2 E_2 = E_3,$$

где  $m_2 = 6\nu\tau_2$  — идеальный коэффициент усиления второго звена по напряжениям.

В переходном режиме зависимость между э. д. с.  $E_2$  и  $E_3$  выражается дифференциальным уравнением

$$m_2 E_2 = (1 + p\tau_2) E_3. \quad (3)$$

На основании (3) и (1) зависимость между  $U_1$  и  $E_3$  выражается уравнением

$$m_1 m_2 U_1 = (1 + p\tau_1)(1 + p\tau_2) E_3, \quad (4)$$

где  $m_1 m_2 = 24\nu^2 \tau_1 \tau_2 \frac{\omega_a}{\omega_1}$  назовем идеальным коэффициентом усиления по напряжениям в установившемся режиме. Величина  $\frac{E_3}{U_1} = \frac{m_1 m_2}{(1 + p\tau_1)(1 + p\tau_2)}$

является идеальным операторным коэффициентом усиления электромашинного усилителя. Коэффициенты усиления названы идеальными потому, что они получены при отсутствии воздействия тока поперечной цепи на цепь возбуждения, что, как будет сказано ниже, не соответствует действительности.

Соответственно изложенному упрощенному представлению эквивалентную схему электромашинного усилителя при холостом ходе можно изобразить в виде двух инерционных звеньев (рис. 2), обладающих постоянными времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  и коэффициентами усиления  $m_1$  и  $m_2$ .

Если усилитель использован для непосредственного регулирования скорости исполнительного двигателя, то якорь двигателя и якорь усилителя составляют третье звено системы. Входной величиной этого звена является э. д. с.  $E_3$  якоря усилителя, а выходной величиной —

скорость  $\omega_2$  вращения якоря исполнительного двигателя. В замкнутой системе регулирования нагрузка на валу двигателя, обусловленная внешними силами, не оказывает прямого влияния на устойчивость системы. Поэтому будем считать, что двигатель имеет лишь инерционную нагрузку на валу.

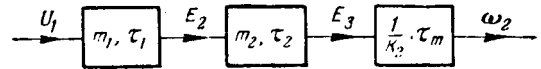


Рис. 2.

В машинах малой мощности электромагнитная постоянная времени цепи якорей мала по сравнению с электромеханической постоянной  $\tau_m = \frac{9,81 J R_a}{k_2^2}$ , где  $J$  — момент инерции якоря двигателя и связанных с ним инерционных масс в  $\text{kgmsec}^2$ ;  $R_a$  — сопротивление всей якорной цепи и  $k_2$  — отношение э. д. с. якоря двигателя к скорости  $\omega_2$  его вращения. Поэтому будем считать:

$$E_3 \approx i_a R_a + k_2 \omega_2,$$

или

$$\frac{1}{k_2} E_3 = (1 + p\tau_m) \omega_2, \quad (5)$$

так как ток якоря двигателя

$$i_a = \frac{\tau_m}{R_a} k_2 p \omega_2. \quad (6)$$

пропорционален его ускорению  $p\omega_2$ .

Исходя из уравнения (5), можно двигатель представить в виде показанного на рис. 2 инерционного звена, обладающего постоянной времени  $\tau_m$  и коэффициентом усиления  $\frac{1}{k_2}$ .

На основании (5) и (4) зависимость между входной  $U_1$  и выходной  $\omega_2$  величинами всей системы выражается дифференциальным уравнением третьего порядка:

$$\frac{m_1 m_2}{k_2} U_1 = (1 + p\tau_1)(1 + p\tau_2)(1 + p\tau_m) \omega_2. \quad (7)$$

Если электромашинный усилитель использован для питания возбуждения генератора Леонарда, то третьим звеном является цепь возбуждения генератора. Входной величиной этого звена служит э. д. с. усилителя, а выходной — ток  $i_a$  якоря усилителя или пропорциональная ему э. д. с.  $E_4$  генератора. Зависимость между этими двумя величинами описывает уравнение

$$m_3 E_3 = (1 + p\tau_3) E_4, \quad (8)$$

а зависимость между входной  $U_1$  и выходной  $E_4$  величинами системы выражается уравнением третьего порядка:

$$m_1 m_2 m_3 U_1 = (1 + p\tau_1)(1 + p\tau_2)(1 + p\tau_3) E_4, \quad (9)$$

где

$$m_3 = \frac{E_4}{i_a R_a} \quad (10)$$

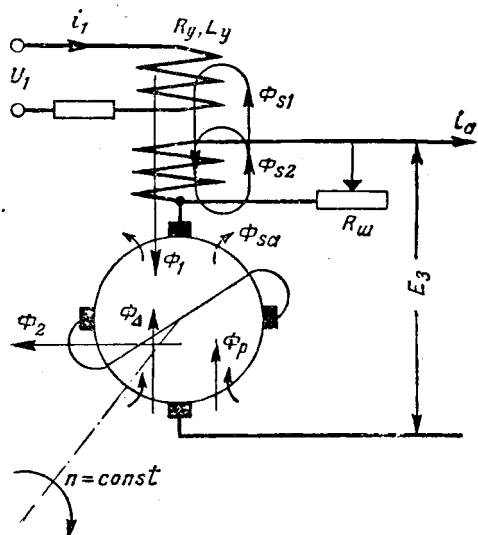


Рис. 3.

— коэффициент усиления последнего звена по напряжениям в установившемся режиме;  $\tau_3 = \frac{L_3}{R_3}$  — постоянная времени всей цепи возбуждения генератора Леонарда;  $L_3$  и  $R_3$  — индуктивность и омическое сопротивление этой цепи.

Уравнению (9) соответствует эквивалентная схема идеального электромашиного усилителя, подобная рис. 2.

**Учет факторов, нарушающих основные зависимости.** Формулы (4), (7), (9) и эквивалентные схемы рис. 2 получены из тех предпосылок, что не имеется каких-либо обратных воздействий тока поперечной цепи на продольную ось машины и тока главной (рабочей) цепи на цепь управляющей обмотки и короткозамкнутую цепь якоря усилителя. Однако изложенное представление слишком элементарно и приближенно. Электромашиный усилитель существенно отличается от обычных генераторов постоянного тока тем, что м. д. с. управляющей обмотки и сопротивление короткозамкнутой поперечной цепи относительно очень малы. Поэтому на режимы названных обмоток оказывают большое влияние такие факторы, которые не влияют или почти не влияют на характеристики обычных генераторов. Этих факторами являются:

1. Потери стали якоря от токов Фуко и гистерезиса, замедленная коммутация тока поперечной цепи и сдвиг поперечных щеток, создающие по продольной оси машины размагничивающий поток  $\Phi_p$  (рис. 3).

2. Потоки  $\Phi_{s1}$  и  $\Phi_{s2}$  рассеяния компенсационной обмотки, сцепленные соответственно с замкнутыми контурами обмотки управления и компенсационной обмоткой<sup>1</sup>.

3. Поток  $\Phi_\Delta = \Phi_a - \Phi_k$ , имеющийся в недокомпенсированной машине.

<sup>1</sup> Ниже будет показано, что на свойства системы большое влияние оказывает поток рассеяния  $\Phi_{s2}$ , особенно в машинах, имеющих значительный запас числа витков компенсационной обмотки. Это явление впервые было замечено и исследовано инж. П. П. Клобуковым (ВЭИ).

4. Поток рассеяния  $\Phi_{sa}$  лобовых частей обмотки якоря от нагрузочного тока машины.

Рассматривая влияние перечисленных факторов, будем полагать, что усилитель имеет нормальную настройку, иными словами, поток реакции якоря  $\Phi_a$  компенсирован полностью или имеется незначительная недокомпенсация, что щетки стоят в нейтрали или сдвинуты на небольшой угол по направлению вращения якоря.

При исследовании поведения электромашиного усилителя в регулирующей системе не нужна высокая точность определения его параметров. Предположение о линейности характеристик машин уже само по себе вносит определенные погрешности, так как параметры машин изменяются из-за насыщения стали, нелинейности неустойчивости щеточных контактов и т. п. Однако эти погрешности практически допустимы. Поэтому, исследуя работу усилителя, будем учитывать лишь основные явления, существенно влияющие на параметры и поведение системы.

Для ориентировки в порядке величин примем следующие возможные соотношения потоков и м. д. с. в электромашином усилителе при установившемся номинальном режиме. Если принять за единицу м. д. с.  $i_a w_a$  реакции якоря номинального нагрузочного тока  $i_a$  и соответствующий ей поток реакции якоря  $\Phi_a$ , то м. д. с.  $i_2 w_a$  и поток  $\Phi_2$  поперечной оси могут быть оценены цифрой  $\frac{i_2 w_a}{i_a w_a} = 0,3 \div 0,4$ , для потока  $\Phi_1$  ампервитков воздуха  $AW_s$  по продольной оси можно принять  $\frac{AW_s}{i_a w_a} = 0,002 \div 0,009$ , для м. д. с.  $i_1 w_1$  управляющей обмотки —  $0,01 \div 0,04$ .

Поток  $\Phi_{s2}$  рассеяния компенсационной обмотки может составлять  $q_{s2} = \frac{\Phi_{s2}}{\Phi_a} = 0,01 \div 0,02$  от потока  $\Phi_a$ , причем с управляющей обмоткой сцеплена лишь часть (0,2—0,5) этого потока, создаваемая лобовыми частями компенсационной обмотки и проводниками обмотки, расположенными в одних пазах с управляющей обмоткой. Таким образом, поток рассеяния  $\Phi_{s1}$ , сцепленный с управляющей обмоткой, может составить  $q_{s1} = \frac{\Phi_{s1}}{\Phi_a} = 0,005 - 0,01$  от потока  $\Phi_a$ .

Благодаря неточной регулировке компенсации в воздушном зазоре по продольной оси может быть некомпенсированный поток  $\Phi_\Delta$  реакции якоря. Величина этого потока в практических условиях может быть оценена цифрой  $q_\Delta = \frac{\Phi_\Delta}{\Phi_a} = 0 \div 0,02$ . Поток  $\Phi_{sa}$  рассеяния лобовых частей обмоток якоря от главного тока  $i_a$  может составлять  $q_{sa} = \frac{\Phi_{sa}}{\Phi_a} = 0,005$ .

#### Холостой ход электромашиного усилителя

а) Влияние замкнутого контура компенсационной обмотки. Любой поток  $\Phi$ , действующий по продольной оси машины, сцеплен с замкнутым контуром обмотки управления.

имеющим постоянную времени  $\tau_y = \frac{L_y}{R_1}$ , и с замкнутым через  $R_{ш}$  контуром компенсационной обмотки, имеющим постоянную времени  $\tau_k = \frac{L_k}{R_k + R_{ш}}$ , где  $L_k$  — индуктивность компенсационной обмотки, которую можно считать равной  $L_1$ ;  $R_k$  — сопротивление компенсационной обмотки и  $R_{ш}$  — сопротивление, используемое для регулировки степени компенсации усилителя.

При подсчете постоянных  $\tau_y$  и  $\tau_k$ , а также при учете индуктивного влияния продольных потоков на указанные цепи можно пренебречь индуктивностями рассеяния управляющей и компенсационной обмоток, — погрешности, вносимые этим допущением, ничтожны. В таком случае можно считать, что в машине по отношению к продольным потокам имеется лишь замкнутый контур обмотки управления, обладающий повышенной постоянной времени  $\tau_1 = \tau_y + \tau_k$ .

б) Обратное воздействие тока  $i_2$  поперечной цепи на продольную ось машины. Потери в стали якоря. При вращении якоря поперечный поток  $\Phi_2$  обуславливает потери  $P_c$  в стали якоря<sup>2</sup>. Мощность  $P_c$  поглощается за счет механической энергии, затрачиваемой на вращение якоря. Как известно, генерирование мощности путем вращения якоря в поле  $\Phi_2$  неизбежно связано с возникновением м. д. с.  $AW_c$  и потока  $\Phi_c$ , являющихся поперечным по отношению к потоку  $\Phi_2$ . Магнитодвижущая сила  $AW_c$  и поток  $\Phi_c$  действуют против ампервитков  $i_1 w_1$  и потока  $\Phi_1$  управляющей обмотки; ее можно рассчитать по формуле

$$AW_c = \frac{P_c}{E_3} w_a f, \quad (11)$$

вытекающей из принципа действия электрических машин, использующих законы электромагнитной индукции; здесь  $f$  — коэффициент, зависящий от распределения м. д. с.  $AW_c$  по полюсному делению, близкий, вероятно к  $0,55 \div 0,65$ .

Магнитодвижущая сила  $AW_c$  оказывает большое влияние на свойства электромашинного усилителя. Так, например, в усилителе на мощность 4,0 kW м. д. с.  $AW_c$ , рассчитанная при условии, что потери в якоре от токов Фуко и гистерезиса составляют 1,5% от мощности машины, примерно в 2 раза превышает ампервитки  $AW_g$  воздушного зазора по продольной оси.

Замедленная коммутация тока поперечной цепи. Размагничивающее действие токов замедленной коммутации в секциях, коммутируемых короткозамкнутыми щетками электромашинного усилителя, теоретически и экспериментально исследовано Я. С. Эпштейном [Л. 3]. По этим исследованиям размагничивающие ампервитки  $AW_k$  коммутируемых секций могут в несколько раз превышать ампервитки  $AW_g$  воздушного зазора по продольной оси машины.

<sup>2</sup> Имеются в виду потери от перемagnetивания якоря с частотой вращения  $\gamma$ .

Сдвиг щеток поперечной цепи. При сдвиге щеток поперечной цепи на угол  $\alpha$  в направлении вращения якоря появляются действующие по продольной оси размагничивающие ампервитки  $AW_a = \frac{2i_2 w_a}{\pi}$ , которые могут существенно

повлиять на работу машины. Например, в 4-kW машине при сдвиге щеток на половину коллекторного деления (при  $k = 105$ ) появляются ампервитки  $AW_a$ , превышающие примерно в 2 раза ампервитки  $AW_g$  воздушного зазора.

Реальный коэффициент усиления. Благодаря размагничивающему действию ампервитков  $AW_p = AW_c + AW_k + AW_a$  м. д. с. управляющей обмотки превосходит в  $k = \frac{AW_g + AW_p}{AW_g}$  раз

м. д. с.  $AW_g$ , необходимую для преодоления магнитного сопротивления продольной цепи, а реальный коэффициент усиления усилителя по напряжениям в установившемся режиме  $m = \frac{m_1 m_2}{k}$

в  $k$  раз меньше идеального. Коэффициент  $k$ , рассчитанный для номинального режима машины, может иметь значения  $k = 4 \div 8$ , а при низком качестве стали якоря, большой частоте вращения якоря и плохих условиях коммутации может достигать более высоких значений.

Если потери от токов Фуко в стали якоря преобладают над потерями от гистерезиса, то числитель  $P_c$  в формуле (11) пропорционален квадрату тока  $i_2$ . Так как знаменатель  $E_3$  пропорционален току  $i_2$ , то размагничивающие ампервитки  $AW_c$  пропорциональны току поперечной цепи. Токи замедленной коммутации и ампервитки  $AW_k$  так же находятся в прямой зависимости от тока  $i_2$ . Следовательно, коэффициент  $k$  при различных режимах магнитной цепи мало изменяется.

Потери в стали, уменьшая реальный коэффициент усиления, повышают стабильность усилителя и уменьшают зависимость характеристик машины от таких факторов, как сдвиг поперечных щеток, замедленная коммутация тока  $i_2$  и непостоянство сопротивления переходного контакта щеток поперечной цепи.

в) Влияние размагничивающих ампервитков  $AW_p$  на переходный процесс.

Размагничивающие ампервитки  $AW_p$  создают по продольной оси машины поток  $\Phi_p$ , направленный против потока  $\Phi_1$  управляющей обмотки и являющийся мгновенной функцией тока  $i_2$ . Этот поток индуцирует в поперечной цепи э. д. с. вращения

$$E_{pr} = 4\gamma w_a \Phi_p \cdot 10^{-8} = r_2 i_2, \quad (12)$$

имеющую тот же знак, что и омическое падение напряжения  $i_2 R_2$  в поперечной цепи. В схеме рис. 4, а эта э. д. с. приложена к входу второго звена наряду с э. д. с.  $F_2$ . Можно рассматривать коэффициент  $r_2$  как некоторое фиктивное

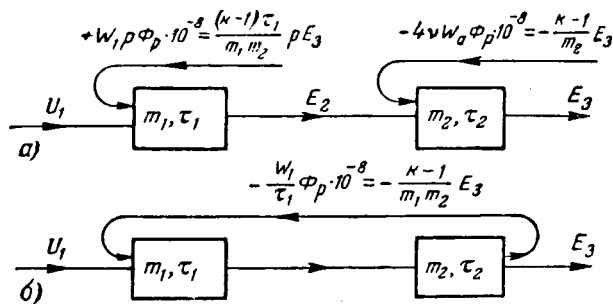


Рис. 4.

дополнительное омическое сопротивление и считать, что сопротивление поперечной цепи под действием потока  $\Phi_p$  увеличивается в  $k = \frac{R_2 + r_2}{R_2}$

раз. Вследствие этого коэффициент усиления и эффективная постоянная времени поперечной цепи уменьшаются в  $k$  раз, а дифференциальное уравнение поперечной цепи вместо (3) приобретает вид:

$$\frac{m_2}{k} E_2 = (1 + p \frac{\tau_2}{k}) E_3. \quad (13)$$

Поток  $\Phi_p$ , кроме того, индуцирует в управляющей обмотке э. д. с.  $E_{pm} = \omega_1 \Phi_p \cdot 10^{-8}$ , которую, исходя из (12), (2) и из принятых определений для коэффициентов  $m_1$ ,  $m_2$  и  $k$ , можно выразить формулой:

$$E_{pm} = \frac{(k-1)\tau_1}{m_1 m_2} p E_3.$$

На рис. 4,а эта э. д. с. приложена к входу первого звена.

Дифференциальное уравнение цепи управления вместо (1) приобретает вид:

$$m_1(U_1 + E_{pm}) = (1 + p\tau_1)E_2, \quad (14)$$

или

$$m_1 U_1 = (1 + p\tau_1)E_2 - (k-1) \frac{\tau_1}{m_2} p E_3.$$

Из уравнений (13) и (14) следует дифференциальное уравнение электромашинного усилителя, выражающее зависимость между величинами  $U_1$  и  $E_3$  при холостом ходе:

$$\frac{m_1 m_2}{k} U_1 = (1 + p \frac{\tau_1 + \tau_2}{k} + p^2 \frac{\tau_1 \tau_2}{k}) E_3, \quad (15)$$

где  $\frac{m_1 m_2}{k}$  — реальный коэффициент усиления электромашинного усилителя по напряжениям в установившемся режиме. Коэффициент усиления ненагруженного усилителя при переходных режимах

$$\frac{E_3}{U_1} = \frac{\frac{m_1 m_2}{k}}{1 + p \frac{\tau_1 + \tau_2}{k} + p^2 \frac{\tau_1 \tau_2}{k}}.$$

Уравнение (15) можно представить в таком виде:

$$m_1 m_2 \left( U_1 - \frac{k-1}{m_1 m_2} E_3 \right) = (1 + p\tau_1)(1 + p\tau_2) E_3. \quad (16)$$

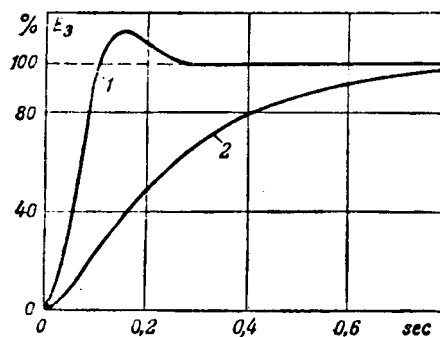


Рис. 5.

Этому уравнению соответствует показанная на рис. 4,б эквивалентная схема электромашинного усилителя при холостом ходе. Из сравнения схем а и б рис. 4 видно, что действие продольного размагничивающего потока  $\Phi_p$  можно заменить приложенным к входу усилителя напряжением

$$- \frac{\omega_1}{\tau_1} \Phi_p \cdot 10^{-8} = - \frac{k-1}{m_1 m_2} E_3,$$

которое можно рассматривать как напряжение негативной обратной связи.

Из сравнения уравнений (4) и (15) видно, что поток  $\Phi_p$  уменьшает в  $k$  раз не только коэффициент усиления, но и коэффициенты при первой и второй производных выходной величины, т. е. уменьшает время переходного процесса и изменяет его характер. В некоторых случаях имеет место быстрозатухающий колебательный процесс. Сказанное наглядно иллюстрируют на рис. 5 кривые нарастания э. д. с.  $E_3$  при внезапном включении возбуждения идеального (кривая 2) и реального (кривая 1) электромашинных усилителей.

Действием размагничивающего потока  $\Phi_p$  объясняются более высокие динамические свойства электромашинного усилителя при холостом ходе по сравнению с обычным генератором постоянного тока.

**Влияние нагрузочного тока.** При учете описанного действия потока  $\Phi_p$  для электромашинного усилителя, нагруженного на исполнительный двигатель с независимым возбуждением, было бы справедливо дифференциальное уравнение

$$\frac{m_1 m_2}{k k_3} U_1 = (1 + p \frac{\tau_1 + \tau_2}{k} + p^2 \frac{\tau_1 \tau_2}{k}) (1 + p\tau_m) \omega_2 \quad (17)$$

или

$$\frac{m_1 m_2}{k k_3} U_1 = (1 + a_1' p + a_2' p^2 + a_3' p^3) \omega_2,$$

где

$$a_1' = \frac{\tau_1 + \tau_2}{k} + \tau_m, \quad a_2' = \frac{\tau_1 \tau_2}{k} + \frac{\tau_1 + \tau_2}{k} \tau_m, \quad a_3' = \frac{\tau_1 \tau_2 \tau_m}{k},$$

и для электромашинного усилителя, нагруженного на обмотку возбуждения генератора Леонарда, — уравнение:

$$m_1 m_2 m_3 U_1 = (1 + b_1' p + b_2' p^2 + b_3' p^3) E_4, \quad (18)$$

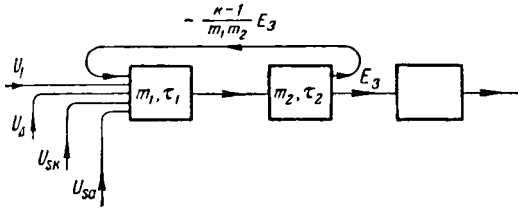


Рис. 6.

$$b_1' = \frac{\tau_1 + \tau_2}{k} + \tau_3, \quad b_2' = \frac{\tau_1 \tau_2}{k} + \frac{\tau_1 + \tau_2}{k} \tau_3, \\ b_3' = \frac{\tau_1 \tau_2 \tau_3}{k}.$$

Покажем, насколько сильно изменяются процесс в системе и дифференциальное уравнение системы благодаря обратным влияниям тока нагрузки на цепи управляющей и короткозамкнутой обмоток и на замкнутый контур компенсационной обмотки.

а) Поток недокомпенсации. По ряду причин в машине устанавливают обычно незначительную недокомпенсацию ампервитков реакции якоря. Поток

$$\Phi_{\Delta} = \Phi_a - \Phi_k = q_{\Delta} \cdot 0,4\pi w_a \frac{\lambda}{2} i_a,$$

так и поток  $\Phi_p$ , направлен по продольной оси магнитной цепи и производит размагничивающее действие. По аналогии с потоком  $\Phi_p$  можно действие потока  $\Phi_{\Delta}$  заменить приложенным к входу электромагнитного усилителя напряжением

$$U_{\Delta} = -\frac{w_1}{\tau_1} \Phi_{\Delta} \cdot 10^{-8} = -\frac{0,4\pi q_{\Delta} w_a w_1 \lambda}{2\tau_1} i_a \cdot 10^{-8},$$

как показано на рис. 6.

б) Потоки рассеяния компенсационной обмотки  $\Phi_{s1}$  и  $\Phi_{s2}$ . Поток  $\Phi_{s1}$  рассеяния компенсационной обмотки от тока  $i_a$  нагрузки, составляющий некоторую часть  $q_{s1}$  от потока  $\Phi_a$  и сцепленный с управляющей обмоткой, индуцирует в ней при переходных режимах э. д. с.

$$E_{s1} = -w_1 p \Phi_{s1} \cdot 10^{-8} = -0,4\pi q_{s1} w_a w_1 \frac{\lambda}{2} p i_a \cdot 10^{-8}.$$

Эта э. д. с. складывается с другими напряжениями, приложенными к управляющей цепи электромагнитного усилителя. Поток  $\Phi_{s2}$  рассеяния компенсационной обмотки, составляющий некоторую часть  $q_{s2}$  от потока  $\Phi_a$  и сцепленный с замкнутым через  $R_{ш}$  контуром обмотки, индуцирует в ней при переходных режимах э. д. с.

$$E_{s2} = -w_k p \Phi_{s2} \cdot 10^{-8} \approx$$

$$\approx -0,4\pi q_{s2} w_a^2 \frac{\lambda}{2} p i_a \cdot 10^{-8},$$

где  $w_k$  — число витков компенсационной обмотки можно считать приблизительно равным числу последовательно соединенных витков якоря  $w_a$ .

При изложенных выше допущениях в отношении потоков рассеяния замкнутых контуров компенсационной обмотки и обмотки управления справедлива эквивалентная схема, показанная на рис. 7, а. На схеме  $R_1$  — сопротивление замкну-

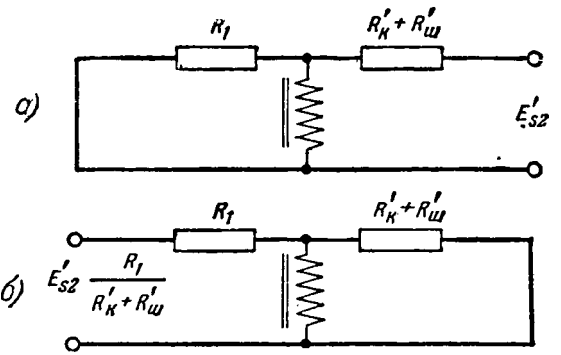


Рис. 7.

той цепи управления;  $R_k' + R_{ш}' = (R_k + R_{ш}) \left(\frac{2w_1}{w_a}\right)^2$  — сопротивление контура компенсационной обмотки, приведенное к числу витков  $w_1$  управляющей обмотки;  $E_{s2}' = E_{s2} \frac{2w_1}{w_a}$  — индуцированная э. д. с., приведенная к числу витков  $w_1$ . Очевидно, напряжение  $E_{s2}'$  можно заменить напряжением  $E_{s2}' \frac{R_1}{R_k' + R_{ш}'}$ , приложенным в цепи управляющей обмотки, как показано на рис. 7, б. Таким образом, действие потоков  $\Phi_{s1}$  и  $\Phi_{s2}$  эквивалентно действию приложенного к входу электромагнитного усилителя (рис. 6) напряжения

$$U_{sk} = E_{s1} + E_{s2} \frac{R}{R_k' + R_{ш}'} = \\ = -0,4\pi w_1 w_a \frac{\lambda}{2} p i_a \cdot 10^{-8} \left( q_{s1} + 2q_{s2} \frac{R}{R_k' + R_{ш}'} \right).$$

в) Влияние потока  $\Phi_{sa}$  рассеяния лобовых частей обмотки якоря. Поток  $\Phi_{sa}$  рассеяния лобовых частей обмотки якоря, пропорциональный току  $i_a$  нагрузки и составляющий некоторую часть  $q_{sa}$  от потока  $\Phi_a$ , обуславливает в короткозамкнутой цепи якоря э. д. с. вращения

$$E_{sa} = -4\pi w_a \Phi_{sa} \cdot 10^{-8} = \\ = -4\pi q_{sa} w_a \cdot 0,4\pi w_a \frac{\lambda}{2} i_a \cdot 10^{-8}.$$

Не нарушая процесса, можно вместо э. д. с.  $E_{sa}$  действующей в короткозамкнутой цепи якоря, включить в цепь управляющей обмотки напряжение

$$U_{sa} = E_{sa} \frac{1+p\tau_1}{m_1},$$

которое равно э. д. с.  $E_{sa}$ , разделенной на операторный коэффициент усиления первого звена. Включение это показано на рис. 6. Таким образом, процесс при нагрузке можно представить так, как будто к входу идеального усилителя кроме управляющего напряжения  $U_1$  приложены напряжения

$$\frac{k-1}{m_1 m_2} E_3 + U_{\Delta} + U_{sk} + U_{sa},$$

обусловленные внутренними обратными связями. Напряжение, зависящее от нагрузки:

$$U_{\Delta} + U_{sk} + U_{sa} = -0,4\pi w_1 w_a \frac{\lambda}{2\tau_1} \cdot 10^{-8} (q_{\Delta} + q_{sa}) i_a - \\ - 0,4\pi w_1 w_a \frac{\lambda}{2} \cdot 10^{-8} \left( q_{s1} + 2q_{s2} \frac{R_1}{R_k' + R_{ш}'} + q_{sa} \right) p i_a,$$

имеет составляющие, пропорциональные току и первой производной тока нагрузки. Все исследованные выше обратные связи негативны.

*Электромашинный усилитель, обслуживающий исполнительный двигатель.* Процесс в системе, составленной из электромашинного усилителя и приключенного к нему исполнительного двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, подчиняется, очевидно, дифференциальному уравнению:

$$\frac{m_1 m_2}{k_2} (U_1 - \frac{k-1}{m_1 m_2} E_3 + U_\Delta + U_{\Sigma k} + U_{sa}) = (1 + a_1' p + a_2' p^2 + a_3' p^3) \omega_2.$$

Учтя (2), (6) и (19), преобразуем это уравнение в такой вид:

$$\frac{m_1 m_2}{k k_2} U_1 = (1 + a_1' p + a_2' p^2 + a_3' p^3) \omega_2 + a_1'' p \omega_2 + a_2'' p^2 \omega_2, \quad (20)$$

где

$$a_1'' = 36 \nu^2 \tau_2^2 \tau_m \frac{R_2}{k R_a} (q_\Delta + q_{sa})$$

и

$$a_2'' = 36 \nu^2 \tau_1 \tau_2^2 \tau_m \frac{R_2}{k R_a} \left( q_{s1} + 2 q_{s2} \frac{R_1}{R_{\kappa'} + R_{\Sigma}} + q_{sa} \right).$$

Из сравнения (17) и (20) видно, что обратное действие тока нагрузки выразилось в появлении негативных обратных связей  $a_1'' p \omega_2$  и  $a_2'' p^2 \omega_2$ , пропорциональных первой и второй производным регулируемой величины.

На числовом примере можно убедиться, насколько велико влияние указанных связей. Для нагруженного на исполнительный двигатель электромашинного усилителя мощностью 4 kW, имеющего 5-процентный запас витков компенсационной обмотки и установленную с помощью сопротивления  $R_{\Sigma}$  0,5-процентную недокомпенсацию ампервитков реакций якоря, при расположении щеток в нейтрали и питании цепи управления от лампового усилителя справедливы следующие значения параметров:  $\tau_y = 0,035$  sec.,  $\tau_\kappa = 0,013$  sec.,  $\tau_1 = \tau_y + \tau_\kappa = 0,048$  sec.,  $\tau_2 = 0,22$  sec.,  $k = 6$ ,  $\tau_m = 0,2$  sec.,  $R_2 : R_a = 1 : 3$ ,  $R_1 : (R_{\kappa'} + R_{\Sigma}) = 0,26$ . Недокомпенсация  $q_\Delta = 0,005$ . Потоки рассеяния можно оценить такими цифрами:  $q_{s1} = 0,005$ ;  $q_{s2} = 0,01$  и  $q_{sa} = 0,005$ .

При указанных выше условиях, благодаря обратному влиянию тока нагрузки, происходит увеличение коэффициентов дифференциального уравнения системы при  $p \omega_2$  в  $\frac{a_1' + a_1''}{a_1'} \approx 3$  раза

и при  $p^2 \omega_2$  в  $\frac{a_2' + a_2''}{a_2'} \approx 4,2$  раза. Таким обра-

зом, время и характер процесса разгона двигателя при внезапном приложении в выходу системы напряжения определяются в основном имеющимися в электромашинном усилителе обратными влияниями нагрузочного тока.

Благодаря указанным влияниям система, со-

стоящая из электромашинного усилителя и исполнительного двигателя, обладает относительно невысокими динамическими свойствами, особенно в тех случаях, когда имеется значительный запас витков компенсационной обмотки и требуемая степень компенсации устанавливается с помощью шунтирующего реостата.

Большое число экспериментов подтверждает вышесказанное. Нужно иметь в виду, что влияние тока нагрузки имеет тем большее значение, чем больше мощности электромашинного усилителя и исполнительного двигателя, и наоборот.

*Электромашинный усилитель, обслуживающий обмотку возбуждения генератора Леонарда.* При регулировании усилителем возбуждения генератора Леонарда обратные воздействия нагрузочного тока совершенно по-иному влияют на динамические свойства системы. В этом случае ток нагрузки пропорционален выходной величине системы, а не первой производной выходной величины, как это было в предыдущем случае. При учете (18) и (19) получается дифференциальное уравнение системы:

$$\frac{m_1 m_2 m_3}{k} U_1 = (1 + b_1' p + b_2' p^2 + b_3' p^3) E_4 + b_0 E_4 + b''_1 p E_4,$$

где

$$b_0 = 36 \nu^2 \tau_2^2 \frac{R_2}{k R_3} (q_\Delta + q_{sa})$$

и

$$b''_1 = 36 \nu^3 \tau_1 \tau_2^2 \frac{R_2}{k R_3} \left( q_{s1} + 2 q_{s2} \frac{R_1}{R_{\kappa'} + R_{\Sigma}} + q_{sa} \right).$$

Это уравнение может быть приведено к виду

$$\frac{m_1 m_2 m_3}{k (1 + b_0)} U_1 = (1 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3) E_4,$$

откуда видно, что обратное влияние нагрузочного тока уменьшает в  $(1 + b_0)$  раз коэффициент усиления системы по напряжениям и коэффициенты при  $p^2 E_4$  и  $p^3 E_4$ ; коэффициент при  $p E_4$  уменьшается в  $\frac{b'_1 (1 + b_0)}{b'_1 + b''_1}$  раз.

Для упомянутого выше электромашинного усилителя при параметрах нагрузочной цепи  $\tau_3 = 0,5$  sec и  $\frac{R_2}{R_3} = \frac{1}{20}$  получаются следующие изменения коэффициентов:  $(1 + b_0) = 1,37$ ,  $\frac{b'_1 (1 + b_0)}{b'_1 + b''_1} = 1,32$ . Таким образом, в данном случае наряду с уменьшением коэффициента усиления динамические характеристики системы несколько улучшаются.

#### Литература

1. Prinz. Contribution of the Theory of Automatic Controllers and Followers. Journ. of Scientific Instrument, № 1944.
2. Д. И. Марьяновский. Устойчивость линейных систем автоматического регулирования. Электричество, № 9, 1946.
3. Я. С. Эпштейн. Особенности проектирования амплифонов. Электричество, № 12, 1945.

# Расчет магнитной цепи электромашинного усилителя

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

Московский энергетический институт им. Молотова

Особенности расчета магнитной цепи электромашинного усилителя в основном следующие: 1) необходимость расчета по двум взаимноперпендикулярным осям (ось  $q$  главного рабочего потока и ось  $d$  потока управления, рис. 1); 2) наличие компенсационной обмотки, предназначенной для компенсации продольного поля якоря; 3) наличие распределенной на якоре обмотки возбуждения главного рабочего поля; 4) необходимость учета размагничивающего действия ампервитков коммутируемых секций под щетками поперечной оси и 5) требование иметь ненасыщенную магнитную систему при работе в нормальном режиме.

На рис. 1 представлена магнитная система двухполюсного электромашинного усилителя с распределенной компенсационной обмоткой. На статоре по поперечной оси  $q$  расположены большие пазы, в которых размещаются обмотка управления, частично компенсационная и предусмотренные схемой управления специальные обмотки. В продольной оси  $d$  расположены зубцы, являющиеся дополнительными полюсами для «силовых щеток». Прилегающие с обеих сторон дополнительного полюса пазы имеют достаточно большие размеры, чтобы разместить в них витки обмотки дополнительного полюса и часть компенсационной обмотки. Остальные пазы статора предназначены для компенсационной обмотки. Очевидно, отдельные катушки ее имеют разную ширину, но оси всех катушек совпадают с продольной осью  $d$ .

Компенсационная обмотка может быть выполнена и сосредоточенной, расположенной на расщепленных полюсах статора. Тогда все катушки имеют одинаковую форму, обусловленную шириной частичного расщепленного полюса.

Необходимость выполнять крупные пазы по осям  $q$  и  $d$ , независимо от вида компенсационной обмотки, позволяет утверждать, что электромашинный усилитель в магнитном отношении имеет явнополюсную

Рассматривается расчет магнитной цепи электромашинного усилителя с поперечным полем («амплидин») в общем случае ее строения. Предлагаемый графоаналитический метод позволяет с практической точностью учесть насыщение усилителя. При расчете магнитной цепи по оси потока управления учитываются размагничивающие ампервитки коммутируемых секций, в основу чего положено соотношение, данное Я. С. Эпштейном.

систему с расщепленными полюсами

Магнитная цепь по поперечной оси. Рабочий поток возбуждается якорем электромашинного усилителя, обмотка которого обтекается током короткозамкнутых щеток  $I_2$ . Поток неподвижен в пространстве. Его пространственная ось определяется положением короткозамкнутых щеток. При вращении якоря в потоке  $\Phi_q$  между силовыми щетками электромашинного усилителя индуцируется выходное напряжение  $U_3$ . Целью магнитного расчета по этой оси является получение характеристики холостого хода поперечной оси усилителя (второй каскад усиления)  $U_3 = f(I_2)$ .

Значение потока определяется из известной формулы:

$$\Phi_q = \frac{E_3 \cdot 10^8}{\frac{p}{\pi} \frac{N}{a}} [M],$$

где  $E_3$  — э. д. с. на щетках продольной оси. Распределенная обмотка возбуждения потока  $\Phi_q$  вызывает некоторое усложнение в расчете по сравнению с нормальной машиной.

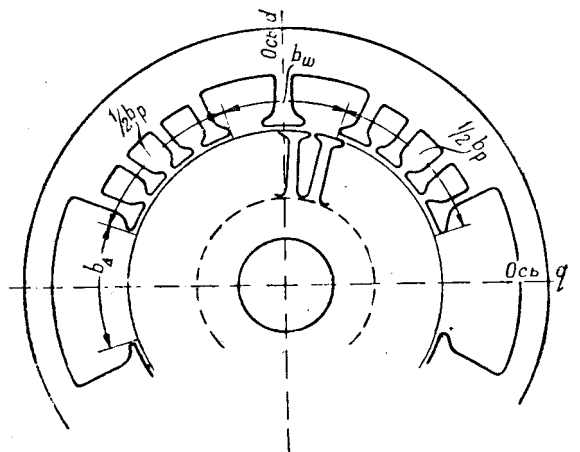


Рис. 1.

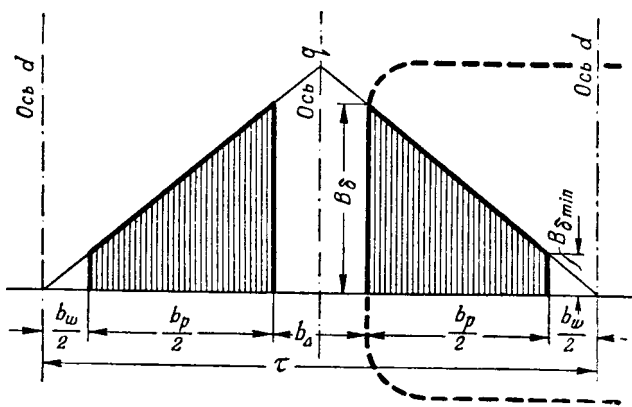


Рис. 2.

Рассмотрим расчет в общем случае магнитной системы с разными межполюсными промежутками согласно рис. 2. При равномерном воздушном зазоре и отсутствии насыщения поле  $\Phi_q$  имело бы форму треугольника. Провал кривой поля по оси  $q$  на участке  $b_d$  определяется наличием на поперечной оси больших пазов. Эти пазы представляют настолько большое сопротивление магнитному потоку, что при ненасыщенной машине в этой части полюсного деления проходит ничтожная доля потока. Как показали расчеты, при максимальной индукции в воздушном зазоре  $B_\delta \approx 4800$  Gs индукция в воздушном зазоре на оси  $q$  имеет величину порядка 50—80 Gs. Аналогичная картина наблюдается и на участке  $b_w$ , где имеются крупные пазы для размещения обмоток дополнительных полюсов силовых щеток. Исходя из вышесказанного, в дальнейшем пренебрегаем потоком в межполюсных промежутках  $b_d$  и  $b_w$ .

В общем случае на одно полюсное деление  $\delta$  поток

$$\Phi_q = B_{\delta\delta} \alpha_p \tau l,$$

где  $B_{\delta\delta}$  — среднее значение индукции в воздушном зазоре на протяжении полюсной дуги  $b_p$ ;  $\alpha_p = \frac{b_p}{\tau}$  — коэффициент использования полюсного деления;  $l$  — аксиальная длина якоря. При линейном изменении магнитной индукции под полюсом, соответственно изменению намагничивающей силы возбуждения якоря, получаем (рис. 2) трапециoidalную форму поля. Имеем:

$$B_{\delta\delta} = \frac{1}{2} (B_{\delta\max} + B_{\delta\min}) = \frac{1}{2} (B_\delta + B_{\delta\min}).$$

Здесь  $B_{\delta\max} = B_\delta$  — максимальная индукция в воздушном зазоре.

Для минимального значения индукции находим из рис. 2

$$B_{\delta\min} = B_\delta \frac{b_w}{b_w + b_p}.$$

Подставляя значение  $B_{\delta\min}$  в предыдущее уравнение, находим коэффициент  $\alpha_b = \frac{B_{\delta\delta}}{B_\delta} = \frac{1}{2} \times$

$\times \frac{2b_w + b_p}{b_w + b_p}$ , который может быть назван коэффициентом использования полюсной дуги. Окончательно получим выражение для потока  $\Phi_q$  в виде:

$$\Phi_q = \alpha_p \alpha_b B_\delta \tau l = \alpha B_\delta \tau l,$$

где  $\alpha = \alpha_p \alpha_b$  — коэффициент магнитного использования в общем виде. Для нормальных машин с сосредоточенной обмоткой возбуждения  $\alpha_b = 1$  и  $\alpha = \alpha_p$ . В электромашинных усилителях с явно выраженными расщепленными полюсами одинаковой формы при сосредоточенной компенсационной обмотке и с равными межполюсными промежутками ( $b_w = b_d$ )  $\alpha = \frac{\alpha_p}{1 + \alpha_p}$ . В электрома-

шинных усилителях с неявно выраженными полюсами при распределенной компенсационной обмотке ( $b_w = 0$ ) коэффициент магнитного использования  $\alpha = 0,5 \alpha_p$ , так как в этом случае  $\alpha_b = 0,5$ .

Чтобы найти якорный ток возбуждения  $I_2$ , выбираем ту силовую линию, для которой помет счет интеграла  $\oint H dl$  произвести удобнее. Такая силовая линия проходит через точки максимальной индукции в воздушном зазоре. Часть ее условно изображена пунктирной линией на рис. 2. Для нее имеем:

$$\oint H dl = AW_\delta + \sum AW_z + \sum AW_a = \sum AW = AS_2(b_p + b_w),$$

где  $\sum AW_z$  и  $\sum AW_a$  — ампервитки на пару полюсов соответственно для зубцовых слоев и для спинок статора и ротора;

$AS_2 = \frac{NI_2}{2a\pi D}$  — линейная нагрузка якоря от тока возбуждения.

После преобразования выражения интеграл  $\oint H dl$  и учитывая, что  $\frac{b_p}{\tau} = \alpha_p$ , получаем значение намагничивающего тока  $I_2$  в общем виде:

$$I_2 = \frac{4ap \sum AW}{N \left( \alpha_p + \frac{b_w}{\tau} \right)},$$

где  $\sum AW$  — полные ампервитки магнитной цепи на пару полюсов. Для усилителя с симметричными явно выраженными полюсами ток возбуждения

$$I_2 = \frac{8ap \sum AW}{N(\alpha_p + 1)}.$$

При «неявнополюсной» магнитной системе ( $b_w = 0$ ) получаем:

$$I_2 = \frac{4ap \sum AW}{\alpha_p N}.$$

Расчет  $\sum AW$  производится обычным путем. Ампервитки воздушного зазора определяются по максимальной индукции  $B_\delta$ . Коэффициент Картера должен учитывать шлицы пазов статора

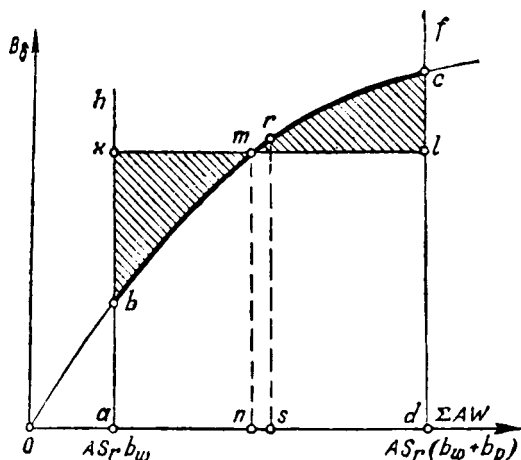


Рис. 3.

и якоря. При расчете магнитной индукции в зубцах якоря можно пренебречь потоком рассеяния вследствие его малости. Поэтому для зубцовой индукции якоря и статора может быть принята одна и та же расчетная формула:

$$B_z = B_\delta \frac{t}{k_{Fe} b_z},$$

где  $t$  — зубцовый шаг по воздушному зазору соответственно или для якоря, или для статора;

$b_z$  — ширина зубца или статора или якоря;

$k_{Fe}$  — коэффициент изоляции листов железа.

**Учет насыщения магнитной цепи.** При форсировке возбуждения необходимо учитывать уплощение кривой поля в воздушном зазоре вследствие насыщения, главным образом, зубцов. Учет насыщения можно произвести следующим образом. Строим кривую намагничивания  $B_\delta = f(\Sigma AW)$  для отдельных замкнутых контуров силовых магнитных линий поля  $\Phi_q$ . Ампервитки статора и якоря составляют небольшую долю  $\Sigma AW$ . Для упрощения допустимо поэтому принять расчетные длины магнитных линий в спинках неизменными и равными средним значениям для любого выбранного замкнутого контура. В таком случае кривая  $B_\delta = f(\Sigma AW)$  будет одной и той же для всех выбранных магнитных контуров. Кривую строят в пределах возможной форсировки возбуждения. Помощью этой кривой графически можно определить коэффициент использования полюсной дуги при насыщении  $\alpha_b$  следующим образом. Вертикальными линиями  $ah$  и  $df$  (рис. 3), проведенными через точки оси абсцисс, соответствующие ампервиткам  $AS_2 b_w$  и  $AS_2 (b_w + b_p)$ , отсекаем отрезок кривой намагничивания. Кривая  $abcd$  отображает форму кривой поля в воздушном зазоре при насыщении. Проведя горизонтальную линию  $kl$  так, чтобы площади треугольников  $bkm$  и  $ctl$  были равны, находим  $\alpha_b$  насыщенности машины, как отношение ординат  $mn$  и  $cd$ :

$$\alpha_b = \frac{mn}{cd} = \frac{B_{\delta a}}{B_\delta}.$$

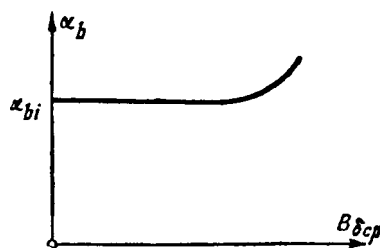


Рис. 4.

Ординату  $mn$  можно определить или графически, планиметрируя площадь кривой, или аналитически, пользуясь формулой Симпсона для приближенного интегрирования:

$$mn = \frac{1}{6} (ab + 4sr + dc),$$

где  $sr$  — ордината кривой, соответствующая середине отрезка  $ad$  (рис. 3).

Для удобства расчетов определяют  $\alpha_b$  для трех-четырех значений  $B_\delta$  и строят кривую  $\alpha_b = f(B_{\delta cp})$  или  $\alpha = \alpha_b \alpha_p = f(B_{\delta cp})$  (рис. 4), где  $B_{\delta cp} = \alpha B_\delta$ . Зависимость  $\alpha$  от  $B_{\delta cp}$  более удобна, так как при расчете магнитной цепи проще пользоваться уравнением

$$\Phi_q = B_{\delta cp} \tau l,$$

Очевидно, начальное значение коэффициента формы поля  $\alpha_{bi}$ , соответствующее насыщенности машины, и должно равняться значению, найденному выше по уравнению

$$\alpha_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{2b_w + b_p}{b_w + b_p}.$$

Если нельзя пренебрегать изменением расчетных длин спинки статора и якоря при насыщении, то пользуются методом, аналогичным для расчета магнитной цепи турбогенератора [Л. 1].

**Магнитная цепь по продольной оси.** Расчет продольной магнитной цепи ничем особенно не отличается от того же расчета в нормальных машинах постоянного тока с  $\alpha_b = 1$ .

Индукции по продольной оси низкие и при расчете ампервитков управления достаточно принять во внимание только ампервитки воздушного зазора. Но учет размагничивающего действия коммутлируемых секций, замкнутых поперечными щетками, является вследствие малой величины ампервитков управления обязательным, как это впервые отметил Я. С. Эпштейн [Л. 2].

Значение размагничивающих ампервитков коммутлируемых секций от добавочного тока  $i_z$  в короткозамкнутой секции определяется согласно рис. 5, как полный ток, охватываемый магнитной силовой линией, создаваемой этим током  $i_z$ .

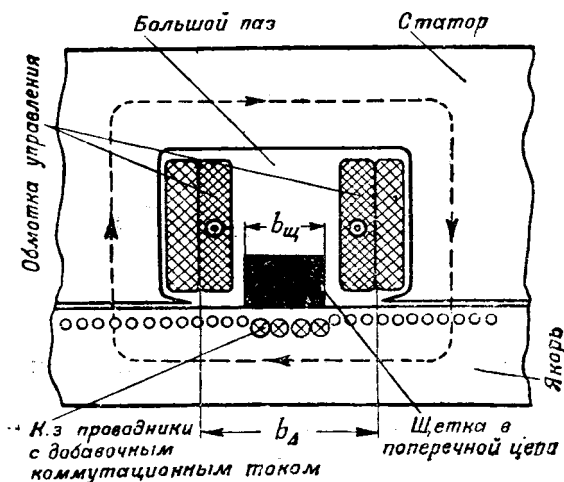


Рис. 5.

Имеем на два воздушных зазора:

$$AW_p \approx i_{zcp} N \frac{b_{щ}}{\pi D_k} = i_{zcp} \frac{Nb_{щ}}{kt_k} = i_{zcp} 2w_s \beta;$$

здесь  $i_{zcp}$  — среднее значение добавочного коммутационного тока по ширине коммутационной зоны, равной приблизительно  $b_{щ}$ ;

$w_s = \frac{N}{2k}$  — число витков в короткозамкнутой секции;

$\beta = \frac{b_{щ}}{t_k}$  — отношение ширины щетки  $b_{щ}$  к коллекторному делению  $t_k$ . По Эпштейну [Л. 2]

$$i_{zcp} = \frac{0,145}{A^{2/3}} \cdot \frac{e_z T_k}{L_s}.$$

Здесь  $A = \frac{R_k T_k}{L_s} R_k$  — полное сопротивление щеточного контакта;

$T_k = \frac{b_{щ}}{v_k}$  — период коммутации;

$v_k = \frac{\pi D_k n}{60}$  — окружная скорость коллектора;  $L_s$  — коэффициент самоиндукции короткозамкнутых секций;  $e_z = e_a + e_r$  — добавочная э. д. с.

в короткозамкнутой секции, состоящая из э. д. с. внешнего поля якоря  $e_a = 2w_s B_{\delta a} l v_a \cdot 10^{-6}$  и реактивной э. д. с. коммутации  $e_r = 2w_s v_a A S_2 \lambda \times 10^{-6}$ , где  $v_a$  — окружная скорость якоря в м/сек;  $B_{\delta a}$  — индукция в зоне коммутации от поля якоря;  $\lambda$  — удельная приведенная проводи-

мость потоков рассеяния секция якоря на 1 см длины якоря, рассчитываемая по обычным формулам, например [Л. 3].

Индукцию  $B_{\delta a}$ , создаваемую намагничивающей силой тока  $I_2$ , можно определить помощью  $\oint H dl$ , взятого для контура силовой магнитной линии поперечного поля якоря, проходящей через середину зоны коммутации. Ввиду значительного воздушного зазора в этом контуре, обусловленного наличием большого паза статора, с достаточной точностью:

$$\oint H dl \approx AW_{\delta a} = 0,8 B_{\delta a} 2 \delta_a = AS_2 \tau,$$

где  $\delta_a$  — длина силовой магнитной линии поля в большом пазу. Из последнего выражения имеем

$$B_{\delta a} = \frac{AS_2 \tau}{1,6 \delta_a}$$

Как показывают расчеты, можно с достаточной точностью принять  $\delta_a \approx \frac{1}{2} b_{\Delta}$ . Обмотка управления должна быть рассчитана на сумму ампервитков:

$$AW_1 = AW_{\delta 1} + AW_p,$$

где  $AW_{\delta 1}$  — ампервитки на преодоление воздушного зазора. Ампервитками стали, как выше указывалось, пренебрегаем ввиду их малости.

Число витков и сечение обмотки управления должны быть выбраны с учетом требуемого коэффициента усиления, т. е. с учетом допустимых потерь в обмотке. Чтобы обеспечить заданный коэффициент усиления усилителя  $k_{yc}$ , следует плотность тока в обмотке управления  $j_1$  не брать более, чем

$$j_1 \leq \frac{P_3}{k_{yc} AW_{1p} l_{w1}}.$$

Здесь  $P_3$  — «выходная» мощность усилителя;  $p$  — удельное сопротивление проводника обмотки управления;  $l_{w1}$  — средняя длина витка обмотки управления.

#### Литература

1. А. Е. Алексеев и М. П. Костенко. Турбогенераторы. Энергоиздат, 1940.
2. Я. С. Эпштейн. Особенности проектирования амплитуды. Электричество, № 12, 1945.
3. Р. Рихтер. Электрические машины, т. 1, ОНТИ 1935.



# Система Леонарда с управляющим возбудителем

Инженер Ю. Е. ЛЕВИН и инженер Н. И. ЧЕРНЯК

Южэлектромонтаж

В современном электроприводе, особенно в металлургическом, все более широкое распространение получает система Леонарда с электромашиной автоматикой. В наиболее чистом виде эта система была представлена трехобмоточными генераторами, которые при соответствующем выборе параметров цепей возбуждения обеспечивают интенсивное протекание режимов управления и обладают надежными токоограничивающими свойствами. Однако, по ряду причин, особенно из-за необходимости контакторного управления большими токами в цепях возбуждения (50—70 А для генераторов 120—150 кВт), трехобмоточные генераторы не получили широкого распространения в металлургическом приводе. Их место заняли системы электромашиной автоматики, в которых регулирующие функции возложены не на генераторы, а на электромашинные усилители.

Особенно широкое применение получили амплидины, обладающие общеизвестными достоинствами — высоким коэффициентом усиления, малой мощностью возбуждения (измеряемой ваттами), возможностью получения больших форсировок. Эти качества весьма ценны для приводов, требующих следящего автоматизированного управления, для главных приводов реверсивных прокатных станков и др.

Тем не менее имеется значительная группа приводов, предъявляющих к системе управления более ограниченные требования, сводящиеся, в основном, к обеспечению надежного токоограничения и качественных пусковых и тормозных характеристик. К числу таких приводов относятся ответственные вспомогательные механизмы прокатных станков, работающие в напряженном повторно-кратковременном режиме и имеющие одно- или двухступенчатую тахограмму, например рабочие рольганги, линейки манипуляторов, ножницы и другие механизмы блюмингов.

Рассматриваются статические и динамические свойства новой схемы возбуждения в системе Леонарда, основанной на применении управляющего возбудителя, в качестве которого используется стандартная машина постоянного тока (серии ПН). Предлагаемая система управления позволяет получить экскаваторные характеристики привода и обеспечивает одноступенчатый разгон (замедление) двигателя при постоянстве тока в главной цепи. При высоком качестве режимов управления предлагаемая система отличается простотой и надежностью, не требует применения сложных машин и аппаратов. Разработанная при проектировании электропривода грейфера типового рудно-угольного перегружателя, данная схема может быть также использована для управления напряженно работающими приводами, например, вспомогательными механизмами прокатных станков.

Все задачи, связанные с управлением этими механизмами, могут быть решены более простыми и надежными средствами без применения электромашинных усилителей, ценные свойства которых в данном случае не являются необходимыми и практически не используются. Кроме того, следует иметь в виду, что электромашинные усилители не свободны от ряда

существенных недостатков, как, например: опасность возникновения колебательных процессов, вынуждающая применять специальные стабилизирующие устройства, и необходимость квалифицированного обслуживания.

Рассматриваемая здесь система электромашиной автоматики свободна от вышеуказанных недостатков электромашинных усилителей типа «амплидин», отличается большей простотой и надежностью и обеспечивает качественное управление такими приводами, как перечисленные выше вспомогательные механизмы прокатных станков, а также приводами крупных кранов-перегружателей (например, грейфером) и др.

Изображенная на рис. 1 система управления характеризуется следующими особенностями: 1) регулирующие функции осуществляются двухобмоточным управляющим возбудителем в виде нормальной машины постоянного тока (например, типа ПН) с разделенной на две части обмоткой возбуждения; магнитная инерция цепей возбуждения возбудителя незначительна; 2) токоограничивающие функции осуществляет противокомпаундная обмотка генератора, действующая практически безотказно; 3) процессы пуска и реверса осуществляются при согласном включении обмоток возбудителя, чем обеспечивается поддержание постоянства тока и ускорения в переходных режимах; 4) для получения высокой интенсивности протекания переходных режимов обмотки независимого возбуждения генератора выполнены на низкое напряжение и



где  $\delta$  — тангенс угла наклона линии форсировочных ампервитков возбуждателя;  
 $\gamma$  — тангенс угла наклона прямолинейной части характеристики холостого хода генератора  $E_z = f(AW_z)$  (оба угла с осью ординат).

Нетрудно доказать, что

$$\delta = \frac{w_\phi}{r_\phi}, \quad (2)$$

$$\gamma = \alpha \frac{\beta r_{ш}}{w_{ш}}, \quad (3)$$

где  $w_\phi$  — число витков на полюс обмотки  $\Phi О В$ ;  
 $r_\phi$  — полное сопротивление цепи обмотки  $\Phi О В$ ;

$w_{ш}$  и  $r_{ш}$  — соответственно то же, но для обмотки  $О Н Г$ ;

$\alpha$  и  $\beta$  — соответственно тангенсы угла наклона характеристик холостого хода генератора [ $E_z = f(AW_z)$ ] и возбуждателя [ $E_\phi = f(AW_\phi)$ ].

Подставив (2) и (3) в (1), получим:

$$\frac{\delta}{\gamma} = \frac{w_\phi}{\beta r_\phi} \frac{w_{ш}}{\alpha \cdot r_{ш}}. \quad (4)$$

При  $\frac{\delta}{\gamma} = 1$  линия форсировочных ампервитков возбуждателя параллельна прямолинейной части характеристики холостого хода генератора. Этому случаю соответствуют прямая 2 и внутренняя характеристика 2—2. Очевидно, что при  $\frac{\delta}{\gamma} = 1$  площадь, ограниченная внутренней характеристикой генератора и осями координат (пропорциональная мощности генератора  $E I$ ), будет максимальной при сохранении свойств экскаваторной характеристики.

Следовательно, условие  $\frac{\delta}{\gamma} = 1$  является оптимальным для внутренних (и внешних) характеристик генератора с точки зрения статического режима.

Практически для свойств экскаваторной характеристики приходится принимать отношение несколько меньшим единицы (0,8—0,9), так

как при  $\frac{\delta}{\gamma} = 1$  участок внутренней характеристики генератора, соответствующий прямолинейной части характеристики холостого хода, становится вертикальным, т. е. неудобным для устойчивой работы. При  $\frac{\delta}{\gamma} = 0,8—0,9$  (на рис. 2 прямая 1 и внутренняя характеристика 1—1) площадь, ограниченная внутренней характеристикой генератора и осями координат, незначительно отклоняется от максимальной, в то же время характеристика становится устойчивой во всем диапазоне нагрузок от  $I=0$  до  $I=I_k$ .

**Переходные режимы.** Рассмотрим вначале переходные процессы при пуске двигателя без нагрузки и согласованном включении обмоток возбуждения управляющего возбуждателя. Для цепей схемы, изображенной на рис. 1, определяются следующие уравнения переходных процессов: независимого возбуждения генератора

$$E_\phi = r_{ш} i_{ш} + k_z w_{ш} \frac{dE_z}{dt}; \quad (5)$$

форсировочной обмотки возбуждателя

$$E_z = r_\phi i_\phi + k_\phi w_\phi \frac{dE_\phi}{dt}; \quad (6)$$

независимого возбуждения возбуждателя

$$U_\phi = r_\phi i_\phi + k_\phi w_\phi \frac{dE_\phi}{dt}; \quad (7)$$

для главной цепи

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dE_z}{dt} - \frac{1}{T_m} I. \quad (8)$$

Для прямолинейной части характеристики холостого хода генератора

$$E_z = \frac{A W_z}{\alpha} = \frac{w_{ш}}{\alpha} i_{ш} - \frac{w_c}{\alpha} I, \quad (9)$$

то же, но для возбуждателя

$$E_\phi = \frac{A W_\phi}{\beta} = \frac{w_\phi}{\beta} i_\phi + \frac{w_\phi}{\beta} i_\phi, \quad (10)$$

где  $T_m = \frac{\theta R}{(C_g \Phi_g)^2}$  — электрохимическая постоянная привода;

$k_z$  и  $k_\phi$  — коэффициенты пропорциональности между потоком и э. д. с., соответственно для генератора и возбуждателя ( $k = \frac{2p\sigma}{c w}$ ,

$\sigma$  — коэффициент рассеяния).

При выводе уравнений (5) — (10) сделаны обычные допущения — не учитывалось влияние токов Фуко, остаточного магнетизма, реакции якоря и индуктивности якорной цепи.

Решая совместно уравнения (5) — (10), получим:

$$\frac{d^3 I}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 I}{dt^2} + b_1 \frac{dI}{dt} + m_1 I = 0, \quad (11)$$

где

$$a_1 = \frac{1}{T_{ш}} + \frac{1}{T_\phi} + \frac{1}{T_m} + \frac{w_c}{\alpha R T_{ш}},$$

$$b_1 = \frac{1}{T_{ш} T_m} \left( 1 - \frac{\delta}{\gamma} + T_{ш} + T_\phi + T_\phi \frac{w_c T_c}{\alpha R} \right),$$

$$m_1 = \frac{\frac{\delta}{1 - \gamma}}{T_{ш} T_m (T_\phi + T_\phi)};$$

$T_{ш}$ ,  $T_\phi$ ,  $T_\phi$  — постоянные времени, соответственно, для цепей независимого возбуждения генератора и возбуждателя и цепи форсировочной обмотки возбуждателя, причем

$$T_{ш} = \frac{k_z w_{ш}^2}{\alpha r_{ш}}; \quad T_\phi = \frac{k_\phi w_\phi^2}{\beta r_\phi}; \quad T_\phi = \frac{k_\phi w_\phi^2}{\beta r_\phi}.$$

Решение уравнения (11) в общем случае весьма громоздко. Рассмотрим его для оптимальных условий стати-

ческого режима — для  $\frac{\delta}{\gamma} = 1$ . В этом случае уравнение (11) преобразуется к следующему виду:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + a \frac{dI}{dt} + bI = 0. \quad (12)$$

Интегрируя (12) при начальных условиях:  $t = 0$ ;  $I_{(0)} = 0$ ;  $E_{2(0)} = 0$ ;  $i_{u(0)} = 0$ , получаем:

$$I = I_{\max} \left[ 1 - \frac{1}{k_1 - k_2} \left( -k_2 \cdot k_1 t + k_1 e^{k_2 t} \right) \right], \quad (13)$$

где

$$I_{\max} = \frac{I_{\kappa}}{1 + \frac{\alpha R}{\omega_c} \frac{T_{u\phi} + T_{\phi} + T_{\phi}}{I_{\kappa}}}, \quad (14)$$

$$k_{1,2} = -\frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - b} < 0,$$

где

$$a = \frac{1}{T_{u\phi}} \left( 1 - \frac{T_{u\phi}}{T_{\kappa}} + \frac{T_{u\phi}}{T_{\phi} + T_{\phi}} + \frac{\omega_c}{\alpha R} \right),$$

$$b = \frac{T_{u\phi} + T_{\phi} + T_{\phi} + \frac{\omega_c}{\alpha R}}{T_{u\phi} T_{\kappa} (T_{\phi} + T_{\phi})}.$$

Решая совместно (4) и (10) и учитывая, что  $e^{k_1 t}$  и  $e^{k_2 t}$  очень быстро затухают ( $k_1$  и  $k_2$  велики), определим интенсивность нарастания э. д. с. генератора

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{RI_{\kappa}}{T_{\kappa} + \frac{\alpha R}{\omega_c} (T_{u\phi} + T_{\phi} + T_{\phi})}. \quad (15)$$

Уравнения (13), (14) и (15) позволяют сделать весьма важные выводы о характере протекания переходных процессов при пуске в рассматриваемой системе управления:

1) При соблюдении оптимальных условий статического режима ( $\frac{\delta}{\gamma} = 1$ ) ток в главной цепи при пуске

быстро достигает максимальной величины и не спадает в течение всего пускового периода в пределах прямолинейной части характеристики холостого хода генератора.

2. Максимальный толчок пускового тока в главной цепи не превышает тока  $I_{\kappa}$ , т. е. ограничен заранее выбранным допустимым пределом, что особенно важно для приводов с большим маховым моментом.

3) Нарастание э. д. с. генератора при пуске (в пределах прямолинейной части характеристики холостого хода генератора) происходит с постоянной интенсивностью.

Следовательно, на основании уравнений (13), (14) и (15) можно заключить, что условие статической оптимальности  $\frac{\delta}{\gamma} = 1$  обеспечивает такое оптимальное про-

текание переходных процессов при пуске, что является особенно ценным свойством рассматриваемой системы управления.

Из уравнения (15) видно, что при заданной величине интенсивность нарастания э. д. с. генератора зависит от магнитной инерции цепей возбуждения генератора и возбудителя ( $T_{u\phi}$ ,  $T_{\phi}$ ,  $T_{\phi}$ ). Практически всегда возможно выбрать параметры управляющего возбудителя таким образом, что  $T_{\phi}$  и  $T_{\phi}$  будут значительно меньше  $T_{u\phi}$ . При этом влияние магнитной инерции цепей возбуждения возбудителя на интенсивность протекания переходных процессов в главной цепи будет ничтожно.

Производная  $\frac{dE_2}{dt}$  зависит от суммы постоянных вре-

мени  $T_{u\phi} + T_{\phi} + T_{\phi}$ , и можно предположить, что характер протекания переходных процессов в главной цепи при пуске не изменится, если при выводе уравнений пренебречь магнитной инерцией цепей возбуждения возбудителя, а постоянную времени цепи независимого возбуждения генератора  $T_{u\phi}$  заменить некоторой эквивалентной постоянной времени  $T_{u\phi} = T_{u\phi} + T_{\phi} + T_{\phi}$ . Для того, чтобы доказать это предположение, решим уравнения (5) — (10), пренебрегая индуктивностью цепей возбуждения (считая

$k_{\phi} \omega_{\phi} \frac{dE_{\phi}}{dt} = 0$ ;  $k_{\phi} \omega_{\phi} \frac{dE_{\phi}}{dt} = 0$ ), причем для общности выводов рассмотрим режим пуска под нагрузкой ( $M_{\kappa} = \text{const}$ ).

После соответствующих преобразований получим дифференциальное уравнение, описывающее закон изменения пускового тока:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{1}{T_{u\phi}} \left( 1 - \frac{\delta}{\gamma} + \frac{T_{u\phi}}{T_{\kappa}} + \frac{\omega_c}{\alpha R} \right) \frac{dI}{dt} + \frac{1 - \frac{\delta}{\gamma}}{T_{u\phi} T_{\kappa}} (I - I_{cm}) = 0. \quad (16)$$

Принимая  $\frac{\delta}{\gamma} = 1$  (оптимальное соотношение), получим:

$$\frac{dI}{dt} + \rho I = B, \quad (17)$$

где  $\rho = \frac{1}{T_{u\phi}} + \frac{\omega_c}{\alpha R T_{u\phi}}$ .

Для определения  $B$  составим начальные условия:  $t = 0$ ;  $I_{(0)} = I_{cm}$  (момент трогания);  $E_{2(0)} = RI_{cm}$ ;  $E_{\phi(0)} = E_{\kappa\phi} + \frac{\omega_{\phi}}{\beta r_{\phi}} R \cdot I_{cm}$ ;  $i_{u(0)} = R \cdot I_{cm} \cdot \left( \frac{\alpha}{\omega_{u\phi}} + \frac{\omega_c}{R \omega_{u\phi}} \right)$ .

После соответствующих преобразований получим:

$$I = I_{cm} + \frac{I_{\kappa} - I_{cm}}{1 + \frac{\alpha R}{\omega_c} \frac{T_{u\phi}}{T_{\kappa}}} (1 - e^{-\rho t}). \quad (18)$$

Так как  $\rho$  велико,  $e^{-\rho t}$  быстро затухает, и пусковой ток достигает максимальной величины

$$I_{\max} = I_{cm} + \frac{I_{\kappa} - I_{cm}}{2 + \frac{\alpha R}{\omega_c} \frac{T_{u\phi}}{T_{\kappa}}} = I_{\kappa} - \frac{I_{\kappa} - I_{cm}}{1 + \frac{\omega_c}{\alpha R} \frac{T_{\kappa}}{T_{u\phi}}}. \quad (19)$$

Пользуясь (18) и учитывая, что  $e^{-\rho t}$  быстро затухает, нетрудно определить интенсивность нарастания э. д. с. генератора при пуске:

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{R(I_{\kappa} - I_{cm})}{T_{\kappa} + \frac{\alpha R}{\omega_c} T_{u\phi}}.$$

Для случая пуска вхолостую ( $I_{cm} = 0$ ) уравнения (19) и (20) преобразуются к следующему виду:

$$I = I_{\max} (1 - e^{-\rho t}),$$

$$I_{\max} = \frac{I_{\kappa}}{1 + \frac{\alpha R}{\omega_c} \frac{T_{u\phi}}{T_{\kappa}}},$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{RI_{\kappa}}{T_{\kappa} + \frac{\alpha R}{\omega_c} T_{u\phi}}.$$



# Расчет переходных процессов электропривода по схеме Леонарда с трехобмоточным возбудителем

Инж. М. И. КНИГИН

Харьковский электромеханический завод им. Сталина

**Введение.** В последнее время все большее распространение получают системы автоматического управления электроприводами с применением электромашинной автоматики

(системы с многообмоточным возбудителем «рототролом», «регулексом» и др.). Выяснение ряда вопросов, связанных с методикой расчета переходных процессов в указанных системах, является достаточно актуальным.

Проверка полученных в результате данной работы теоретических выводов и сравнение их с экспериментальными данными проведены для схемы Леонарда с трехобмоточным возбудителем применительно к автоматизированному электроприводу продольно-строгального станка. Вполне достаточное для практических целей совпадение расчетных и экспериментальных кривых свидетельствует о правильности теоретических предположений и закономерности принятых для упрощения математической обработки допущений.

В рассматриваемой схеме главного привода продольно-строгального станка (рис. 1) управление всеми режимами работы перенесено в обмотки возбуждения специального трехобмоточного возбудителя мощностью 1 кВт с ненасыщенной магнитной системой и незначительным остаточным магнетизмом.

Для решения вопроса о движении электропривода с подобным возбудителем необходимо

излагается аналитический метод расчета переходных процессов электропривода по схеме Леонарда с трехобмоточным возбудителем. Показаны преимущества применения в уравнении переходного процесса производной магнитного потока по времени при расчете электрических схем с магнитносвязанными контурами. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

написать уравнения для электрических и механических переходных процессов в системе Леонарда. Совместное решение этих уравнений в данном случае можно про-

вести аналитически, так как магнитная система возбудителя выполнена ненасыщенной, а характеристику холостого хода генератора Леонарда с некоторой погрешностью можно заменить несколькими отрезками прямых (рис. 2, а). Кроме того, для упрощения математической обработки влияние токов Фуко, реакции якоря и его индуктивности не учитывались.

Переходный процесс в цепи с индуктивностью и активным сопротивлением может быть выражен дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\sigma a 2p w \frac{d\Phi}{dt} + Ri = u,$$

где  $2p$  — число полюсов;

$w$  — число витков на полюсе;

$R$  — общее омическое сопротивление цепи;

$\sigma$  — коэффициент рассеяния;

$a$  — коэффициент связи.

Коэффициенты  $\sigma$  и  $a$  определяются опытным путем. В машинах постоянного тока произведение  $\sigma \cdot a$  для обмоток возбуждения может быть принято равным  $1,1 \div 1,2$ . Применение в уравнении переходного процесса производной магнитного потока по времени оказывается весьма удобным, особенно если в схеме имеются магнитносвязанные контуры (обмотки возбуждения возбудителя). В связи с этим отпадает необходимость в определении индуктивности и взаимной индуктивности, которые к тому же не остаются все время постоянными. Значения параметров для расчета переходных процессов приведены в табл. 1, 2 и 3.

**Переходные процессы.** Рассмотрим расчет переходного процесса в при реверсе стола с обратного хода ( $v_{обр. хода} = 61 \text{ м/мин}$ ) на режущий ( $v_{рез} = 25 \text{ м/мин}$ ).

При реверсе стола с обратного хода на режущий ход в схеме главного привода происходит отключение контак-

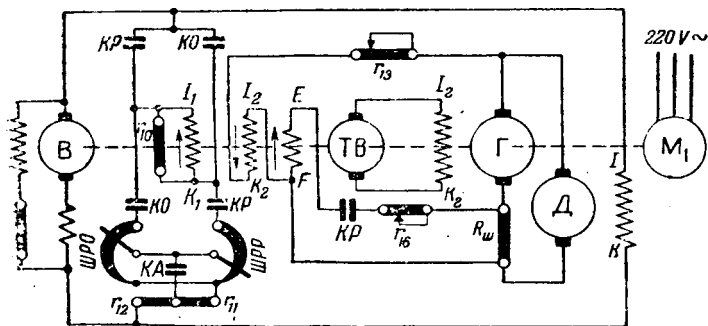


Рис. 1.

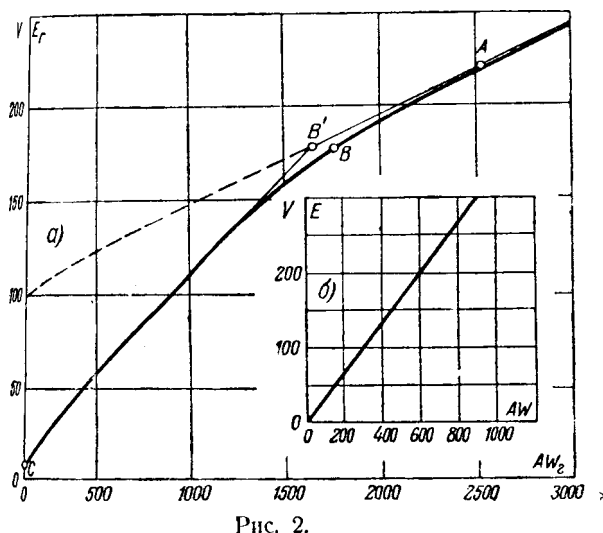


Рис. 2.

Таблица 1

Обозначение добавочного сопротивления . .	$R_{ш}$	$r_{10}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{18}$
Сопротивление, $\Omega$ . . .	0,004	300	54	90	0,02

Таблица 2

Наименование	Генератор Леонарда	Двигатель строгания	Трехобмоточный возбудитель	Возбудитель
Обозначение	$\Gamma$	$\Delta$	ТВ	В
Напряжение, В . . . .	125 ÷ 280	125	110	220
Ток якоря, А . . . . .	275	275	9	16
Мощность, кВт . . . .	34,5	27,6	1	3,5
Вращающий момент, кгм . . . . .	—	90	—	—
Напряжение возбуждения, В . . . . .	110	220	—	—
Ток возбуждения, А . . . . .	9	7,5	—	—
Скорость, об/мин . . .	1 450	80 ÷ 800	1 450	1 450
Сопротивление цепи якоря, $\Omega$ . . . . .	$R_{\Sigma \Gamma} = 0,055$	$R_{\Sigma \Delta} = 0,07$	$R_{\Sigma \text{ТВ}} = 1,8$	—

Примечание. Все машины имеют число полюсов  $2p=4$ .

тора КО и включение контактора КР (рис. 1). По опытным данным время от момента отключения контактора КО до момента включения контактора КР составляет 0,12 сес. Контактор КО отключает основную обмотку возбуждения трехобмоточного возбудителя ТВ от напряжения возбудителя В. Для цепи основной обмотки возбуждения трехобмоточного возбудителя имеет место уравнение:

$$\sigma \alpha 2p w_o \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} + (R_o + r_{10}) i_o = 0. \quad (1)$$

После умножения на  $w_o$  и деления на  $R_o + r_{10}$  получим:

$$\frac{\sigma \alpha 2p}{R_o + r_{10}} w_o^2 \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} + w_o i_o = 0. \quad (2)$$

Для цепи дифференциальной обмотки возбуждения действительно уравнение:

$$\frac{\sigma \alpha 2p}{R_d + r_{13}} w_d^2 \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} + w_d i_d = - \frac{w_d}{R_d + r_{13}} E_z + \frac{w_d (R_{\Sigma z} + R_{ш})}{R_d + r_{13}} I. \quad (3)$$

Суммированием левых и правых частей уравнений (2) и (3) получим:

$$\sigma \alpha 2p \left( \frac{w_o^2}{R_o + r_{10}} + \frac{w_d^2}{R_d + r_{13}} \right) \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} + \Sigma AW = - \frac{w_d}{R_d + r_{13}} E_z + \frac{w_d (R_{\Sigma z} + R_{ш})}{R_d + r_{13}} I, \quad (4)$$

где  $\Sigma AW = w_o i_o + w_d i_d$ .

Магнитный поток трехобмоточного возбудителя  $\Phi = \alpha_1 \cdot E = 0,183 \cdot 10^4 E$ , а следовательно,

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0,183 \cdot 10^4 \frac{dE}{dt}.$$

Трехобмоточный возбудитель работает при ненасыщенной магнитной системе, поэтому зависимость между его намагничивающими ампервитками и э. д. с. (рис. 2, б) имеет вид:

$$\Sigma AW = \beta_1 E = 3,05 \cdot E. \quad (5)$$

После подстановки значений  $\frac{d\Phi}{dt}$  и  $\Sigma AW$ , а также других известных величин в уравнение (4), получим:

$$0,163 \frac{dE}{dt} + E = -1,34 E_z + 0,08 I. \quad (6)$$

Для цепи возбуждения генератора Леонарда можно написать

$$\frac{\sigma \alpha 2p w_z^2}{R_z + R_{\Sigma \text{Л}} + r_{np}} \cdot \frac{d\Phi_z}{dt} 10^{-8} + w_z i_z = \frac{w_z}{R_z + R_{\Sigma \text{Л}} + r_{np}} E. \quad (7)$$

Таблица 3

Наименование	Обмотки возбуждения трехобмоточного возбудителя			Обмотка возбуждения генератора Леонарда
	основная	дифференциальная	компундная	
Обозначение	$I_1 - K_1$	$I_2 - K_2$	$E - F$	$I_z - K_z$
Число витков на полюс . . . . .	$w_o = 750$	$w_d = 1000$	$w_k = 4$	$w_z = 600$
Сопротивление при $t_{\text{возд}} = 25^\circ\text{C}$ , $\Omega$ . . . . .	$R_o' = 50$	$R_d' = 140$	$R_k' = 0,08$	$R_z' = 10$
Сопротивление при перегреве $\tau = 25^\circ\text{C}$ , $\Omega$ . . . . .	$R_o = 55$	$R_d = 154$	$R_k = 0,088$	$R_z = 11$

Примечания:

1. При обратном ходе стола со скоростью  $v_{\text{обр}} = 61 \text{ м/мин}$  сопротивление шунтового регулятора  $R_{\text{шро}} = 24 \Omega$ .
2. При режущем ходе стола со скоростью  $v_{\text{рез}} = 25 \text{ м/мин}$  сопротивление шунтового регулятора  $R_{\text{шпр}} = 230 \Omega$ .
3. Осциллографирование переходных процессов в цепях главного привода производилось при температуре окружающей среды  $t = 25^\circ\text{C}$ .
4. Для осциллографирования электропривод был включен с холодного состояния, поэтому температура перегрева обмоток возбуждения принята  $25^\circ\text{C}$ , а нагрев якорных обмоток не учитывается.

Магнитный поток генератора Леонарда  $\Phi_z = x_z \cdot E_z = 0,978 \times 10^4 E$ , а следовательно,

$$\frac{d\Phi_z}{dt} = 0,978 \cdot 10^4 \frac{dE_z}{dt}. \quad (8)$$

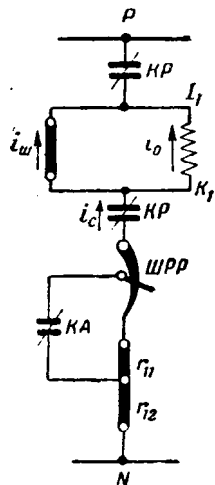


Рис. 3.

Для цепи якорей генератора Леонарда и двигателя строгания имеет место уравнение:

$$E_z = E_d + (R_{\kappa z} + R_{\kappa d} + R_{\kappa ш} + R_{np}) I = 0,335 n + 0,14 I. \quad (11)$$

Уравнение динамического равновесия электропривода имеет вид:

$$M_d - M_c = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \text{ или } 0,327 I - 5,24 = \frac{12,34}{375} \frac{dn}{dt}.$$

Таким образом, приходим к следующей системе уравнений:

$$0,163 \frac{dE}{dt} + E = -1,34 E_z + 0,08 I, \quad (6)$$

$$0,621 \frac{dE_z}{dt} + E_z - 100 = 2,16 E, \quad (10)$$

$$0,335 n + 0,14 I = E_z, \quad (11)$$

$$0,327 I - 5,24 = \frac{12,34}{375} \frac{dn}{dt}. \quad (12)$$

В целях нахождения зависимостей  $n = f_1(t)$ ,  $I = \varphi_1(t)$  и  $E_z = \psi_1(t)$  необходимо их совместное решение.

После исключения  $E$ ,  $E_z$  и  $I$  получается:

$$\frac{d^3 n}{dt^3} + 31,7 \frac{d^2 n}{dt^2} + 211 \frac{dn}{dt} + 920 n = 67\,000. \quad (13)$$

Для решения уравнения (13) составим характеристическое уравнение:

$$k^3 + 31,7 k^2 + 211 k + 920 = 0. \quad (14)$$

Уравнению (15) удовлетворяют следующие корни:  $k_1 = -24,6$ ;

$$k_2 = -3,55 + j 4,89; \quad k_3 = -3,55 - j 4,89.$$

Полным интегралом дифференциального уравнения (13) является функция:

$$n = C_1 e^{-24,6t} + e^{-3,55t} \cdot (C_2 \cos 4,89t + C_3 \sin 4,89t) + 72. \quad (15)$$

Частное решение дифференциального уравнения (13) найдем путем определения произвольных постоянных  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  по следующим начальным условиям:  $n = 550$  об/мин,  $\frac{dn}{dt} = 0$  (перед началом реверса установившееся движение),

$E_z = 220$  В,  $E = 46$  В. Оно имеет вид:

$$n = 40,6 e^{-24,6t} + e^{-3,55t} \times (537,4 \cos 4,89t + 595 \sin 4,89t) + 72. \quad (16)$$

Уравнение (16) дает искомую зависимость  $n = f_1(t)$ .

На основании уравнения (12) имеем:

$$I = 0,1 \frac{dn}{dt} + 16.$$

После подстановки значения  $\frac{dn}{dt}$  из уравнения (16) и проведения подобных членов получим:

$$I = -100 e^{-24,6t} + e^{-3,55t} \times (100 \cos 4,89t - 474 \sin 4,89t) + 16. \quad (17)$$

Напряжение генератора Леонарда определяется следующей формулой:

$$U_z = E_z - R_{\kappa z} I. \quad (18)$$

Учитывая уравнение (11), получим:

$$U_z = 0,335 n + 0,085 I. \quad (19)$$

На основании уравнений (16), (17) и (19) произведем расчет кривых  $n = f_1(t)$ ,  $I = \varphi_1(t)$  и  $E_z = \psi_1(t)$  для значений  $t = 0 \div 0,12$  сек (рис. 4, 5 и 6, участки  $0 - a$ ).

Контактор КР включает основную обмотку возбуждения трехобмоточного возбудителя на напряжение возбудителя В и устанавливают цепь питания для компаундирующей обмотки возбуждения (рис. 1).

Для цепи основной обмотки возбуждения имеем:

$$\sigma \cdot \alpha \cdot 2p \omega_0 \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} + i_0 R_0 + i_c (R_{шпп} + r_{12}) = U_B. \quad (20)$$

Условие разветвления токов (рис. 3) определяет:

$$i_c = i_0 + i_{ш}. \quad (21)$$

Из условия равенства активных падений напряжения приложенному напряжению  $U_B$  можем написать:

$$i_{ш} = \frac{U_B}{r_{10}} - \frac{R_{шпп} + r_{12}}{r_{10}} i_c. \quad (22)$$

С помощью уравнений (21) и (22) выразим  $i_c$  через  $i_0$

$$i_c = \frac{r_{10} i_0 + U_B}{r_{10} + R_{шпп} + r_{12}}. \quad (23)$$

Подстановка значения  $i_c$  в (20) приводит его к виду:

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma \cdot \alpha \cdot 2p \cdot \omega_0^2 \cdot 10^{-8}}{r_{10} (R_{шпп} + r_{12}) + R_0} \cdot \frac{d\Phi}{dt} + \omega_0 i_0 = \\ & = \frac{r_{10} \cdot \omega_0 U_B}{(r_{10} + R_{шпп} + r_{12}) \left[ \frac{r_{10} (R_{шпп} + r_{12})}{r_{10} + R_{шпп} + r_{12}} + R_0 \right]}. \end{aligned} \quad (24)$$

Для дифференциальной обмотки возбуждения трехобмоточного возбудителя остается в силе уравнение (3). Для компаундирующей обмотки возбуждения получим уравнение:

$$\sigma \cdot \alpha \cdot 2p \omega_k \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} + (R_k + r_{16}) i_k = I R_{ш}. \quad (25)$$

Суммирование левых и правых частей уравнений (3), (24)

и (25), подстановка значений  $\frac{d\Phi}{dt}$  и  $\Sigma AW$ , а также других известных величин приводит к уравнению:

$$0,203 \frac{dE}{dt} + E = -138 - 1,34 E_z + 0,0912 I. \quad (26)$$

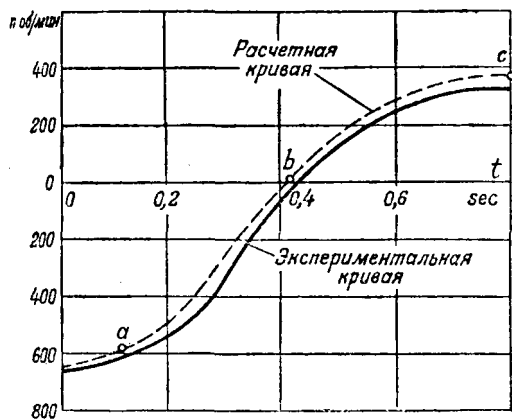


Рис. 4.

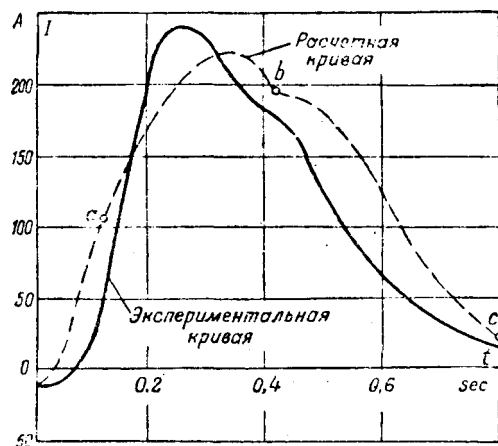


Рис. 5.

Для цепи возбуждения генератора Леонарда остается в силе уравнение (7). Магнитный поток генератора Леонарда  $\Phi_2 = a_2 E_2$ , следовательно:

$$\frac{d\Phi_2}{dt} = a_2 \frac{dE_2}{dt}. \quad (27)$$

Путем замены участка BC характеристики холостого хода генератора Леонарда прямой BC (рис. 2,а) получим зависимость между ампервиками возбуждения и э. д. с. генератора:

$$AW_2 = \beta_3 (E_2 - E_0) = 9,6 (E_2 - 8), \quad (28)$$

где  $E_0 = 8$  В — отрезок, отсекаемый прямой BC на оси  $E_2$ . После подстановки значений  $\frac{d\Phi_2}{dt} AW_2$  и других известных величин уравнение (7) приводится к виду:

$$1,39 \frac{dE_2}{dt} + E_2 - 8 = 4,83 E_2. \quad (29)$$

Также остаются действительными уравнения (11) и (12). Совместное решение уравнений (11), (12), (26) и (29) относительно переменной  $n$  приводит к уравнению:

$$\frac{d^3 n}{dt^3} + 29,5 \frac{d^2 n}{dt^2} + 151,5 \frac{dn}{dt} + 633 n = -168 300. \quad (30)$$

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$k^3 + 29,5 k^2 + 151,5 k + 633 = 0. \quad (31)$$

Уравнению (31) удовлетворяют следующие корни:  $k_1 = -24,3$ ;

$$k_2 = -2,6 + j 4,3; \quad k_3 = -2,6 - j 4,3.$$

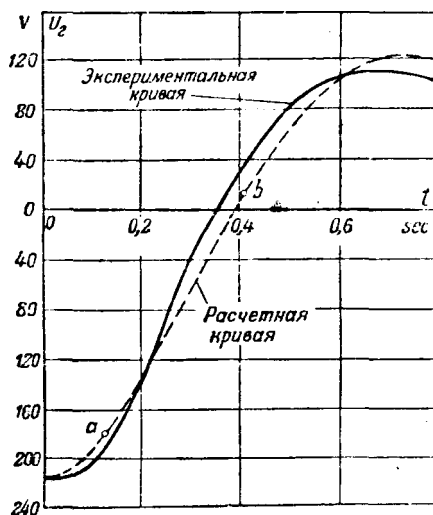


Рис. 6.

Полным интегралом дифференциального уравнения (30) служит функция:

$$n = C_4 e^{-24,3 t} + e^{-2,6 t} (C_5 \cos 4,3 t + C_6 \sin 4,3 t) - 268. \quad (32)$$

Частное решение дифференциального уравнения (30) получим путем определения произвольных постоянных  $C_4$ ,  $C_5$  и  $C_6$  по начальным условиям. За начальные условия принимаются те значения  $n$ ,  $I$  и  $E_2$ , которые имели место в момент включения контактора КР, а именно:  $I = -105,4$  А,  $n = 580$  об/мин,  $E_2 = 179,2$  В. Таким образом, частное решение дифференциального уравнения (30), соответствующее принятым начальным условиям, имеет вид:

$$n = 19,2 e^{-24,3 t} + e^{-2,6 t} (828,9 \cos 4,3 t + 327 \sin 4,3 t) - 268. \quad (33)$$

Уравнение (33) дает искомую зависимость  $n = f_2(t)$ . Зависимость  $I = \varphi_2(t)$  получим на основании уравнения (12) после подстановки значения  $\frac{dn}{dt}$  из уравнения (33) и приведения подобных членов.

$$I = \varphi_2(t) = -46,7 e^{-24,3 t} + e^{-2,6 t} (-75 \cos 4,3 t - 441 \sin 4,3 t) + 16. \quad (34)$$

На основании уравнений (33), (34) и (19) произведен расчет кривых  $n = f_2(t)$ ,  $I = \varphi_2(t)$  и  $U_2 = \psi_2(t)$  для значений  $t = 0 \div 0,29$  сек. При  $t$ , равном 0,29 сек, скорость двигателя обратного хода  $n = 0$  (рис. 4,5 и 6, участки а—б).

Произведенный до сих пор расчет кривых  $n = f(t)$ ,  $I = \varphi(t)$  и  $U_2 = \psi(t)$  относится к тормозному режиму, когда двигатель строгания по инерции вращается в сторону обратного хода стола. При разгоне двигателя в сторону режущего хода момент сопротивления  $M_c$ , обусловленный силами трения, меняет направление на обратное предшествующему. Вследствие этого уравнение динамического равновесия электропривода имеет вид:

$$M_\partial + M_c = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}, \quad (35)$$

где  $M_\partial$  и  $\frac{dn}{dt}$  — алгебраические величины. После подстановки всех известных величин получим:

$$0,327 I + 5,24 = \frac{12,34}{375} \frac{dn}{dt}. \quad (36)$$

Так как при разгоне двигателя строгания в схеме никаких переключений не происходит, то остаются в силе уравнения (11), (26) и (29). Совместное решение этих уравнений относительно переменного  $n$  приводит к уравнению:

$$\frac{d^3 n}{dt^3} + 29,5 \frac{d^2 n}{dt^2} + 151,5 \frac{dn}{dt} + 633 n = -163 400. \quad (37)$$

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$k^3 + 29,5 k^2 + 151,5 k + 633 = 0. \quad (38)$$

Уравнению (38) удовлетворяют корни:  $k_1 = -24,3$ ;  $k_2 = -2,6 + j 4,3$ ;  $k_3 = -2,6 - j 4,3$ .

Полным интегралом дифференциального уравнения (37) является функция:

$$n = C_7 e^{-24,3 t} + e^{-2,6 t} (C_8 \cos 4,3 t + C_9 \sin 4,3 t) - 258. \quad (39)$$

Произвольные постоянные  $C_7$ ,  $C_8$  и  $C_9$  определяются по начальным условиям, т. е. по значениям  $I$  и  $E_2$  при  $n=0$ .

Частное решение дифференциального уравнения (37), соответствующее принятым начальным условиям, имеет вид:

$$n = -12,25 e^{-24,3 t} + e^{-2,6 t} (270,25 \cos 4,3 t - 317 \sin 4,3 t) - 258. \quad (40)$$

Уравнение (40) дает искомую зависимость  $n = f_3(t)$ . Зависимость  $I = \varphi_3(t)$  получим на основании уравнения (12)

после подстановки значения  $\frac{dn}{dt}$  из уравнения (40) и приведения подобных членов:

$$I = \varphi_3(t) = 29,8 e^{-24,3 t} + e^{-2,6 t} (-207 \cos 4,3 t - 33,7 \sin 4,3 t) - 16. \quad (41)$$

На основании уравнений (40), (41) и (19) произведен расчет кривых  $n = f_3(t)$ ,  $I = \varphi_3(t)$  и  $U_e = \varphi_3(t)$  (рис. 4, 5 б, участки б—с).

Кроме расчетных кривых на рис. 4, 5 и 6 представлены соответствующие экспериментальные кривые, полученные путем осциллографирования. Из сравнения расчетных кривых с экспериментальными кривыми видно, что по характеру они достаточно близко подходят друг к другу. Максимальные значения тока (рис. 5) отличаются не более чем на 10%. Расхождение между экспериментальными и расчетными кривыми, представленными на рис. 4 и 6, также находится в пределах 10—15%. Наличие указанных расхождений объясняется тем, что обмоточные данные трехобмоточного возбудителя и генератора Леонарда были определены приближенно. Кроме того, как об этом было сказано ранее, при проведении расчета не учитывалось влияние токов Фуко, реакции якоря и его индуктивности, а характеристика холостого хода генератора Леонарда была заменена двумя отрезками прямых.

Автор считает своим долгом отметить, что при разработке темы им был получен ряд указаний от проф. Р. Л. Аронова.

#### Принятые обозначения

$i_o, i_d, i_k$  — соответственно токи возбуждения основной, дифференциальной, компаундирующей обмоток возбуждения возбудителя.

$W_o, W_d, W_k$  и,

$AW_o, AW_d, AW_k$  — соответственно, числа витков на полюс основной, дифференциальной, компаундирующей обмоток возбуждения трехобмоточного возбудителя.

$R_o, R_d, R_k$  — соответственно активные сопротивления основной, дифференциальной, компаундирующей обмоток возбуждения трехобмоточного возбудителя.

$\Phi$  — магнитный поток трехобмоточного возбудителя.

$E$  — э. д. с. трехобмоточного возбудителя.

$R_{я2}$  — сопротивление якоря, обмотки дополнительных полюсов и щеток трехобмоточного возбудителя.

$r_{10}$  — добавочное сопротивление цепи дифференциальной обмотки возбуждения трехобмоточного возбудителя.

$r_{13}$  — разрядное сопротивление.

$R_{шpp}$  — сопротивление шунтового регулятора режущего хода.

$R_{шpo}$  — сопротивление шунтового регулятора обратного хода.

$r_{12}$  — добавочное сопротивление в цепи основной обмотки возбуждения трехобмоточного возбудителя.

$r_{16}$  — добавочное сопротивление в цепи компаундирующей обмотки возбуждения трехобмоточного возбудителя.

$\sigma$  — коэффициент рассеивания обмоток возбуждения трехобмоточного возбудителя.

$\alpha$  — коэффициент связи обмоток возбуждения трехобмоточного возбудителя.

$U_B$  — напряжение возбудителя В.

$i_2$  — ток возбуждения генератора Леонарда.

$W_2, AW_2$  — число витков и ампервитки на полюс обмотки возбуждения генератора Леонарда.

$\Phi_2$  — магнитный поток генератора Леонарда.

$E_2$  — э. д. с. генератора Леонарда.

$R_2$  — сопротивление обмотки возбуждения генератора Леонарда.

$r_{np} = 0,1 \Omega$  — сопротивление соединительных проводов цепи возбуждения генератора Леонарда.

$R_{я2}$  — сопротивление якоря, обмотки дополнительных полюсов и щеток генератора Леонарда.

$I$  — ток якорной цепи генератора Леонарда и двигателя строгания.

$\Phi_d$  — магнитный поток двигателя строгания.

$E_d = 0,335 n$  — э. д. с. двигателя строгания, где  $n$  — обороты в минуту двигателя строгания.

$M_d = 0,327 I$  — вращающий момент двигателя строгания.

$M_c = 5,24 \text{ kg. m}$  — момент сопротивления на валу двигателя строгания при холостом ходе станка.

$GD^2 = 12,34 \text{ kg.m}$  — приведенный к валу двигателя маховый момент механической системы главного движения станка.

$R_{яd}$  — сопротивление якоря обмотки, дополнительных полюсов и щеток двигателя.

$R_{ш}$  — добавочное сопротивление в якорной цепи генератора Леонарда и двигателя.

$R_{np} = 0,011 \Omega$  — сопротивление соединительных проводов цепи якорей генератора Леонарда и двигателя строгания.

$$\alpha_1 = \frac{\Phi}{E} = 0,183 \cdot 10^4, \quad \alpha_2 = \frac{\Phi_2}{E_2} = 0,998 \cdot 10^4, \quad \beta_1 = \frac{AW}{E},$$

$$\beta_2 = \frac{AW_2}{E_2}, \quad \gamma_1 = \frac{AW}{\Phi}, \quad \gamma_2 = \frac{AW_2}{\Phi_2},$$

# Характеристики двигателя в системе Леонарда при трех обмотках возбуждения у генератора

Кандидат техн. наук, доц. В. П. БЫЧКОВ

Московский энергетический институт им. Молотова

**Введение.** Система Леонарда при наличии трех обмоток возбуждения у генератора имеет в настоящее время применение в специальных электроприводах, к числу которых принадлежат электроприводы экскаваторов, нажимного устройства обжимных станков, мощных гидропрессов, проходных щитов для шахт и других механизмов, обычно работающих в условиях больших механических перегрузок при большой частоте пуска, реверса и торможения. Для предохранения механизмов от больших усилий, могущих привести к поломке муфт и зубчатых передач, необходимо использовать соответствующую защиту. С этой целью применяются автоматические выключатели, специальные механические реле, предохранительные подушки, стаканы. Их назначение сводится к ограничению механических усилий в механизме. Указанные средства не обеспечивают полной защиты вследствие недостаточной четкости и надежности их в работе. Электропривод со специальной механической характеристикой и с ограниченным максимальным моментом будет в данном случае наиболее подходящим. Такая характеристика представлена на рис. 1.

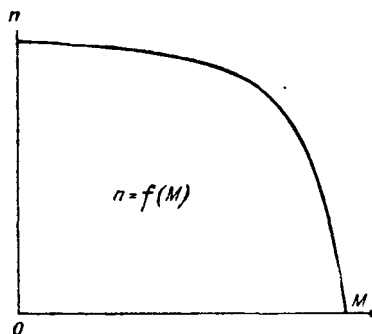


Рис. 1. Механическая характеристика двигателя, питаемого по системе Леонарда, с тремя обмотками возбуждения у генератора.

Излагается теория статических режимов системы Леонарда при трех обмотках возбуждения у генератора. Предлагается метод построения механических характеристик системы. Проведен анализ параметров, влияющих на форму механических характеристик и даны методы расчета и критерии для выбора параметров оптимальных характеристик.

Для получения указанной характеристики двигателя генератор, питающий двигатель, имеет три обмотки возбуждения: независимую, шунтовую и серийную. Первые

две действуют согласно, а третья — встречно им.

В настоящей работе рассматриваются методы построения и расчета механических характеристик, проводится их анализ и дается методика определения оптимальных параметров систем возбуждения генератора.

Соотношения между основными параметрами возбуждения. Для схемы, представленной на рис. 2, магнитный поток генератора определяется совместным действием м. д. с. трех обмоток возбуждения. Если пренебречь влиянием тока шунтовой обмотки на величину ампервитков серийной обмотки, то для какого-либо уста-

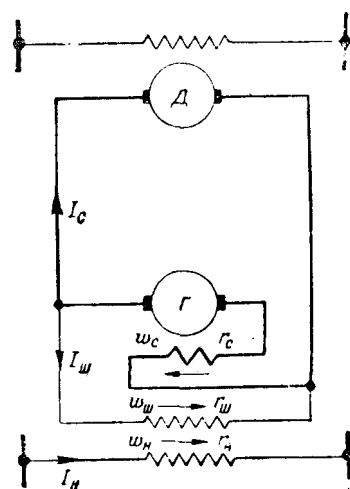


Рис. 2. Принципиальная схема Леонарда с тремя обмотками возбуждения у генератора.



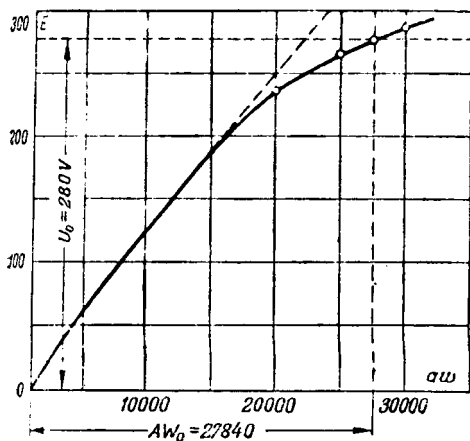


Рис. 4. Характеристика холостого хода генератора ПН-1750.

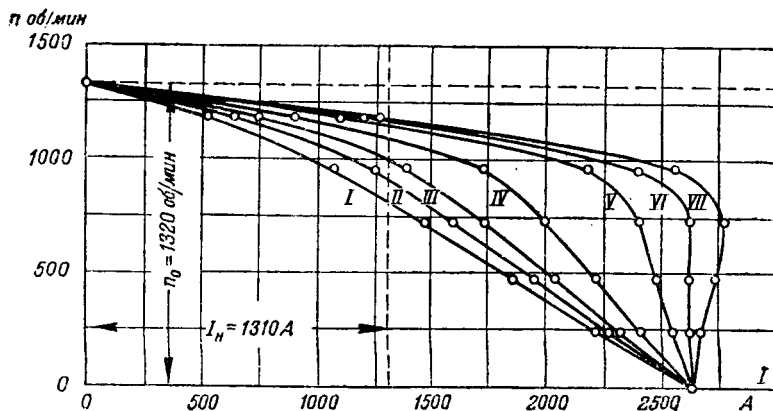


Рис. 5. Механические характеристики двигателя, питаемого по системе Леонарда с тремя обмотками возбуждения генератора, при разных значениях  $\psi$  и  $w_c$  и постоянном  $I_K$ .

**Анализ механических характеристик.** Форма механической характеристики двигателя в рассматриваемой системе Леонарда имеет большое значение для оценки производительности и надежности его работы. Так как она обусловлена параметрами обмоток возбуждения генератора, то правильный их выбор весьма существенен. В дальнейшем проводится конкретный анализ для схемы с машинами, установленными в приводе нажимного устройства блюминга. Номинальные данные машин приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование машины	Тип	Номинальные данные				Сопротивление якоря, $\Omega$	Сопротивление обмотки возбуждения, $\Omega$	Число пар полюсов	Число витков обмотки возбуждения
		kW	V	A	об/мин				
Генератор	ПН-1750	230	230	1000	1470	0,0052	25,7	2	870
Двигатель	ПН-1320	130	220	665	1000	0,01263	—	2	930

В целях упрощения в расчетах два параллельно включенных двигателя заменены одним эквивалентным, для которого

$$P_n = 2P_{n1}; \quad U = U_n; \quad I_n = 2I_{n1}; \quad n_n = n_{n1}.$$

Характеристика холостого хода генератора приведена на рис. 4. Изложенным выше методом построены семейства механических характеристик  $n = f(I_c)$ : 1) при  $w_c = \text{var}$ ;  $\psi = \text{var}$  и  $I_K = \text{const}$ ; 2) при  $\psi = \text{var}$  и  $w_c = \text{const}$ ; 3) при  $w_c = \text{var}$  и  $\psi = \text{const}$ .

На рис. 5 построены механические характеристики при заданном напряжении холостого хода  $U_0 = 1,22 U_n = 80$  и токе короткого замыкания  $I_K = 2I_n = 2620$  А. Семейство характеристик (рис. 5) построено для различных величин  $\psi$  и  $w_c$ . При малых значениях  $\psi$  и больших значениях  $w_c$  кривые отличаются значительным снижением скорости вращения для номинального момента, что

I. —  $\psi = 0$ ,  $w_c = 10,0$ ; II —  $\psi = 0,5$ ,  $w_c = 6,0$ ; III —  $\psi = 1,0$ ,  $w_c = 4,5$ ; IV —  $\psi = 2,0$ ,  $w_c = 3,0$ ; V —  $\psi = 3,5$ ,  $w_c = 1,5$ ; VI —  $\psi = 4,35$ ,  $w_c = 1,0$ ; VII —  $\psi = 5,12$ ,  $w_c = 0,8$  ( $U_0 = 1,22 U_n = 280$  V;  $n_n = 1320$  об/мин.,  $\psi = \text{var}$ ,  $w_c = \text{var}$ ,  $I_K = 2I_n$ ).

не обеспечит должной производительности. При весьма больших значениях  $\psi$  и малых  $w_c$  максимальный ток нагрузки становится выше заданной величины тока короткого замыкания  $I_K$  (кривая VII, рис. 5), что является нежелательным по условию ограничения максимального момента двигателя. При заданных  $U_0$  и  $I_K$  форма механической характеристики будет тем ближе подходить к оптимальной, чем она выпуклее, т. е. чем больше площадь, ограниченная кривой и осями координат. Отношение этой площади к площади прямоугольника со сторонами  $n_0$  и  $I_K$  называют коэффициентом эффективности характеристики<sup>1</sup>. Теоретически наиболее эффективной является характеристика IV, полученная при  $\psi = 4,35$ . Эта характеристика имеет наибольший коэффициент эффективности  $\gamma = 0,86$  (табл. 2). В области больших нагрузок она имеет прямоотвесный характер.

Таблица 2

Коэффициент эффективности механических характеристик

Номер кривой по рис. 5	Напряжение холостого хода, $U_0$ , V	Скорость холостого хода двигателя $n_0$ , об/мин	Максимальный ток короткого замыкания $I_K$ , A	Число в тков ернейшей обмотки $w_c$	$\psi = \frac{I_{ш0} w_{ш}}{I_n w_n}$	Коэффициент эффективности $\gamma$
I	280	1320	2620	10,0	0	0,58
II	280	1320	2620	6,0	0,5	0,62
III	280	1320	2620	4,5	1,0	0,66
IV	280	1320	2620	3,0	2,0	0,70
V	280	1320	2620	1,5	3,5	0,80
VI	280	1320	2620	1,0	4,35	0,85
VII	280	1320	2785	0,8	5,12	0,82

Практически наиболее рациональной считается механическая характеристика не с прямоотвесным, а с несколько пологим участком в области

<sup>1</sup> С. А. Пресс. Электрическое оборудование экскаваторов, 1938.

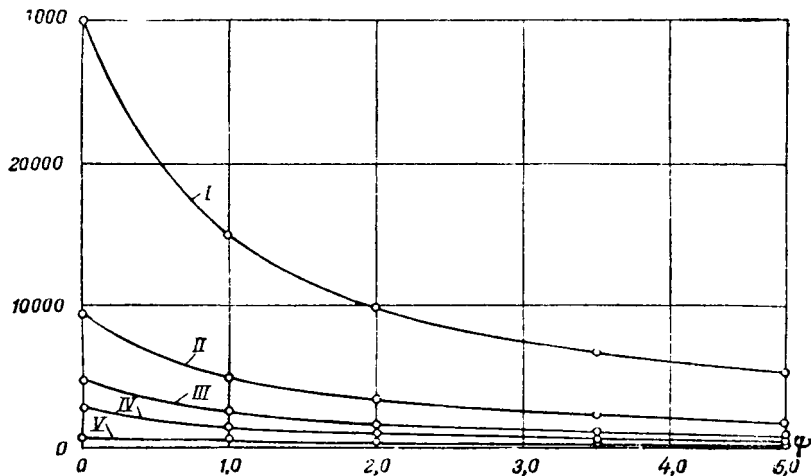


Рис. 6. Кривые зависимости тока короткого замыкания генератора от соотношения  $\psi$  при постоянном числе витков серийной обмотки.

I — при  $w_c = 0$ ; II — при  $w_c = 2,0$ ; III — при  $w_c = 5,0$ ; IV — при  $w_c = 10,0$ ; V — при  $w_c = 40,0$  ( $I_K = f(\psi)$  при  $w_c = \text{const}$ ,  $U_0 = 280$  В).

больших нагрузок. В связи с этим при расчетах берется величина  $\psi_{\text{расч.}}$  согласно равенству

$$\psi_{\text{расч.}} = (1 - 0,8) \psi_{\text{огр.}} \quad (12)$$

При таком значении  $\psi$  механическая характеристика обладает приблизительно эллиптической формой (например, характеристика V, рис. 5).

На рис. 6 и 7 построено по уравнению (12) семейство кривых  $I_K = f(\psi)$  при различных  $w_c$  и  $I_K = f_1(w_c)$  при различных  $\psi$ . Эти кривые характеризуют соответственно влияние величин  $\psi$  и  $w_c$  на ток короткого замыкания. Из анализа кривых следует:

1. Влияние  $\psi$ ,  $w_c$  на величину тока  $I_K$  различно. Наиболее сильно оно проявляется при малых значениях  $\psi$  и  $w_c$ . При больших значениях этих величин их влияние мало заметно.

2. Влияние  $w_c$  на величину  $I_K$  значительно сильнее, чем влияние  $\psi$ .

3. Возможно получение одной и той же величины тока  $I_K$  при различных значениях  $\psi$  и  $w_c$ . Изменение величины  $\psi$  при неизменных остальных параметрах сказывается как на величине максимального тока, так и на форме механической характеристики.

На рис. 8 представлено семейство механических характеристик двигателя в рассматриваемой системе Леонарда при  $\psi = \text{var}$  и  $w_c = \text{const}$ . Здесь показано, что при минимальных величинах  $\psi$  ток  $I_K$  имеет наибольшее значение и по мере увеличения доли шунтового возбуждения  $I_K$  падает. Из этого же рисунка видно, что большие значения  $\psi$  определяют крутоспадающий характер кривой  $n = f(t)$  в области значительных нагрузок, малые значения  $\psi$  — относительно пологость кривой в этой же области нагрузок.

Изменение числа витков серийной обмотки  $w_c$  при постоянных остальных параметрах оказывает сильное влияние на величину тока  $I_K$ ,

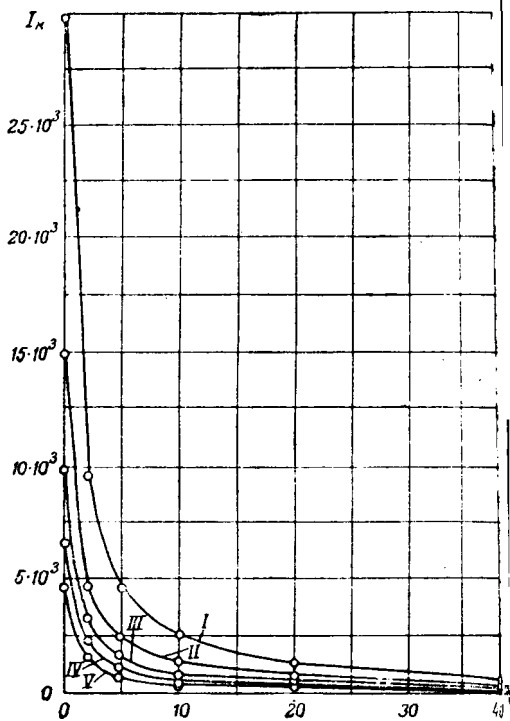


Рис. 7. Кривые зависимости тока короткого замыкания от числа витков серийной обмотки.

I — при  $\psi = 0$ ; II — при  $\psi = 1,0$ ; III — при  $\psi = 2,0$ ; IV — при  $\psi = 3,5$ ; V — при  $\psi = 5,12$  ( $I_K = f(w_c)$ ;  $\psi = \text{var}$ ,  $U_0 = 280$  В).

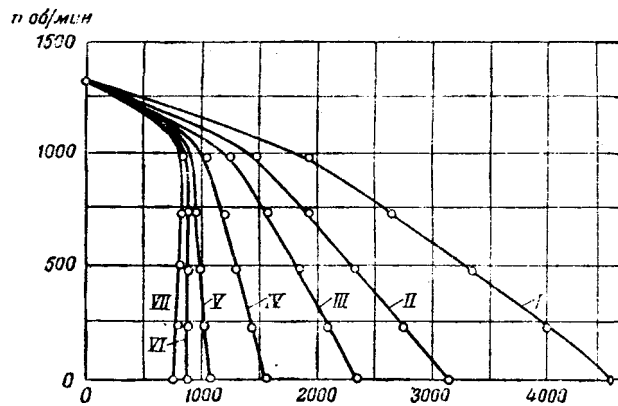


Рис. 8. Механические характеристики двигателя, питаемого по системе Леонарда, с тремя обмотками возбуждения генератора при различных значениях  $\psi$  и  $I_K$  и постоянном  $w_c = 5$ .

I — при  $\psi = 0$ ; II — при  $\psi = 0,5$ ; III — при  $\psi = 1,0$ ; IV — при  $\psi = 3,5$ ; V — при  $\psi = 3,5$ ; VI — при  $\psi = 4,35$ ; VII — при  $\psi = 5,12$ ; ( $U_0 = 1,2$  В,  $U_H = 280$  В,  $n_0 = 1750$  об/мин;  $\psi = \text{var}$ ,  $w_c = 5$  виткам).

однако конфигурация механической характеристики, как видно из рис. 9, при этом остается неизменной.

Коэффициент эффективности всех характеристик будет примерно одинаков. Наклон этих характеристик в области значительных нагрузок остается одним и тем же. Этот вывод означает, что при выбранном соотношении  $\psi$ , т. е. при уже определенной форме механической характеристики, возможно устанавливать заданное значение тока  $I_K$  выбором числа витков серийной обмотки  $w_c$ .

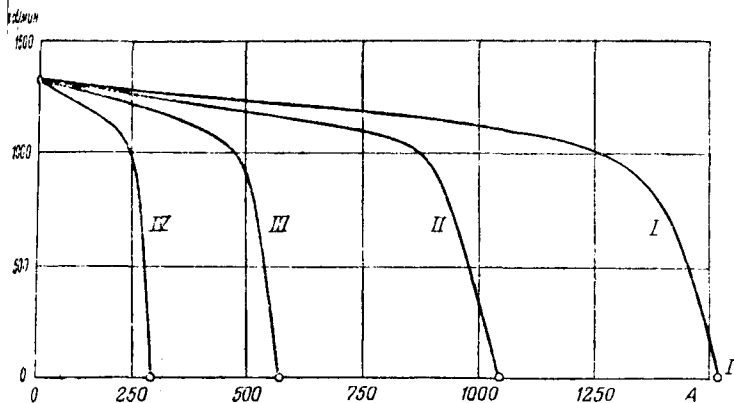


Рис. 9. Механическая характеристика двигателя, питаемого по системе Леонарда с тремя обмотками возбуждения генератора, при разных  $w_c$  и  $I_k$  и постоянном  $\psi = 3,5$ .

I — при  $w_c = 3$ ; II — при  $w_c = 5$ ; III — при  $w_c = 10$ ; IV — при  $w_c = 20$  ( $U_0 = 1,22 U_H = 280$  В;  $n_0 = 1320$  об/мин;  $w_c = \text{var}$ ,  $\psi = 3,5$ ).

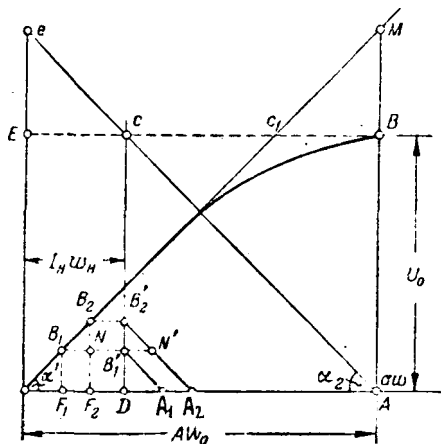


Рис. 10. Определение оптимального значения  $\psi$ .

**Выбор оптимальных параметров системы возбуждения генератора.** Крутоспадающая характеристика отличается равенством углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (рис. 10), т. е. прямая  $AC$  имеет тот же наклон к оси абсцисс, что и прямолинейный отрезок характеристики холостого хода генератора. Действительно, возьмем на характеристике холостого хода две точки  $B_1$  и  $B_2$ , соответствующие некоторым двум нагрузочным моментам двигателя, близким к максимальному. Эти точки будут находиться на прямолинейной части кривой насыщения. Из точек  $B_1$  и  $B_2$  проводим горизонталы до пересечения с прямой  $CD$ . Последняя по оси абсцисс определяет ампервитки независимого возбуждения  $I_H w_H$ , которым соответствует отрезок  $OD$ . Из точек  $B_1'$  и  $B_2'$  проводим прямые, параллельные  $AC$ . Тогда согласно изложенному выше отрезки  $F_1 A_1$  и  $F_2 A_2$  будут пропорциональны токам нагрузки. Если исходить из условия, что в зоне больших нагрузок механическая характеристика отвесна, т. е. токи в этом случае равны, то должны быть равны и отрезки  $F_1 A_1$  и  $F_2 A_2$ , пропорциональные этим токам. Тогда из рис. 10 имеем, что  $F_1 F_2 = A_1 A_2$ , но так как  $F_1 F_2 = B_1 N$ , а  $A_1 A_2 = N' B_1'$ , то  $B_1 N = N' B_1'$ , откуда  $\angle B_1 B_1' N = \angle B_2 B_2' N'$  или  $\alpha_1 = \alpha_2$ .

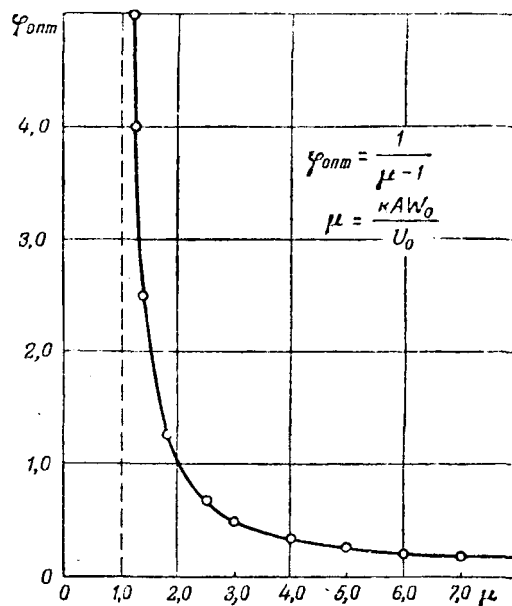


Рис. 11. Зависимость оптимального соотношения  $\psi_{opt}$  от степени насыщения генератора ( $\psi_{opt} = \frac{1}{\mu - 1}$ ;  $\mu = \frac{\beta A W_0}{U_0}$ ).

Таким образом, при равенстве углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  механическая характеристика двигателя отвесна при работе генератора на ненасыщенной части. Для такого случая соотношение ампервитков шунтового к ампервиткам независимого возбуждения, т. е.  $\psi$ , является оптимальной величиной.

При графическом определении этой величины проводится прямая  $AC$  под углом  $\alpha = \arctg \beta$  к оси абсцисс (рис. 10), которая пересекает прямую  $BE$  в точке  $C$ . При этом

$$\psi = \frac{CB}{CE} = \frac{I_{ш0} w_{ш}}{I_H w_H}.$$

Если продолжить прямолинейную часть характеристики холостого хода до пересечения с вертикалью  $AB$ , то из подобия  $\triangle MC'B$  и  $\triangle CBA$  будем иметь:

$$\frac{BC}{BC'} = \frac{AB}{MB}, \quad (13)$$

$$\text{где } \frac{BC}{BC'} = \psi; \quad BC' = CE; \quad \frac{AB}{MB} = \frac{U_0}{\beta A W_0 - U_0},$$

откуда

$$\psi_{opt} = \frac{1}{\mu - 1}, \quad (14)$$

где  $\mu = \frac{\beta A W_0}{U_0}$  — коэффициент учета насыщения генератора.

Из уравнения (14) следует, что оптимальное значение соотношения  $\psi$  не является величиной постоянной для данного генератора. При слабом насыщении генератора  $\psi_{opt}$  имеет большое значение, чем при сильном. Зависимость  $\psi_{opt}$  от коэффициента  $\mu$  графически выражается кривой, представленной на рис. 11.

Из рис. 11 видно, что с увеличением насыщения генератора значение  $\psi_{\text{опт}}$  снижается. Относительная величина ампервитков шунтового возбуждения уменьшается. Поэтому получение надлежащей формы механической характеристики при отсутствии шунтовой обмотки возбуждения генератора связано с необходимостью наличия весьма сильного магнитного насыщения генератора при одновременном повышении числа витков серийной обмотки  $w_c$  в целях поддержания постоянства величины тока короткого замыкания  $I_k$ . Выполнение такого рода условий вызывает значительные практические трудности.

При слабых насыщениях генератора оптимальное значение приближается к бесконечности. Это означает, что генератор работает при весьма малой доли независимого возбуждения, и магнитный поток создается преимущественно обмоткой шунтового возбуждения. В этом случае для поддержания заданного значения тока  $I_k$  ампервитки серийной обмотки должны действовать не встречно, а согласно с основным потоком генератора.

Выбор оптимальных параметров системы возбуждения генератора производится следующим порядком: по уравнению (14) определяется  $\psi_{\text{опт}}$ , а затем по уравнению (12) находится  $\psi_{\text{расч}}$ . Пользуясь расчетным уравнением (5), по заданной величине тока определяют число витков  $w_c$ .

В заключение считаем своим долгом отметить, что проф. Д. П. Морозовым были даны автору ценные указания по данной работе.

### Приложение 1

Ампервитки шунтовой обмотки зависят от э. д. с. генератора:

$$I_{ш} w_{ш} = \frac{E - I_c r_2}{r_{ш}} w_{ш}. \quad (15)$$

В этом уравнении не учитывается падение напряжения в якоре генератора от тока возбуждения шунтовой обмотки. Принимая во внимание равенство (15), напишем выражение для суммарных ампервитков генератора:

$$AW = I_k w_k + \frac{E - I_c r_2}{r_{ш}} w_{ш} - I_c w_c \quad (16)$$

или

$$AW = I_k w_k + E \frac{w_{ш}}{r_{ш}} - I_c w_c \left( 1 + \frac{r_2 w_{ш}}{r_{ш} w_c} \right). \quad (16a)$$

Для короткого замыкания генератора ампервитки определяются по уравнению (3). В этом режиме генератор работает на прямолинейной части характеристики ласого хода, поэтому будут справедливы равенства

$$E_k = \beta AW_k \quad (17)$$

и

$$E_k = I_k R_0. \quad (18)$$

Если учесть равенства (17) и (18), то уравнение примет вид:

$$\frac{I_k R_0}{\beta} = I_k w_k + I_k R_0 \frac{w_{ш}}{r_{ш}} - I_k w_c \left( 1 + \frac{r_2 w_{ш}}{r_{ш} w_c} \right), \quad (19)$$

откуда

$$I_k = \frac{I_k w_k}{\frac{R_0}{\beta} + w_c + \frac{r_2 w_{ш}}{r_{ш}} - R_0 \frac{w_{ш}}{r_{ш}}}.$$

Пользуясь равенствами  $I_k w_k = \frac{AW_0}{1+\phi}$ ;  $R_0 = r_2 + r_{ш}$

$U_0 = I_{ш0} r_{ш}$ , после несложных преобразований в уравнении (20) получим расчетные уравнения (4), (5) и (6).

### Приложение II.

Согласно равенствам, полученным из подобия треугольников  $CDA$  и  $C_1DA_1$  (рис. 3), и уравнения (7) имеем

$$A_1 F_1 = OD + DA_1 - OF_1 = I_k w_k + I_{ш0} w_{ш} \frac{E_1}{I_{ш0} r_{ш}} - OF_1. \quad (21)$$

Здесь отрезок  $OF_1$  соответствует суммарным ампервиткам генератора. В данном случае он равен:

$$OF_1 = AW_1 = I_k w_k + \frac{E_1 - I_{c1} r_2}{r_{ш}} w_{ш} - I_{c1} w_c. \quad (22)$$

Исключая из уравнения (21)  $OF_1$ , получим:

$$A_1 F_1 = I_{c1} \left( w_c + r_2 \frac{w_{ш}}{r_{ш}} \right). \quad (23)$$

Так как

$$\frac{w_{ш}}{r_{ш}} = \frac{I_{ш0} w_{ш}}{I_{ш0} r_{ш}} = \frac{I_k w_k}{U_0} = \frac{AW_0 \phi}{U_0 (1 + \phi)}, \quad (24)$$

то

$$A_1 F_1 = I_{c1} \left( w_c + r_2 \frac{AW_0}{U_0} \cdot \frac{\phi}{1 + \phi} \right).$$

### Литература

1. Борисов, Электрооборудование экскаватора ковшем 3 м<sup>3</sup>. Вестник электр. промышленности, № 7, 1938.
2. С. А. Пресс. Электрическое оборудование экскаваторов.



# Остановка и реверсирование гребных винтов при их электрическом приводе

Проф. В. Л. ЛЫЧКОВСКИЙ

Горьковский институт инженеров водного транспорта

Основной особенностью электрического привода судовых двигателей является механическая независимость главного двигателя, работающего на генератор электрической энергии, и двигателя, приводимого гребным электродвигателем. Независимость обоих основных звеньев гребной установки обусловлен ряд существенных отличий в реверсировании судна и его остановке по сравнению со случаем непосредственного соединения двигателей с главными судовыми машинами. Кроме того, электрический привод позволяет легко осуществить электрическое регулирование режима гребных винтов в отношении изменения их скорости и торможения, что также создает специфические условия и возможности для соответствующего воздействия на процесс остановки и реверсирования винтов, а вместе с ними и судна.

Уравнения движения гребного винта и судна при их остановке и реверсировании. Находящееся в движении судно вместе с его гребной установкой можно рассматривать, как систему с двумя массами, взаимно связанными силами, действующими между ними. При установившемся движении для гребной установки существует равновесие между вращающим моментом двигателя на гребном валу и тормозным моментом винта, а для корпуса судна — равновесие между развиваемым упорным давлением винта и полным сопротивлением судна.

Кинетическая энергия, запасенная в движущихся массах, расходуется при остановке на преодоление сопротивления судна при его дальнейшем движении вперед, а также на покрытие внутренних потерь на трение гребной установки. При этом связь между гребной установкой и судном представляет собой гидродинамические взаимодействия, осуществляемые работой винта. В качестве первого приближения при анализе рассматриваемого вопроса можно принять, что

Электрическому приводу гребных винтов присущи известные особенности, обусловленные гидродинамической связью винта с судном. Разобраны случаи торможения и реверсирования гребного электрического привода на постоянном токе по системе Вард-Леонарда и на переменном токе для асинхронных и синхронных двигателей. Приведены диаграммы электрического торможения и реверсирования гребных винтов и судов.

связь между обеими системами отсутствует.

Для гребной установки, если принять винт свободно вращающимся в воде (эффективное скольжение  $s=0$ ), уравнение движения может быть на-

писано в следующем виде:

$$M_R = -J \frac{d\omega}{dt},$$

где  $M_R$  — вращающий момент потерь;

$J$  — суммарный момент инерции гребной установки (двигатель — вал — винт).

В результате интегрирования и после подстановки начальных значений  $t=0$ ,  $\omega=\omega_0$  получаем, что время остановки гребного винта

$$t_m = \frac{J}{M_R} (\omega_0 - \omega). \quad (1)$$

Из принятого предположения об отсутствии связи между гребной установкой и судном следует, что остановка судна происходит только под влиянием его сопротивления  $W$  дальнейшему движению. С достаточной точностью можно принять:

$$W = cv^3,$$

где  $v$  — скорость судна в  $m/sec$ ,  
 $c$  — постоянная.

Тогда уравнение движения судна может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{W}{M} = -\frac{cv^3}{M}, \quad (2)$$

где  $M = \frac{D}{g}$  — масса судна;  $D$  — его водоизмещение ( $t$ );  $g = 9,8 \text{ m/sec}^2$ .

Интегрируем это уравнение. После подстановки начальных значений  $t=0$ ,  $v=v_0$  получаем, что время остановки судна

$$t_k = -\frac{M_c}{c} \left( \frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} \right). \quad (3)$$

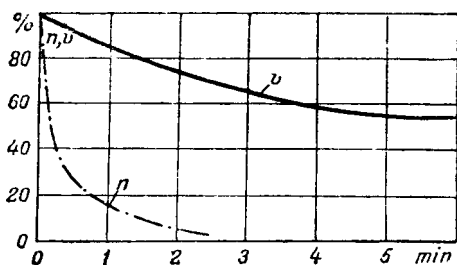


Рис. 1. Кривая падения скорости судна  $v_n$  и числа оборотов винта  $n$ .

Кривые падения скорости при раздельном рассмотрении процессов останковки судна и винта представлены на рис. 1. Из приведенных кривых рис. 1 видно, что продолжительности останковки обеих систем (гребной винт и судно) при отсутствии связи между ними весьма различны, и в течение короткого промежутка времени останковки винта скорость судна почти не понижается. Поэтому в дальнейшем можно принять, что процесс останковки винта происходит при постоянной скорости судна.

Процесс торможения гребной установки может быть разбит на следующие три стадии:

1) Число оборотов винта непосредственно после выключения гребного электродвигателя резко падает, и эффективное скольжение быстро уменьшается до нуля. При скольжении, равном нулю, полезная работа винта (работа толкания вперед) прекращается и на валу винта действует только тормозной момент его сопротивлений. Это происходит обычно при падении числа оборотов винта до 60% от начального.

2) Винт продолжает вращаться индифферентно — не толкает и не приводится сам. Скольжение меняет свой знак.

3) Винт приводится судном. Эффективное скольжение переходит в область отрицательных значений. Винт работает обратными поверхностями своих лопастей, как гидравлическая турбина. С повышением величины отрицательных скольжений будет увеличиваться момент, вращающий винт. Этот момент должен преодолеть момент холостого хода вращающегося в воде винта, а также сопротивление остальных элементов гребной установки.

На рис. 2 представлены кривые останковки судна с дизель—электрическим приводом движителей. Кривая I относится к случаю, когда гребной двигатель продолжает вращаться, будучи отключенным от генератора; кривые II и III — к случаю электрического торможения гребного двигателя с тормозными моментами  $M_T = 0,3 \times M_{ном}$  и  $M_T = M_{ном}$ .

Для более точного определения времени останковки гребного винта можно принять следующее выражение для тормозного момента на валу винта:

$$M_T = A\omega^2 - B\omega, \quad (4)$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения винта;

$A$  и  $B$  — постоянные, получающиеся из тех условий, что при нормальном числе оборотов винта  $n = n_{ном}$  тормозной момент на его валу  $M_T = M_{ном}$ , а при  $n = 0,6 \cdot n_{ном}$   $M = 0$  — винт перестает толкать судно.

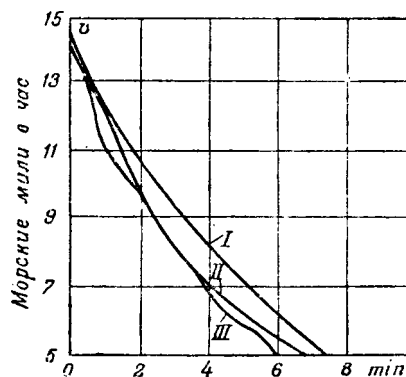


Рис. 2. Кривые останковки судна с дизель—электрическим приводом движителей.

С прекращением подачи энергии к гребному двигателю (команда „стоп“) живая сила гребной установки должна преодолеть указанный выше тормозной момент на валу винта, а также момент сил трения  $M_R$ , так что уравнение движения винта при его останковке может быть представлено в интегральной форме:

$$t = -J \int \frac{d\omega}{A\omega^2 - B\omega + M_R}. \quad (5)$$

Постоянная интегрирования определяется из условия  $t = 0, \omega = \omega_0$ .

$$\text{Обозначим } \alpha = M_R A - \frac{B^2}{4}.$$

1.  $\alpha > 0$ . В результате интегрирования получаем:

$$t = \frac{J}{\sqrt{\alpha}} \left[ \arctg \frac{A\omega_0 - \frac{B}{2}}{\sqrt{\alpha}} - \arctg \frac{A\omega - \frac{B}{2}}{\sqrt{\alpha}} \right]. \quad (6)$$

2.  $\alpha = 0$ :

$$t = J \left( \frac{1}{A\omega - \frac{B}{2}} - \frac{1}{A\omega_0 - \frac{B}{2}} \right). \quad (7)$$

3.  $\alpha < 0$ :

$$t = \frac{J}{2\sqrt{\alpha}} \ln \frac{\left( \sqrt{\alpha} + \frac{B}{2} - A\omega_0 \right) \left( \sqrt{\alpha} - \frac{B}{2} + A\omega \right)}{\left( \sqrt{\alpha} - \frac{B}{2} + A\omega_0 \right) \left( \sqrt{\alpha} + \frac{B}{2} - A\omega \right)}. \quad (8)$$

Переходим к рассмотрению третьей стадии процесса останковки гребного винта, когда его эффективное скольжение  $s < 0$  и винт, вращаемый водяным потоком, работает, как водяная турбина. В этой стадии все взаимодействия между корпусом судна и винтом становятся значительно более сложными по следующим причинам: 1) при переходе упорных давлений воды с передних на задние поверхности винтовых лопастей получается временная неустойчивость режима; 2) в области повышенных отрицательных скольжений винта происходит развитие сильных вихрей на лопастных краях, что полностью меняет закон работы винта; 3) в этой стадии уже заметно сказывается падение скорости судна, что приводит к необходимости оба процесса останковки движителя и судна рассматривать совместно.

Система уравнений, определяющих движение судна и гребных винтов при их останковке и реверсировании, в самом общем виде может быть представлена следующим образом:

$$M \frac{dv}{dt} = T - W \quad \text{и} \quad J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_R$$

где  $T$  — упор движителя.

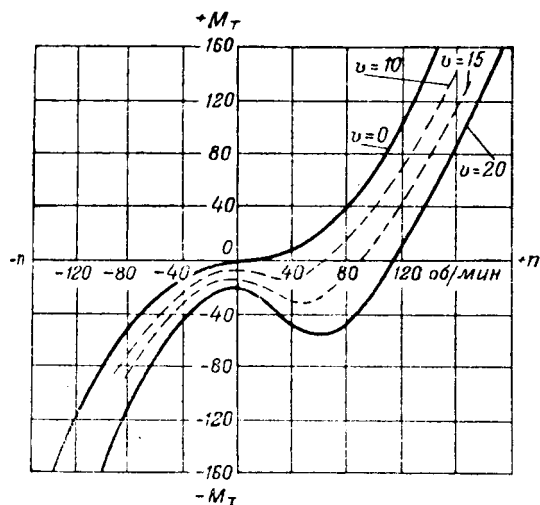


Рис. 3. Тормозной момент гребного винта в зависимости от его числа оборотов при различных скоростях судна  $v$  (в узлах).

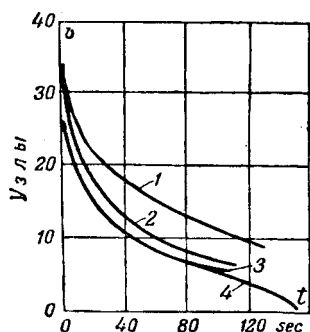


Рис. 4. Кривые остановки судна.

Кривая 1 — со свободно вращающимся винтом; 2 — с наглухо торможеным винтом; 3 — с винтом, вращающимся вперед при числе оборотов  $n = 25\%$  от  $n_{ном}$ ; 4 — с винтом, вращающимся назад при числе оборотов  $n = -20\%$  от  $n_{ном}$ .

Примем:

$$W = cv^3, \quad T = \varphi(v, \omega), \quad M_T = f(v, \omega).$$

Тогда предыдущая система уравнений примет вид:

$$M \frac{dv}{dt} = \varphi(v, \omega) - cv^3, \quad (9)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = f(v, \omega) - M_R. \quad (10)$$

Система может быть решена относительно  $t$  лишь в том случае, если известны функциональные зависимости  $T = \varphi(v, \omega)$  и  $M_T = f(v, \omega)$ . Но эти зависимости определяются целым рядом факторов (форма и число оборотов винтов, обводы корпуса судна и т. п.), трудно учитываемых математически, поэтому они могут быть получены только графически в виде кривых, снятых в результате ряда испытаний.

На рис. 3 представлены известные в литературе кривые изменения тормозного момента гребного винта в зависимости от его числа оборотов при различных скоростях судна.

Приведенные кривые показывают, что при уменьшении скорости винта тормозной момент на его валу снижается и при скорости винта, равной 60—65% нормальной, становится равным нулю, что полностью соответствует приведенным ранее данным. При дальнейшем уменьшении числа оборотов тормозной момент на

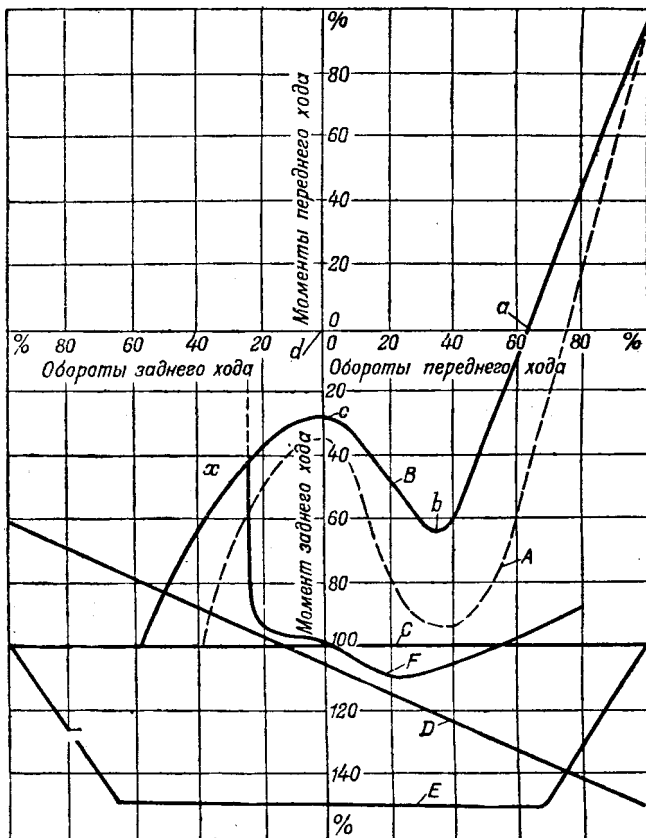


Рис. 5. Характеристики тормозных и вращающих моментов при торможении и реверсе гребного винта.

валу винта переходит в область отрицательных значений (третья стадия процесса остановки — винт приводится водяным потоком и работает в качестве гидравлической турбины).

Из приведенных кривых видно, что отрицательный момент на валу винта при числе оборотов  $n=20-40\%$  имеет определенно выраженный максимум, достигающий величины (0,5—1,2) от  $M_{ном}$ . Величина этого максимума зависит от различных факторов — скорости судна, обводов его и т. п. При приближении к точке  $n=0$ , когда винт меняет направление своего вращения, величина тормозного момента на его валу опять несколько падает, что может быть объяснено исчезновением водяного потока, создаваемого винтом.

В результате испытаний, описанных в литературе, получены интересные кривые падения скорости судна при его остановке с полного хода в 35 узлов и при различных состояниях винта (рис. 4). Кривые сняты при испытаниях на модели и пересчитаны по параметрам судна. По этим кривым можно установить, что для остановки судна наиболее пригодным из перечисленных является метод с медленно вращающимся вперед винтом, развивающим при этом максимальные значения момента и упора.

На рис. 5 представлены характеристики тормозного момента  $M_T$  винта и вращающего момента первичных двигателей при торможении и реверсе, причем все величины приведенных кри-

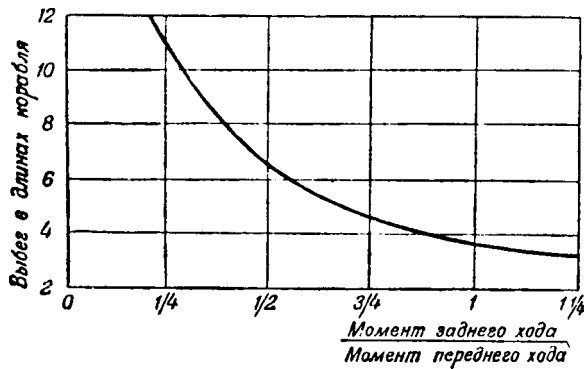


Рис. 6. Кривая выбега в длинах корабля.

вых взяты в процентах от значений, соответствующих полному переднему ходу.

Кривая *A* представляет собой теоретическую характеристику тормозного момента винта для случая движения судна полным ходом вперед, построенную по модельным испытаниям; *B* — аналогичную действительную характеристику тормозного момента с учетом снижения скорости судна.

Кривые *C*, *D*, *E*, *F* изображают зависимости между вращающимися моментами и числами оборотов для различных видов судовых двигателей. Кривая *C* дает характеристику паровой поршневой машины и построена при условии постоянства наполнения и полного давления пара при отсечке. Эта же кривая может быть рассматриваема, как характеристика реверсивного двигателя Дизеля при наличии легких условий реверса и подачи воздуха; *D* — относится к паровой турбине, имеющей двойную зубчатую передачу к гребному винту. Кривая построена для полного впуска пара на передний ход в начале маневра; *E* — является характеристикой дизельэлектрической гребной установки постоянного тока, построенной для тока, равного 150%  $I_{ном}$ . Кривая может представлять собой также характеристику турбо-электрической установки на постоянном токе; кривая *F* представляет характеристику турбо-электрической установки с синхронным двигателем переменного тока. Расход пара значительно изменяется во время процесса реверсирования, снижаясь до нуля к моменту остановки винта и опять повышаясь после реверсирования его до величины, достаточной для придания ускорения всем вращающимся массам, от турбины до винта. Эта кривая представляет собой характеристику также и дизельэлектрической установки переменного тока.

Из рассмотрения приведенных кривых видно, что все судовые двигатели имеют характеристики вращающихся моментов, вполне достаточные для преодоления развиваемого гребным винтом тормозного момента. Площадь *abcd* представляет энергию гребного винта, которая поглощается в системе. Площадь между частью *abc*, кривой *B* и кривыми моментов различных судовых двигателей представляет энергию, имеющуюся в распоряжении для преодоления инерции силовой установки.

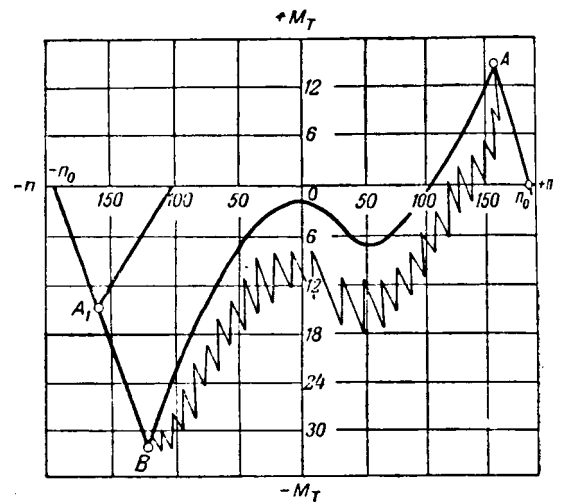


Рис. 7. Диаграмма реверсирования гребного электродвигателя постоянного тока.

Небольшая инерция электродвигателя постоянного тока в электрических гребных установках дает очень хорошие характеристики вращающихся моментов для движения в обоих направлениях. Интересно отметить, что в отдельных случаях необходимо применить магнитный тормоз для замедления действия реверсирующего механизма и уменьшения потерь гребного винта.

Кривая *F* турбоэлектрической установки показывает, что система с синхронным двигателем переменного тока имеет вполне благоприятную характеристику для маневрирования. Гребной электродвигатель синхронизируется в точке (рис. 5) пересечения кривой вращающихся моментов электродвигателя с кривой тормозных моментов винта. Далее, число оборотов винта повышается за счет увеличения числа оборотов турбогенератора, питающего гребной электродвигатель.

На рис. 6 приведена кривая, дающая относительную длину выбега корабля в функции вращающегося момента заднего хода, способного остановить судно. Из кривой видно, что отношение вращающегося момента заднего хода к моменту переднего хода не должно быть больше единицы. Этот вращающийся момент должен быть развит при небольшом числе оборотов заднего хода, порядка 25%.

Переходим к рассмотрению остановки и реверсирования гребных винтов при электрическом приводе на постоянном и переменном токе. Рассматриваются наиболее распространенные гребные установки — на постоянном токе по системе Вард-Леонарда и на переменном токе с применением синхронных и асинхронных двигателей трехфазного тока.

Электрический привод гребных винтов на постоянном токе по системе Вард-Леонарда. На рис. 7 представлена диаграмма реверсирования гребного электродвигателя постоянного тока управляемого по системе Вард-Леонарда. Неступенчатой кривой *AB* каждой ступени соответ-

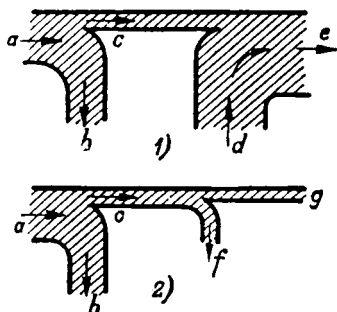


Рис. 8. Диаграмма мощностей при торможении гребного электродвигателя.

1 — противовключением, 2 — по способу динамического торможения

тует изменение силы тока на  $\Delta I_a = 0,5 \cdot I_{a \text{ ном}}$  момента на  $\Delta M = 0,5 \cdot M_k$ .

Точка В диаграммы (рис. 7) получена при пересечении кривой тормозных моментов на валу винта с автоматической характеристикой гребного электродвигателя на обратном ходе: —  $n_0 A_1$ . Фактически процесс реверсирования винта благодаря снижению его аксиальной скорости будет происходить быстрее, чем на диаграмме. В точке В процесс реверсирования гребного винта можно считать законченным. Гребной двигатель переходит на автоматическую характеристику  $A_1 B$  и, увеличивая свою скорость, доходит до рабочей точки на обратном ходе  $A_1$ , для которой  $M_g = M_c$ .

При управлении гребными электродвигателями на постоянном токе по системе Вард-Леонарда реверсирование гребных винтов совершается без всяких затруднений при воздействии только на электрическую часть установки путем изменения по величине и знаку напряжения на обмотках электродвигателей.

Величина вращающего момента, необходимого для получения быстрого торможения и реверсирования, ограничена при этом только условиями механической и электрической прочности машин гребного привода.

Электрический привод гребных винтов на переменном токе. Основными двигателями, применяемыми в гребных электрических приводах переменного тока, являются синхронные и асинхронные двигатели трехфазного тока. Электрическое торможение тех и других двигателей осуществляется по следующим двум способам:

- 1) торможение противовключением; способ заключается в том, что на ходу двигателя меняется направление вращения магнитного поля статора;
- 2) динамическое торможение; в этом случае машина (в асинхронном двигателе — статор, в синхронном — ротор) возбуждается постоянным током. Роторная обмотка в асинхронном двигателе и статорная — в синхронном работают, как генераторы переменной частоты.

При указанных способах электрического торможения возможны его форсировки увеличением активного сопротивления роторной цепи или уменьшением электрохимической постоянной времени

$$T = \frac{J \omega_c}{M_k},$$

где  $J$  — момент инерции всех движущихся масс привода;  $\omega_c$  — угловая скорость магнитного поля;  $M_k$  — опрокидывающий момент двигателя.

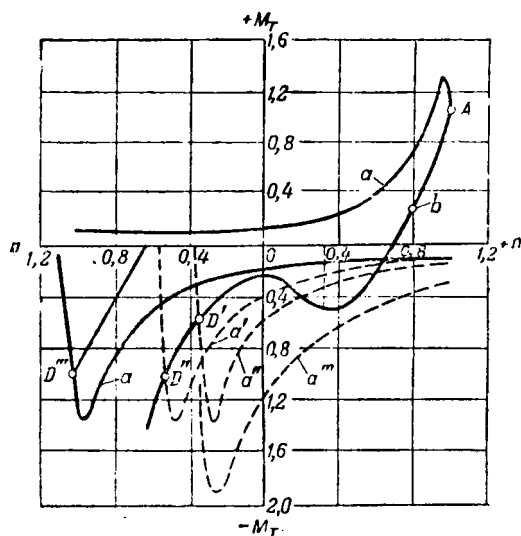


Рис. 9. Реверсирование гребного привода с асинхронным двигателем по методу противовключения.

Это уменьшение достигается при противовключении за счет повышения напряжения, а при динамическом торможении — за счет увеличения силы постоянного тока.

Потери энергии при торможении противовключением значительно больше, чем при динамическом. Это объясняется тем, что процесс торможения при противовключении производится в двигателе, присоединенном к сети, за счет внешней энергии, расходуемой двигателем на торможение. С другой стороны, динамическое торможение происходит только за счет того количества энергии, которое было запасено в двигателе в момент его отключения от сети в виде живой силы всех продолжающих вращаться частей привода.

На рис. 8 представлена диаграмма подводимых и расходуемых мощностей при обоих способах торможения гребного привода с асинхронными электродвигателями переменного тока. При построении диаграммы взят случай, когда судно продолжает идти вперед со своей полной скоростью, а винт вращается также вперед с числом оборотов 25% от  $n_{\text{ном}}$ . На диаграмме (рис. 8) представлены следующие подводимые и расходуемые мощности:  $a$  — мощность, передаваемая судном винту;  $b$  — потеряемая винтом, работающим в качестве водяной турбины;  $c$  — передаваемая винтом гребному электродвигателю;  $d$  — добавочная мощность, доставляемая электрическим генератором электродвигателю при торможении противовключением;  $e$  — полная мощность торможения, переходящая в тепло в двигателе при торможении противовключением;  $f$  — переходящая в тепло в реостате при динамическом торможении;  $g$  — мощность, переходящая в тепло в электродвигателе при динамическом торможении.

В соответствии с приведенными выше способами электрического торможения асинхронных и синхронных двигателей рассмотрим следующие два способа реверсирования гребного электрического привода на переменном токе.

Реверсирование противовключением гребного электродвигателя по существу представляет собой рассмотренное выше торможение двигателя противовключением, причем после доведения скорости двигателя до нуля отрицательный момент на валу разгоняет двигатель в обратном направлении. Реверсирование по этому методу не требует никаких дополнительных изменений в электрической схеме двигателя, кроме указанного выше противовключения в начале торможения.

Для выяснения условий, в которых происходит реверсирование гребного привода с асинхронным двигателем переменного тока при применении метода противовключения, на рис. 9 сопоставлены кривая  $b$  тормозных моментов гребного винта и механические характеристики  $a$  двигателя для прямого и обратного хода.

Для получения установившегося режима двигателя на обратном ходе необходимо, чтобы кривые  $a$  и  $b$  пересека-

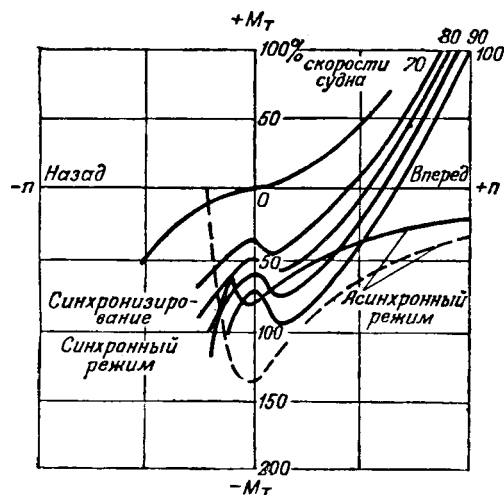


Рис. 10. Реверсирование синхронного гребного двигателя.

лись друг с другом и точка их пересечения находилась в зоне устойчивой работы двигателя.

Мерами для увеличения максимального момента асинхронного двигателя и его опрокидывающего скольжения могут служить: 1) включение активного сопротивления в цепь ротора (кривые  $a'$  и  $a''$ ); 2) повышение напряжения  $U_1$ , питающего статор (кривая  $a'''$ ); 3) понижение частоты  $f_1$  тока в цепи статора (кривая, аналогичная  $a'''$ ); 4) понижение частоты статорного тока  $f_1$  с одновременным и соответственным понижением напряжения  $U_1$  (кривые, аналогичные  $a'$  и  $a''$ ).

Включение активного сопротивления в цепь ротора повышает вращающий момент двигателя, преодолевающий тормозной момент винта (на рис. 9 точка  $D'$  перемещается в точку  $D''$ ). Увеличение опрокидывающего скольжения  $S_k$  путем включения в роторную цепь активного сопротивления неудобно в том отношении, что требует больших реостатов, громоздких по весу и габаритным размерам и дорогих. Увеличение  $S_k$  удобнее осуществить понижением частоты статорного тока  $f_1$  с одновременным понижением напряжения  $U_1$ .

Таким образом, процесс реверсирования гребного винта по методу противовключения двигателя осуществляется в следующем порядке: 1) понижается частота  $f_1$  статорного тока; 2) производится реверсирование вращающегося магнитного поля статора путем переключения двух фаз его обмотки; 3) повышается напряжение  $U_1$  на зажимах статора; 4) повышается  $f_1$  и понижается  $U_1$  с доведением их до нормальных величин.

В действительности, во время реверсирования гребного винта поступательная скорость судна не остается постоянной и кривая тормозных моментов винта ( $b$ , рис. 9) сдвинется влево, а рабочей точкой установившегося режима двигателя после реверсирования явится точка  $D''$ , симметричная точке  $A$  хода вперед.

Основным недостатком реверсирования по методу противовключения, как выше было указано, являются большие потери на нагревание двигателя при его торможении. Эти потери, с одной стороны, являются отрицательным экономическим фактором, понижающим к. п. д. гребного электрического привода, а с другой, — ограничивают число реверсирований в единицу времени, так как быстро следующие друг за другом реверсирования могут дать недопустимый нагрев гребного электродвигателя. Реверсирование противовключением не требует особых начальных затрат и не связано с необходимостью в источнике постоянного тока.

На рис. 10 показано реверсирование синхронного гребного двигателя по методу противовключения. Во избежание чрезмерного перегрева электродвигателя при его торможении противовключением оно производится при пониженном напряжении. После достижения обратного

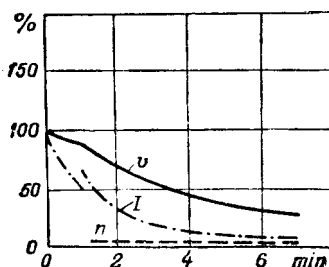


Рис. 11. Дизельэлектроход. Реверсирование с динамическим торможением гребного электродвигателя.  $v$  — скорость судна;  $n$  — число оборотов двигателя;  $t$  —

хода двигатель переводится на возбуждение постоянным током (синхронизирование) и на нормальный синхронный режим.

Реверсирование гребного электродвигателя с применением динамического торможения. Основным преимуществом реверсирования с динамическим торможением являются значительно меньшие тепловые потери, ограничивающиеся только собственным запасом живой силы тормозных масс без всякой затраты электрической энергии в сети, как это имеет место при реверсировании противовключением. Кроме того, тепло торможения не остается в электродвигателе, а выделяется, главным образом, в особом тормозном сопротивлении, откуда его легче отвести охлаждением. Начальная стоимость и вес такого сопротивления, включая и его искусственное охлаждение, невелики. Благодаря указанным преимуществам частота реверсирований гребного электродвигателя с динамическим торможением практически не ограничена и число реверсирований в единицу времени может быть произвольно велико без опасности перегрева электродвигателя.

При реверсировании с динамическим торможением необходимо наличие аппаратуры, автоматически переключающей обмотку двигателя с трехфазного тока на постоянный в начале реверсирования и обратно в тот момент, когда скорость двигателя падает до нуля.

На построенных судах с электрическими гребными установками переменного тока практически применялись оба метода реверсирования гребных электродвигателей: противовключением и с динамическим торможением. В некоторых турбоэлектроходах, построенных в 1935 г., применено реверсирование по методу противовключения. Объясняется это тем, что указанные суда имеют гребную установку, совершенно независимую от остальной силовой сети, питающей вспомогательные механизмы. Поэтому толчки тока при противовключениях гребных электродвигателей не отражаются на работе остальных судовых механизмов и электрического освещения судна. Суда полагали в эксплуатации хорошие маневренные качества. С другой стороны, на крупном дизельэлектроходе судне постройки 1937 г. применены оба метода реверсирования. Судно имеет 6 дизель-генераторных агрегатов трехфазного тока, питающих оба гребных электродвигателя двухвальтовой установки и электрические приводы остальных судовых механизмов. При реверсировании методом противовключения гребных электродвигателей каждый питается двумя генераторами, а третий генератор каждого борта выделяется для питания вспомогательных судовых механизмов. Благодаря этому при реверсировании не используются 33% установленной мощности электрических генераторов, что сильно ослабляет реверсирующие моменты. Поэтому, кроме торможения противовключением, установлены еще и реостаты для электродинамического торможения. Характеристики этого способа торможения гребных электродвигателей представлены на рис. 11.

Вначале, в течение одной минуты происходит синхронное торможение, являющееся результатом прекращения подачи горючего дизель-электрическому агрегату. Только после этого гребной двигатель включается на торможение сопротивлением и подвергается динамическому торможению. При опытах с динамическим торможением на ди-

На электроходе получились значительные толчки кормовой части судна, которые затем были ослаблены loweringом возбуждения гребных электродвигателей. Поэтому в качестве основного метода торможения гребных двигателей при реверсировании принято торможение противовключением.

На некоторых турбоэлектроходах применено реверсирование с торможением противовключением. На их ходовых испытаниях в 1940 г. были получены следующие результаты:

1. Работает один генератор и оба гребных электродвигателя. Реверсирование производилось после длительного хода со скоростью 16 узлов.

Характер реверсирования	Скорость судна перед реверсированием, узлы	Время реверсирования двигателя, сек	Время загрузки гребного электродвигателя после реверсирования, мин
С переднего на задний ход	15,5	85	3
С заднего на передний ход	5,5	17	2
С переднего на задний ход	13,6	55	2
С заднего на передний ход	4,0	33	1,75
С переднего на задний ход	10,6	35	—

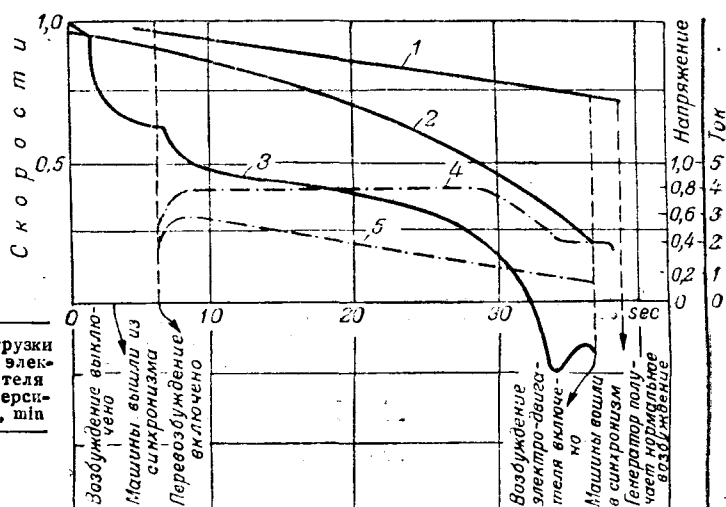


Рис. 12. Турбоэлектроход. Реверсирование противовключением.

1 — скорость судна; 2 — скорость турбины; 3 — скорость винта; 4 — ток; 5 — напряжение.

Все параметры взяты в частях от нормальных величин. Реверсирование (последний столбец таблиц) определяет собой продолжительность реверсирования судна. В конце этого промежутка времени гребные электродвигатели получают свою нормальную нагрузку.

Кривые изменения основных параметров реверсирования турбоэлектрохода приведены на рис. 12.

2. Работают два генератора, каждый на свой гребной электродвигатель. Реверсирование производилось после длительного хода со скоростью 20 узлов.

После 5 реверсирований, произведенных непосредственно одно за другим в течение получаса, температура обмоток гребных электродвигателей повысилась на 45° С.

После 5 реверсирований, произведенных непосредственно одно за другим в течение получаса, температура обмоток гребных электродвигателей составила: левого — 63° С, правого — 65° С.

Время загрузки гребных электродвигателей после ре-

Характер реверсирования	Скорость судна перед реверсированием, узлы	Время реверсирования гребных двигателей, сек		Время загрузки гребных двигателей после реверсирования	
		левый	правый	левый	правый
С переднего хода на задний . . .	20	54	49	1 min 45 sec	2 min
С заднего на передний ход . . .	Малый задний ход	30	26	1 min 30 sec	2 min 30 sec
С переднего на задний ход . . .	20	49	49	2 min	2 min
С заднего на передний ход . . .	Малый задний ход	23	19	1 min 30 sec	1 min 30 sec
С переднего на задний ход . . .	16,5	33	31	2 min	2 min

### Литература

- В. И. Полонский. Электродвижение судов. 1929.
- В. Л. Лычковский. Электромоторный привод гребного винта и его основные параметры. Труды Горьковского института инженеров водного транспорта, т. 2, 1935.
- И. Фрейдзон. Электрическое оборудование гребной установки турбоэлектроходов „Иосиф Сталин“ и

„Вячеслав Молотов“. Электричество, № 3, 1946.

4. W. Thau. Propellers and Propelling Machinery. Maneuvring Characteristics during Stopping and Reversing. The Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions. т. 45. 1937.

5. G. Mitzlaff. Neues vom elektrischen Schiffs-Antriebs. Das Umsteuern. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft. 1939.



## Электрический привод для регулирования скорости мощных вентиляторов

Кандидат техн. наук, доц. А. С. САНДЛЕР

Московский энергетический институт им. Молотова

К приводу мощных вентиляторов, насосов и воздуходувок часто предъявляются требования, связанные с плавным регулированием скорости при сравнительно большом диапазоне регулирования. Иногда также требуется и обеспечение соответствующей точности регулирования скорости. Из известных систем электрического привода, удовлетворяющих указанным требованиям и получивших практическое применение, являются система Леонарда и модифицированный каскад Кремера для сверхмощных вентиляторов аэродинамических труб. Недостатком этих систем являются их сложность и потребность в мощных машинах постоянного тока, изготовление которых связано с большими конструктивными трудностями. Кроме того, система с модифицированным каскадом Кремера склонна к колебаниям при изменении параметров регулирования.

Для регулирования скорости приводов, обладающих вентиляторным моментом ( $M_{\text{вент}} \propto \omega^2$ ) может быть использована следующая простая система электропривода.

Два одинаковых асинхронных двигателя с контактными кольцами механически жестко связаны на одном валу (рис. 1). Статорные обмотки двигателя присоединены к сети переменного трехфазного тока с постоянным напряжением, роторные цепи двигателей соединены последовательно через постоянно включенное сопротивление.

Статор одного из двигателей, например II, является поворотным. При перемещении статора из нулевого положения на угол  $\theta$  возникает разность э. д. с., под влиянием которой в роторной цепи протекает ток<sup>1</sup>. При вы-

<sup>1</sup> Очевидно, аналогичный результат может быть достигнут при использовании короткозамкнутого двигателя с одним ротором повышенного сопротивления без промежуточного замыкающего кольца и двух статоров, один из которых поворачивается. При этом отпадает необходимость в контактных кольцах, потеря энергии в этом случае выделяется в обмотке ротора.

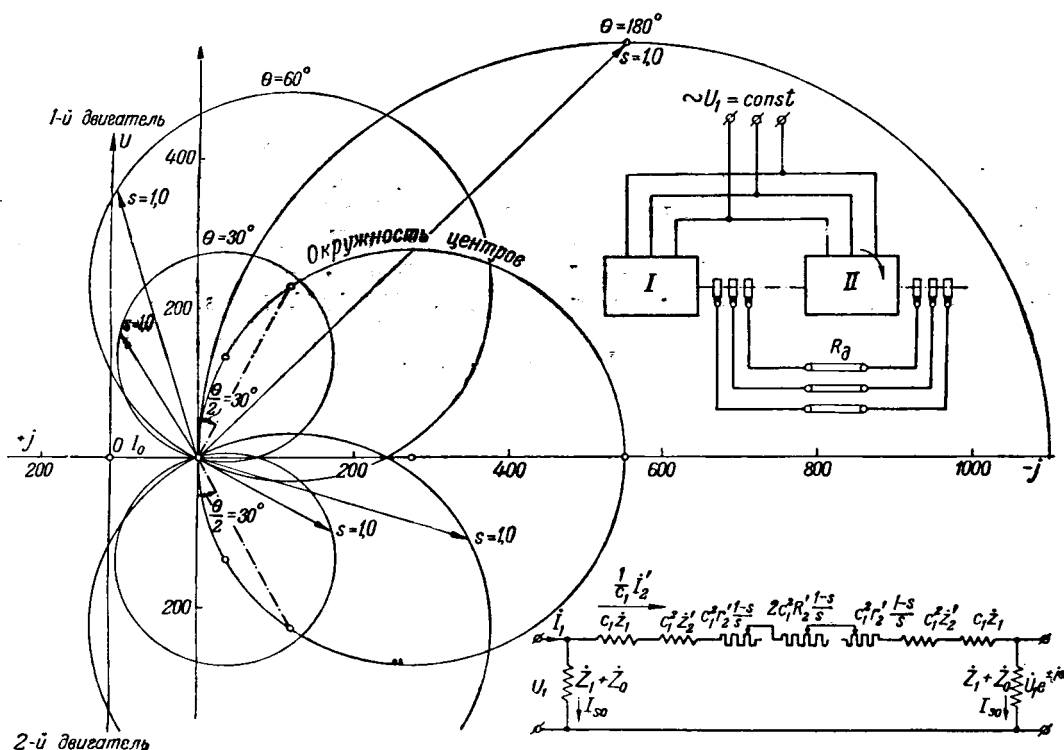


Рис. 1.

действии вторичного тока с магнитным потоком создается вращающий момент. Воспользовавшись схемой замещения, приведенной на рис. 1, можно определить вы-

ражение для вторичного тока первой и второй машины при повороте статора одной машины относительно другой на угол  $\theta$ :

$$i_{II} = \frac{U_1}{2} \frac{\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2 + R'_2}{s}\right) (1 - \cos \theta) + (x_1 + c_1 x'_2) \sin \theta - j \left[ (x_1 + c_1 x'_2) (1 - \cos \theta) - \left(r_1 + c_1 \frac{r'_2 + R'_2}{s}\right) \sin \theta \right]}{\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2 + R'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2}, \quad (1)$$

$$i_{III} = \frac{U_1}{2} \frac{\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2 + R'_2}{s}\right) (1 - \cos \theta) - (x_1 + c_1 x'_2) \sin \theta - j \left[ (x_1 + x'_2 c_1) (1 - \cos \theta) + \left(r_1 + c_1 \frac{r'_2 + R'_2}{s}\right) \sin \theta \right]}{\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2 + R'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2}. \quad (2)$$

Геометрические места вторичных токов для обоих двигателей в функции скольжения при различных углах  $\theta$  приведены на рис. 1.

Вращающий момент, развиваемый, например, двигателем I, определен по формуле:

$$M_1 = M_{ad} \frac{1 - \cos \theta + \frac{x_1 + c_1 x'_2}{r_1 + c_1 \frac{r'_2 + R'_2}{s}} \sin \theta}{2}. \quad (3)$$

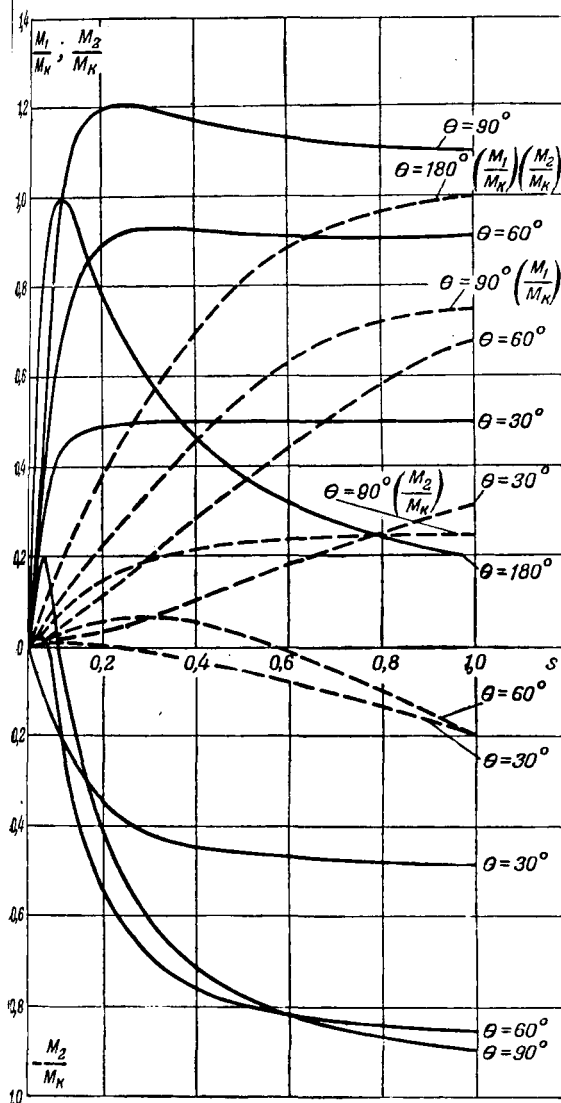


Рис. 2. Механические характеристики двигателей  $M_1$  и  $M_2$  в функции скольжения при  $s_K = 0,1$  и  $1,0$  и различных значениях угла  $\theta$ .

Суммарный или результирующий момент

$$M = M_1 + M_2 = M_{ad} (1 - \cos \theta), \quad (4)$$

где  $M_{ad}$  — вращающий момент асинхронного двигателя в нормальной схеме.

Если пренебречь активным сопротивлением первичной цепи двигателей, положить  $r_1 = 0$  и принять  $c_1 = 1$  и, кроме того, считать  $s_K \approx \frac{r'_2 + R'_2}{x_1 + x'_2}$ , то можно получить

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}} (1 - \cos \theta). \quad (5)$$

Соответственно, уравнение для вращающего момента, например двигателя I,

$$M_1 = \frac{M_K}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K}} \left[ (1 - \cos \theta) + \frac{s}{s_K} \sin \theta \right]. \quad (6)$$

Анализ приведенных соотношений показывает, что при угле сдвига  $\theta = 0$  суммарный момент агрегата и моменты отдельных двигателей равны нулю. При угле сдвига  $\theta = 180^\circ$  моменты, развиваемые каждым двигателем, равны и для  $s = s_K$  они равны максимальному моменту в нормальной схеме асинхронного двигателя. При этих условиях, как видно из соотношения (5), общий момент агрегата равен сумме моментов обоих двигателей. Так как двигатели в этом случае работают в двигательном режиме, то оба они могут быть использованы полностью.

Уравнительный момент системы

$$M_{yp} = M_1 - M_2 = M_{ad} \frac{x_1 + c_1 x'_2}{r_1 + c_1 \frac{r'_2 + R'_2}{s}} \sin \theta. \quad (7)$$

При пренебрежении активным сопротивлением статорной цепи получим:

$$M_{yp} = \frac{2M_K}{1 + \left(\frac{s_K}{s}\right)^2} \sin \theta. \quad (8)$$

Очевидно из (8), что уравнительный момент имеет максимальное значение при угле рассогласования  $\theta = 90^\circ$ .

Кроме того, при данном угле рассогласования уравнительный момент имеет наибольшее значение в двигательном режиме при  $s = 1,0$ . При угле рассогласования  $\theta = 180^\circ$  уравнительный момент равен нулю; в этом случае оба двигателя работают (при любом значении скольжения) в двигательном режиме, развивая одинаковые моменты.

Механические характеристики для отдельных двигателей в относительных величинах (по отношению к максимальному моменту двигателя в нормальной схеме  $M_K$ )

$\frac{M_1}{M_K}$  и  $\frac{M_2}{M_K}$  в функции скольжения при различных значениях критического скольжения  $s_K$  и разных величинах угла сдвига статора  $\theta$  приведены на рис. 2. Для тех же значений  $s_K$  и соответствующих величин угла  $\theta$  на рис. 3 при-

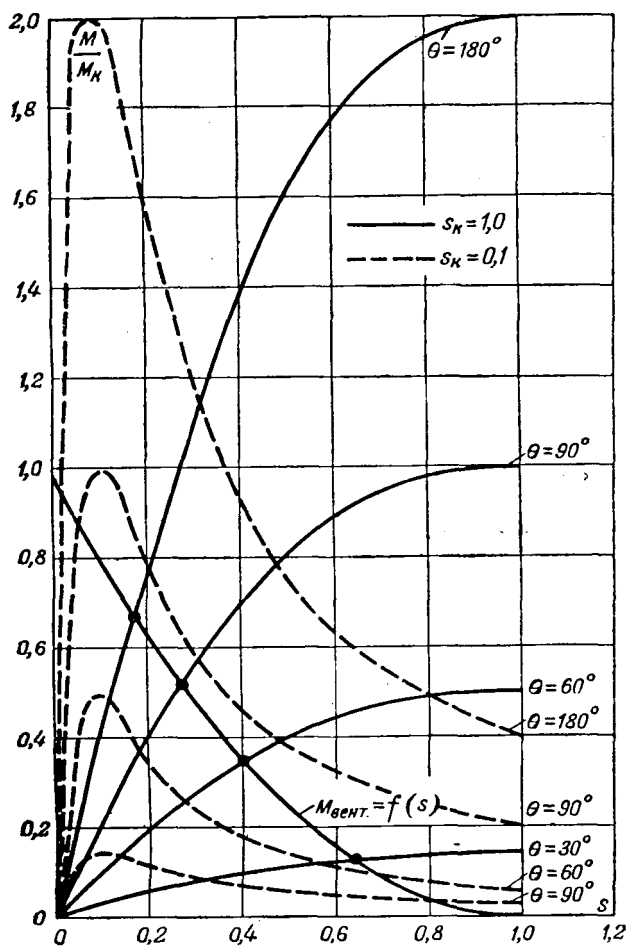


Рис. 3. Механические характеристики агрегата  $\frac{M}{M_k} = f(s)$  при различных значениях угла  $\theta$  и  $s_k = 1,0$  и  $s_k = 0,1$ .

ведены результирующие механические характеристики агрегата. Полученные соотношения для моментов отдельных двигателей совершенно аналогичны тем, какие имеют место в схеме "электрического вала" для вспомогательных синхронизирующих асинхронных машин.

Приводимая здесь схема, имеющая жесткую механическую связь роторов, принципиально отличается от схемы синхронного вращения двигателей, но между ними может быть проведена известная аналогия. Причиной создания угла рассогласования между векторами вторичной э. д. с. в схеме электрического вала является изменение нагрузки на рабочих валах приводных двигателей, в рассматриваемой же схеме для покрытия момента нагрузки необходимо предварительно статор одного из двигателей повернуть на соответствующий угол.

Так как в приводимой схеме обе машины всегда работают с одной и той же скоростью, а установившийся угол рассогласования обуславливает протекание тока во вторичной цепи, то здесь и уместно провести аналогию с системой электрического вала со вспомогательными асинхронными машинами. Анализ работы двигателей, приведенный выше, подтверждает эти соображения. Так же как и в схеме электрического вала, в известных случаях одна машина всегда работает в двигательном режиме, а другая — в генераторном (рис. 2).

Кривые результирующих механических характеристик, приведенные на рис. 3 при различных значениях угла поворота статора, свидетельствуют о том, что данный способ регулирования скорости эквивалентен регулированию скорости изменением напряжения.

Аналогичный результат, очевидно, может быть получен при включении в цепь статора одного из двигателей фазорегулятора.

При включении дополнительного сопротивления в цепь роторов величина максимального результирующего момента остается неизменной для тех же углов сдвига  $\theta$ , и смещается в сторону более высоких скольжений. Вел. критического скольжения, как известно, возрастает пропорционально значению вторичного сопротивления. Включение дополнительного, нерегулируемого сопротивления в роторной цепи позволяет снизить токи, потребляемые двигателями, и обеспечить вполне устойчивое регулирование скорости. На рис. 3 приведены результирующие механические характеристики агрегата для различных значений угла  $\theta$  и характеристика вентилятора.

Пересечение вентиляторной характеристики с любой из характеристик агрегата, получаемых путем пуском статора одного из двигателей, дает устойчивый режим работы на всем диапазоне скоростей, который практически может быть получен в пределах (10 ÷ 12) : 1. На рис. 4 представлены характеристики отдельных двигателей в функции угла  $\theta$ . Изложенные здесь выводы были экспериментально подтверждены автором в лаборатории электропривода МЭИ.

**Определение угла поворота статора и потерь энергии при регулировании скорости вентилятора.** При определении угла поворота статора для обеспечения требуемой скорости вентилятора воспользуемся уравнением движения:

$$M - M_{\text{вент}} = J \frac{d\omega}{dt}.$$

Так как здесь рассматривается работа привода в установившемся режиме, то это уравнение запишется так

$$M = M_{\text{вент}},$$

где  $M$  — момент, развиваемый агрегатом;  
 $M_{\text{вент}}$  — момент на валу вентилятора.

Пренебрегая механическими потерями в вентиляторе можно получить:

$$\theta = \arccos \left[ 1 - \frac{A}{2} (1-s)^2 \left( \frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} \right) \right],$$

где  $A = \frac{M_{\text{вент}}}{M_k}$  — относительное значение момента вентилятора при синхронной скорости привода.

Задаваясь величиной  $A$  и известным значением  $s_k$ , можно для любого требуемого значения скорости найти угол  $\theta$ .

Анализ уравнения (9) показывает, что при скольжении  $s = 1,0$  угол  $\theta = 0$ . При этом скорость агрегата также равна нулю, так как момент равен нулю.

Потери энергии в роторной цепи могут быть определены по формуле:

$$\Delta P_2 = \frac{3}{2} \frac{AU^2}{x_1 + c_1 x_2'} (1-s)^2 s. \quad (10)$$

Величина  $A$  зависит от мощности вентилятора при синхронной скорости привода. С уменьшением этой мощности падает величина  $A$ . Кроме того, величина  $A$  зависит при заданном  $s_k$ , на значение номинального скольжения агрегата. Под номинальным скольжением агрегата будем понимать такое скольжение<sup>2</sup>, при котором развивается номинальный момент, а угол сдвига  $\theta = 180^\circ$ .

Из изложенного выше следует, что с увеличением  $A$  при прочих равных условиях, потери энергии в роторной цепи возрастают.

Анализ выражения (10) для потерь энергии в роторной цепи для рассматриваемой схемы указывает на полную его аналогию с тем же выражением для других систем электроприводов (например асинхронно-синхронный каскад или электромагнитная муфта скольжения).

Как показали расчеты, максимальные потери энергии в роторе не превосходят 15% от установленной мощности агрегата при скорости, равной 66% от синхронной, при  $A = 1,2$ ,  $s_k = 1,0$ .

<sup>2</sup> На значение номинального скольжения влияет величина  $s_k$ , с увеличением которой возрастает номинальное скольжение.

Сопоставление данного способа регулирования скорости механизмов с вентиляторным моментом, например, с каскадными установками, свидетельствует о сравнительной простоте схемы благодаря применению в ней бесколлекторных двигателей переменного тока. Другим достоинством этой системы в сравнении, например, с обычным реостатным регулированием, является отсутствие регулируемого сопротивления в роторной цепи. Благодаря этому отпадает надобность в громоздкой и ненадежной аппаратуре, так как регулирование скорости в данном случае осуществляется во вспомогательной цепи с помощью серводвигателя. Регулирование скорости совершается здесь с большим передаточным отношением, и поворот статора на небольшой угол (при многополюсном двигателе) будет поэтому совершаться достаточно интенсивно.

Относительно конструктивных особенностей машин, связанных с поворотным статором, следует указать на осуществленные уже и работающие установки мощностью в 10 000 kW и выше в одной единице.

Вопросы, связанные с выбором мощности двигателей, энергетическими показателями системы, точностью регулирования и переходными процессами будут автором рассмотрены отдельно.

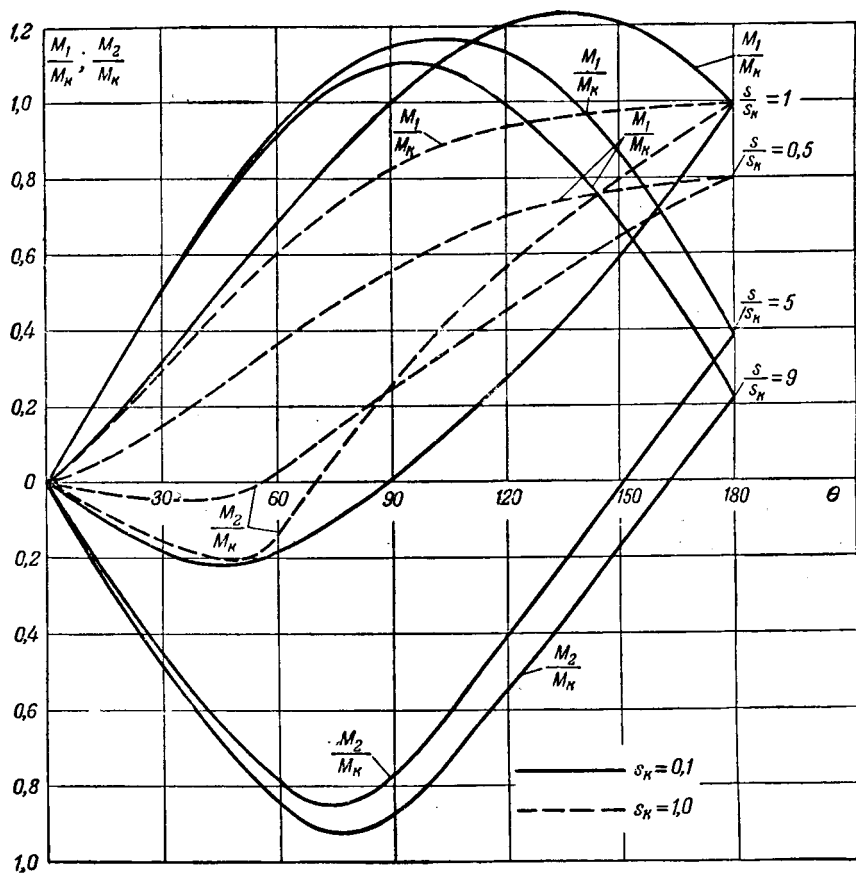


Рис. 4. Механические характеристики отдельных двигателей  $\frac{M_1}{M_N}$  и  $\frac{M_2}{M_N}$  в функции угла  $\theta$  при различных значениях  $\frac{s}{s_N}$  и  $s_k = 0,1$  и  $1,0$ .

Настоящая работа выполнена автором под руководством проф. Е. В. Нитусова.



## Регулирование скорости трехфазного асинхронного двигателя при помощи схемы с тиратроном и серийными трансформаторами

Кандидат техн. наук, доц. А. Г. ИВАХНЕНКО

Институт электротехники Академии наук Украинской ССР

Для управления двигателем при помощи тиратрона удобно использовать серийные трансформаторы [Л. 1]. Применение серийных трансформаторов позволяет полностью использовать мощность тиратрона, выполняемого на сравнительно высокое напряжение (2 000 V), в схемах низковольтной нагрузки. Номинальная мощность серийного трансформатора может быть уменьшена в 2 раза по сравнению с мощностью нагрузки путем введения дополнительного напря-

жения во вторичную цепь [Л. 2]. Серийный трансформатор превращается при этом в вольтодобавочный (бустер). При открытом тиратроне двигатель получает полное напряжение сети. Два серийных трансформатора, включенных на один тиратрон, позволяют осуществить управление трехфазной нагрузкой. Разрыв электрической цепи в одном месте (тиратроне) фактически прекращает поступление энергии по трем проводам. Серийные трансформаторы практически

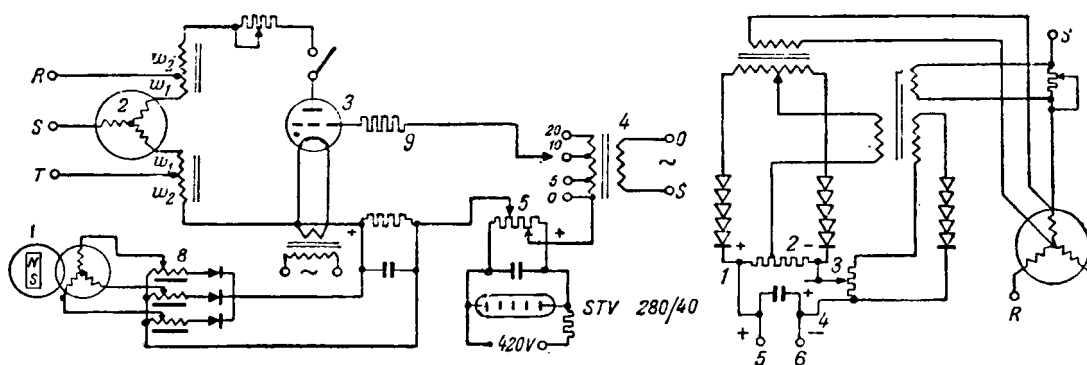


Рис. 1. Схема регулирования и стабилизации скорости.

безинерционны, что очень важно для быстродействия и устойчивости схемы регулирования. Безинерционность — основное преимущество схем с серийными трансформаторами с тиратронами по сравнению с магнитными усилителями (дроселями насыщения). Схема с серийными трансформаторами использовалась для следящей системы, давшей, благодаря малой инерции, хорошие результаты (добротность  $300 \frac{1}{\text{сек}}$ ).

Схема регулирования и стабилизации скорости. Основной вариант схемы дан на рис. 1. В схеме: напряжение тахогенератора 1, пропорциональное скорости двигателя 2, поступает в цепь сетки тиратрона 3. Здесь оно сравнивается с напряжением, снимаемым с потенциометра 5. Разность напряжений тахогенератора и источника стандартного напряжения смещает по вертикали кривую мгновенных значений напряжения, поступающего от трансформатора 4. Это вызывает изменение угла отсечки тиратрона 3, управляющего, при помощи серийных трансформаторов, напряжением на зажимах двигателя 2. Вектор смещающего напряжения трансформатора 4 отстает от вектора анодного напряжения на  $90^\circ$ . Благодаря тому, что двигатель получает напряжение через два серийных трансформатора, управляемых одновременно, напряжение на его зажимах остается все время почти симметричным. Изменяя положение движка потенциометра 5, можно плавно менять скорость двигателя. В схеме нет усилителей напряжения, используются простой измерительный трансформатор 8, что значительно упрощает схему. Система автоматически поддерживает заданное число оборотов при колебаниях напряжения сети и изменении момента нагрузки с небольшой неравномерностью (статизмом). Путем увеличения коэффициентов усиления статизм системы может быть уменьшен вплоть до значения, при котором возникают автоколебания. Например, чем меньше напряжение смещения трансформатора 4, тем меньше статизм и тем меньше устойчивость системы. Для того, чтобы независимо от условий устойчивости в любой степени изменять наклон статических характеристик, достаточно в цепь сетки тиратрона ввести напряжение, пропорциональное моменту нагрузки. Если желательно уменьшить статизм, то это компаундирующее напряжение должно быть противоположно по знаку напряжению тахогенератора. Схема получения компаундирующего напряжения дана справа на рис. 1. На зажимах 1-2, по известному принципу Бауха-Фильда, получаем напряжение, пропорциональное мощности; на зажимах 3-4 — напряжение, пропорциональное квадрату тока; на выходе схемы (зажимы 5-6) — напряжение, пропорциональное моменту, в соответствии с формулой:  $M\omega_0 = P - k_1 I^2 - k_2$  [Л. 3]. Напряжения в схеме — не более 0,5 В на шайбу купроксного выпрямителя. Выпрямители при этом напряжении имеют

квадратичную вольтамперную характеристику, что и используется для получения требуемой функции.

Схема регулирования, реверсирования и торможения противовключением. Схема представлена на рис. 2. Здесь в качестве второго примера показана фазовая схема управления тиратроном. Фазовращательный мостик состоит из емкости 6 и лампы 7. Смещение подобрано так, что лампы работают на нижнем изгибе характеристики. При положительном значении управляющего напряжения  $U_2$ , снимаемого с потенциометра 5, работает правый тиратрон — двигатель вращается в одну сторону; при отрицательном — левый тиратрон (двигатель вращается в другую сторону). Изменение величины управляющего напряжения позволяет изменять скорость от максимальной в одну сторону до максимальной в обратном направлении с плавным переходом через нуль.

Данные серийных трансформаторов и схемы управления. Были испытаны схемы регулирования для двигателей 0,25, 0,5 и 1 kVA. Как показали эксперименты, параметры трансформаторов можно ориентировочно рассчитать по формулам  $Q_c = a \sqrt{P}$ , где  $a = 0,8 \div 1,2$ ;  $U_1 = 4,44 f \times \omega_1 B_m Q_c 10^{-8}$ ;  $I_1 = \frac{I_{\max}}{2\sqrt{2}}$ ;  $I_1 \omega_2 = I_a \omega_1 b$ , где  $b = 3 \div 5$ .

Здесь:  $Q_c$  — сечение сердечника в  $\text{см}^2$ ;  $P$  — мощность двигателя в ВА;  $I_a$ ,  $U_a$  — номинальный ток и напряжение двигателя;  $f = 50 \text{ Hz}$ ;  $B_m = 10\,000 \text{ G}$ ;  $I_{\max}$  — амплитуда тока тиратрона;  $I_1$  — действующее значение первой гармоники тока;  $b$  — кратность пускового тока. Например, для двигателя  $P = 1\,000 \text{ VA}$  и  $U_a = 220 \text{ V}$  при тиратроне ТГ 15/2000  $\times$  ( $I_{\max} = 15 \text{ A}$ ) получим:  $Q_c = 32 \text{ см}^2$ ,  $\omega_1 = 315$ ,  $I_1 = 5,3 \text{ A}$ ,  $\omega_2 = 630$  ( $b = 3,5$ ). Трансформаторы рассчитываются со значительным количеством стали, чтобы исключить действие постоянной составляющей тока тиратрона, искажающей форму кривой тока двигателя и вводящей значительную инерцию в процесс усиления. При большом числе витков обмотки и малом сечении сердечника серийный трансформатор превращается в магнитный усилитель со свойственной ему большой постоянной времени. Для полного устранения постоянной составляющей можно применить двухполупериодную схему [Л. 1,2].

Мощность тахогенератора (10 W) и коэффициент трансформации трансформатора 8 выбраны так, чтобы при максимальном числе оборотов в минуту в цепь сетки тиратрона поступало 280 В (под нагрузкой). То же напряжение противоположного знака снимается со стабилизатора STV 280/40. Трансформатор смещения 4 подает в схему напряжения 5, 10 и 20 В. В схеме реверсирования используется тахогенератор постоянного тока на 280 В. Фазовращательный мостик состоит из лампы 6Ф5 и конденсатора 6 емкостью 0,075  $\mu\text{F}$ . Напряжение обмотки, питающей фазовый мостик, 2,100 В. Данные сеточного трансформатора:  $Q = 1,5 \text{ см}^2$ ;  $\omega_1 = 4\,000$ ;  $\omega_2 = 2\,000$ ; сопротивление 9 (рис. 2) составляет 100 000  $\Omega$ .

Статические характеристики, коэффициент мощности, к. п. д. схемы и нагрев двигателя. Статизм для

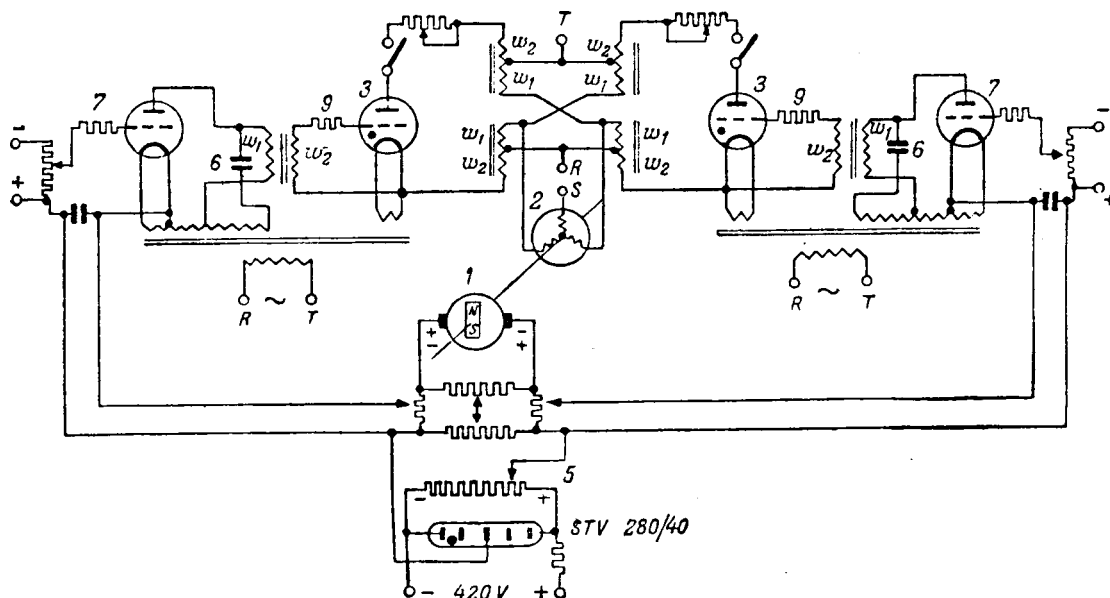


Рис. 2. Схема регулирования, реверсирования и торможения противовключением.

схемы рис. 1 определяется выражением  $\gamma = \frac{U_{см} 2\sqrt{2}}{U_{mTr}} \times 100\%$ . Если напряжение смещения  $U_{см} = 5V$ , напряжение тахогенератора  $U_{mTr} = 280V$ , то получим  $\gamma = 5\%$ . На рис. 3 представлены экспериментально снятые статические характеристики  $\omega(M)$  ионного привода с асинхронным двигателем мощностью  $P = 500VA$ . Система автоматически поддерживает постоянство скорости до тех пор, пока момент нагрузки не станет равным наибольшему моменту, развиваемому двигателем на данной скорости. При дальнейшем возрастании нагрузки двигатель останавливается. Коэффициент мощности измерялся (на зажимах RST, рис. 1) трехфазным фазометром. Коэффициент полезного действия определяется по формуле  $\eta = \frac{M\omega}{P} \cdot 100\%$ .

Мощность, потребляемая схемой, измерялась трехфазным ваттметром. Температура обмоток регистрировалась при помощи термодары. Момент двигателя  $M$  измерялся балансным динамометром. Результаты измерений и вычислений показаны на рис. 3, а также приведены в таблице.

В отличие от аналогичных схем для двигателей постоянного тока («таймоторол» и др.) коэффициент мощности почти не зависит от скорости, а определяется моментом нагрузки. Поэтому

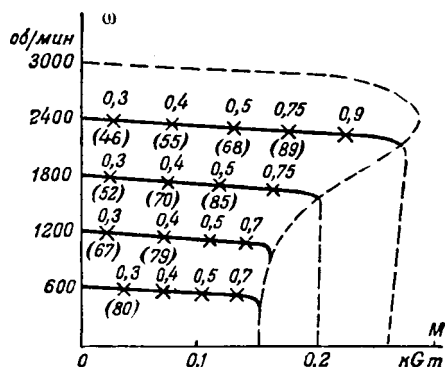


Рис. 3. Статические характеристики и коэффициент мощности системы. Мощность двигателя  $P = 500VA$ ,  $U_{см} = 5V$  (цифры в скобках — установившиеся температуры обмоток двигателя при длительной работе без обдува).

возможно, что схема найдет применение для двигателей не только малой, но и средней мощности. При низкой скорости потребуются обдув двигателя. Цифры в скобках на рис. 3 отвечают установившемуся значению температуры обмоток двигателя без обдува, достигаемой после непрерывной работы в данном режиме более часа. Наиболее опасными в нагреве являются скорости в диапазоне 10—20% от максимальной, где ток в обмотках двигателя достигает наибольшего значения. При более низкой скорости нагрев двигателя уменьшается. Опыты с искусственной вентиляцией (обдувом) не проводились.

#### Зависимость коэффициента мощности и к. п. д. от режима работы двигателя

Скорость двигателя, об/мин	Момент двигателя, кг.м			
	$M=0,05$	$M=0,10$	$M=0,15$	$M=0,2$
$n=2400$	$\cos \varphi=0,36$ $\eta=43\%$	$\cos \varphi=0,43$ $\eta=49\%$	$\cos \varphi=0,60$ $\eta=57\%$	$\cos \varphi=0,8$ $\eta=50\%$
$n=1800$	$\cos \varphi=0,35$ $\eta=30\%$	$\cos \varphi=0,43$ $\eta=36\%$	$\cos \varphi=0,71$ $\eta=37\%$	$\cos \varphi=0,8$ $\eta=43\%$
$n=1200$	$\cos \varphi=0,35$ $\eta=17\%$	$\cos \varphi=0,46$ $\eta=26\%$	$\cos \varphi=0,73$ $\eta=30\%$	
$n=600$	$\cos \varphi=0,33$ $\eta=9\%$	$\cos \varphi=0,5$ $\eta=11\%$	$\cos \varphi=0,75$ $\eta=17\%$	

#### Литература

1. А. Г. Ивахненко. Схемы и расчет анодной цепи тиратронных контроллеров переменного тока. Автоматика и телемеханика, № 6, 1940.
2. Авторские свидетельства на имя автора, № 59207, № 58208, № 68080, № 67781 и № 67782 (см. Бюллетень. Госплана СССР, № 2 и № 3, 1947).
3. В. А. Трапезников и А. В. Константинов. Электродинамометры МЭИ. Труды МЭИ, вып. 1. 1937.

# Магнитная проницаемость некоторых материалов в слабых полях звуковой и надзвуковой частоты

Кандидат техн. наук Я. П. СЕЛИССКИЙ и инж. Г. А. МАТВЕЕВ

Научный исследовательско-испытательный институт связи сухопутных войск им. Ворошилова

Для расчетов дросселей и трансформаторов необходимо знание эффективной проницаемости различных магнитных материалов, употребляемых для производства сердечников. В литературе [Л. 1] указываются формулы, учитывающие совместное действие вихревых токов и гистерезиса, позволяющие произвести приближенный расчет эффективной проницаемости материала, если известны его начальная проницаемость, удельное электрическое сопротивление, толщина листов и рабочая частота. Эти формулы, однако, справедливы лишь при соблюдении определенных условий и только для слабых полей ( $H < 0,1 H_c$ ), почему теоретический расчет эффективной проницаемости может дать лишь ориентировочные данные. Окончательный выбор материала для сердечника в соответствии с назначением может быть сделан только на основании экспериментальных данных.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает разнообразные магнитные материалы для сердечников трансформаторов и дросселей техники связи. Кроме известных стандартных марок листовой электротехнической стали выпускаются улучшенные сорта холоднокатанной стали ХВП в виде листов и ленты разных толщин, горячекатанная листовая сталь марок ВЧ и ТП пониженных толщин, никелевожелезные сплавы с различным содержанием никеля и других элементов в виде листов и ленты. В данном сообщении описываются магнитные

свойства ряда отечественных марок тонких листовых и ленточных трансформаторной стали пермаллоя. Образцы в виде пакетов с диаметрами наружным 35 и внутренним 20 мм после штамповки подвергались отжигу в водороде. Для изоляции от вихревых токов кольца покрывались бакелитовым лаком.

Поведение проницаемости ряда мягких магнитных материалов в широком диапазоне частот весьма подробно изучено советскими исследователями в связи с теорией магнитных спектров В. К. Аркадьева [Л. 2—6]. Для выбора и оценки пригодности материалов при расчетах и конструировании сердечников необходимо знание следующих данных: 1) начальная проницаемость или проницаемость при очень слабых полях порядка нескольких мОе; 2) поведение проницаемости в определенном диапазоне частот и, в частности, частотный диапазон неизменности проницаемости при разной толщине листа; 3) влияние толщины листа или ленты на проницаемость.

Свойства различных листовых и ленточных материалов были измерены на мостовой схеме в синусоидальных полях при максимальной амплитуде напряженности поля около 3 мОе и при частотах от 300 до 16 кГц, а в некоторых случаях до 50 кГц.

На рис. 1 показана зависимость от частоты  $f$  эффективной проницаемости  $\mu_e$  четырех марок высококачественной трансформаторной стали, выпускаемых отечественной металлургической промышленностью. В стали марок ВЧ-2 и Э4АА падение эффективной проницаемости с увеличением частоты (крутизна кривых) зависит от толщины листа. Так, например, в стали Э4АА при толщине 0,35 мм проницаемость уменьшается от  $\mu_e = 525$  при  $f = 500$  Гц до 200 при 16 кГц, в то время как в стали ВЧ-2 с толщиной 0,1 мм проницаемость снижается от 440 при 500 Гц всего лишь до 410 при 16 кГц. Кривые рис. 1 экстраполированы на частоту  $f = 0$ . Начальная проницаемость (точнее  $\mu$  при 3 мОе) упомянутых марок стали зависит от толщины листа. Наиболее высокой  $\mu_0$  обладает материал толщиной 0,35 мм, наименьшей — толщиной 0,10 мм, а проницаемость материала толщиной 0,20 мм имеет про-

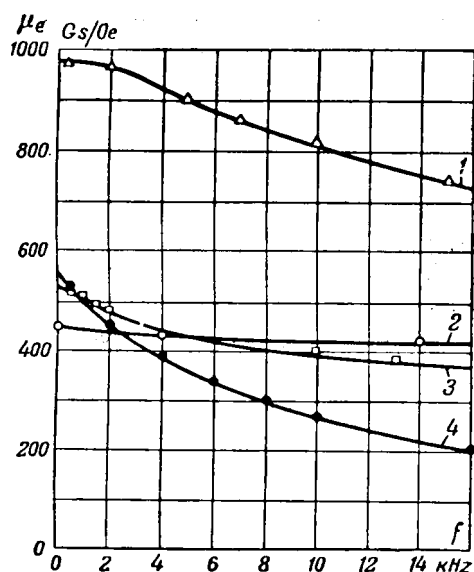


Рис. 1. Эффективная проницаемость  $\mu_e$  в зависимости от частоты  $f$  в различных марках отечественной листовой трансформаторной стали.

1 — холоднокатанная сталь ХВП, толщина 0,09 мм; 2 — горячекатанная сталь ВЧ-2, толщина 0,10 мм; 3 — горячекатанная сталь ВЧ-2, толщина 0,20 мм; 4 — горячекатанная сталь Э4АА, толщина 0,35 мм.

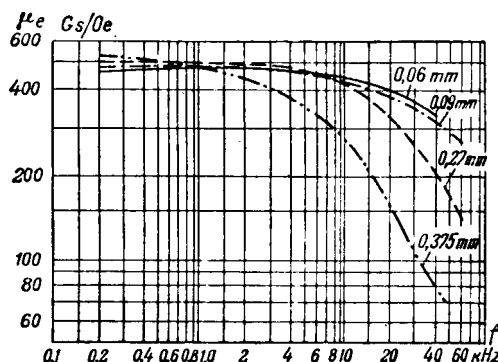


Рис. 2. Эффективная проницаемость в зависимости от частоты в тороидах из трансформаторной стали различной толщины.

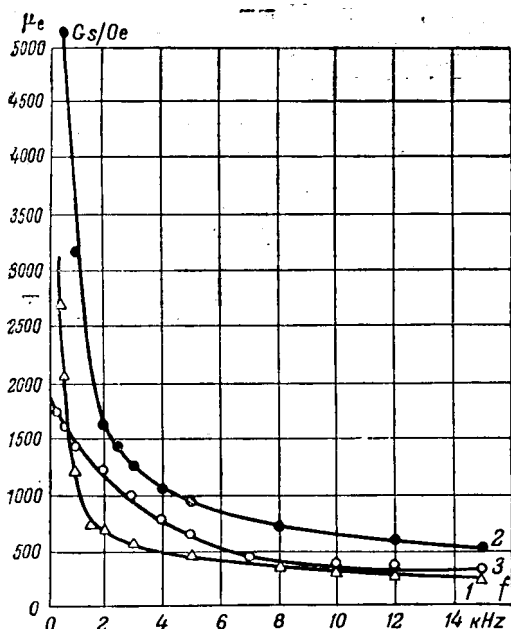


Рис. 3. Эффективная проницаемость в зависимости от частоты в трех сортах пермаллоя.

1—78%-ый пермаллой; 2—молибденовый пермаллой; 3—45%-ый пермаллой.

межзубочное значение. Ленточная сталь ХВП по своим свойствам резко отличается от свойств трех описанных листовых материалов. Измерения свойств этого материала были произведены на тороидальном образце, приготовленном в виде витого спирального сердечника. Эффективная проницаемость стали ХВП в диапазоне звуковых частот мало изменяется, оставаясь выше 950, а затем понижается до 725 при 16 kHz. Выдающиеся магнитные свойства стали ХВП вдоль прокатки объясняются тем, что в состав технологии производства этого материала входят холодная прокатка и рафинирующий отжиг в водороде [Л. 7]. При измерениях на витом образце направление поля совпадает с направлением наиболее высокой проницаемости.

Для дальнейшего исследования влияния толщины листа тороидальные образцы стали Э4АА исходной толщины 0,375 чередующимися шлифовкой и травлением были доведены до толщины 0,27; 0,09 и 0,06 mm. Изменение проницаемости при возрастании частоты до 50 kHz показано (в логарифмическом масштабе) на рис. 2. С уменьшением толщины образцов кривые становятся более пологими. При толщине 0,06 mm эффективная проницаемость остается практически неизменной на уровне 450 до частоты 10 kHz и снижается примерно до 350 при 40 kHz.

На рис. 3 показано изменение проницаемости в зависимости от частоты для трех сортов листового пермаллоя толщиной 0,35 mm с указанными в следующей сводке составами и свойствами, измеренными на постоянном токе баллистическим методом:

Сплав	Проницаемость в Gs/Oe		Коэрцитивная сила H <sub>c</sub> , Oe
	μ	μ <sub>max</sub>	
78% пермаллой 78% Ni + 22% Fe)	10 000	100 000	0,05
Молибденовый пермаллой 78% Ni + 4% Mo + 18% Fe)	8 000	80 000	0,05
45% пермаллой 45% Ni + 55% Fe)	1 600	20 000	0,05

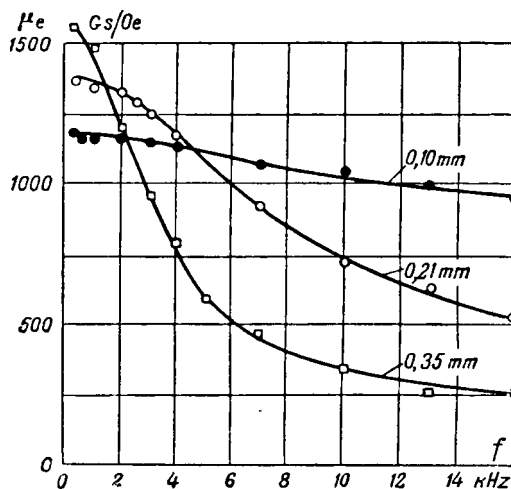


Рис. 4. Эффективная проницаемость в зависимости от частоты в 45%-ном пермаллоевом ленте при различных толщинах ленты.

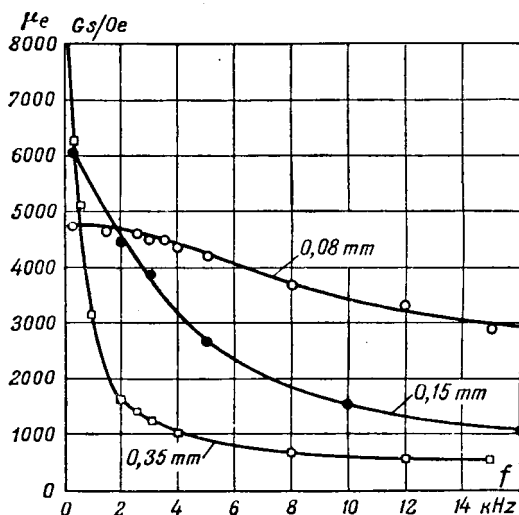


Рис. 5. Эффективная проницаемость в зависимости от частоты в молибденовом пермаллоевом ленте при различных толщинах ленты.

Из холоднокатанного сплава в состоянии поставки штамповались тороидальные образцы, которые отжигались при 1000° С в атмосфере водорода; 78%-ый пермаллой дополнительно подвергался специальной обработке — нагрет до 650° С и охлаждению на воздухе. У пермаллоев с 78% Ni проницаемость падает в диапазоне звуковых частот наиболее круто; в молибденовом пермаллоеве благодаря его более высокому удельному сопротивлению ( $\rho = 55 \mu\Omega \text{ cm}$ ) наблюдается менее резкое снижение эффективной проницаемости, чем в пермаллоеве с 78% никеля, но не содержащем молибдена ( $\rho = 16 \mu\Omega \text{ cm}$ ). В 45%-ном пермаллоеве вследствие его сравнительно низкой начальной проницаемости и высокого  $\rho$  (45  $\mu\Omega \text{ cm}$ ) частотная кривая идет более полого, чем у других двух сплавов. Таким образом, при частоте 1 kHz эффективная проницаемость 78% пермаллоя понижается на 85%, молибденового пермаллоя — на 70% и 45%-го пермаллоя — на 15% от величины  $\mu_0$ . При таком резком понижении проницаемости пермаллоем стандартной толщиной листа утрачивает свои преимущества перед обычной трансформаторной сталью 0,35 mm и применение его при звуковых частотах не рационально. Преимущества пермаллоя могут быть реализованы только в том случае, когда он применяется в виде более тонких листов или ленты.

На рис. 4 сопоставлено изменение проницаемости в зависимости от частоты в тороидальных образцах, изготовленных из ленточного 45%-ного пермаллоя толщиной 0,35; 0,21 и 0,10 mm. Аналогичные кривые для молибде-

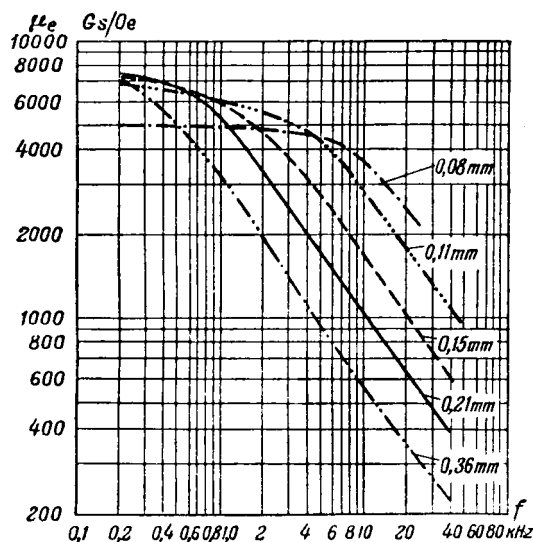


Рис. 6. Эффективная проницаемость в зависимости от частоты в молибденовом пермаллое при различных толщинах ленты.

нового пермаллоя толщин 0,35, и 0,08 мм представлены на рис. 5. В 45%-ом пермаллое при 10 кГц проницаемость в тороидах при толщине 0,35 мм падает на 78%, в то время как в тороидах при толщине 0,1 мм наблюдается понижение проницаемости всего лишь на 13%.

В молибденовом пермаллое  $\mu_0$  при толщине тороидов 0,08 мм приблизительно в два раза ниже, чем при толщине 0,35 мм, но  $\mu_e$  уже при частоте 500 Hz одинаковы для обеих толщин, а при более высоких частотах проницаемость при толщине тороидов 0,08 мм остается значительно выше, чем при толщине 0,35 мм. При частоте 10 кГц проницаемость при толщине тороидов 0,35 мм падает на 95%, а при толщине 0,08 мм всего лишь на 28%.

На рис. 6 даны в логарифмическом масштабе кривые, снятые при частотах до 40 кГц на тороидах, изготовленных из ленточного молибденового пермаллоя, толщиной

0,08; 0,11; 0,15; 0,21 и 0,35 мм. Для толщины 0,08 мм проницаемость при 20 кГц составляет еще около 2500, в то время как для более толстых материалов она снижается быстрее — для толщины 0,35 мм при той же частоте приблизительно до 300.

Таким образом,  $\mu_e$  падает тем сильнее, чем больше толщина листа и начальная проницаемость и чем меньше удельное сопротивление материала, что согласуется с теоретическими соображениями. Тонкие листы обеспечивают получение диапазона частот, в котором проницаемость практически постоянна или мало изменяется. Для звукового диапазона частот этот результат достигается в трансформаторной стали при толщине листа 0,1 ÷ 0,12 мм (марка ВЧ-2), в молибденовом пермаллое — при толщине 0,08 мм.

Выбор материалов для сердечников дросселей и трансформаторов должен производиться с обязательным учетом падения проницаемости в зависимости от частоты. В противном случае могут быть допущены грубые ошибки. Например, использование молибденового пермаллоя в листах толщиной 0,35 мм при частоте 1 кГц может привести к потере около 70% проницаемости, в то время как применение этого же материала в листах толщиной 0,08 мм может дать весьма благоприятные результаты.

#### Литература

1. Я. П. Селицкий. Труды Научного исследовательско-испытательного института связи сухопутных войск, № 2, стр. 38, 1948.
2. В. М. Гойтаников и Б. А. Мартынов. Информационный бюллетень по технике связи, № 8, стр. 23, 1939.
3. О. И. Валецкая, Сборник „Проблемы электро-технического металла“. Издательство Академии наук СССР, стр. 71, 1938.
4. О. И. Валецкая, Ученые записки МГУ (физика). Вып. 95, кн. 4, стр. 85, 1947.
5. В. К. Аркадьев. Электричество, № 3, 1939.
6. А. И. Пильщиков. Сборник „Проблемы ферромагнетизма и магнетодинамики“. Издательство Академии наук СССР, стр. 67, 1946.



## К автореферату Р. Л. Аронова „Оптимальное передаточное отношение при меняющемся моменте двигателя“

(Электричество, № 2, 1948)

Кандидат техн. наук Л. Б. ГЕЙЛЕР

Вопрос об оптимальном передаточном отношении в той узкой форме, в какой он поставлен в автореферате проф. Р. Л. Аронова, является весьма старым и в принципе решенным уже много лет назад. В настоящее время следовало бы ставить практически более важный вопрос — об оптимальных габаритах двигателя, т. е. искать не оптимальное передаточное число  $k$  при известном (задаваемом) моменте двигателя  $M$ , но определять оптимальную мощность (габариты) двигателя, принимая за переменные обе величины  $M$  и  $k$  одновременно.

Р. Л. Аронов выбрал неправильный путь исследования и пришел к повторению давно известных результатов, представив их лишь в весьма усложненном и чрезмерно математизированном виде. Известно, что успех всякого физического исследования зависит от правильного выбора тех факторов, которые являются наиболее важными. Нарушая это основное правило научных исследований, Р. Л. Аронов в своей работе выясняет влияние второстепенного фактора — отношения  $\frac{M_c}{M_1}$  (статического момента к

моменту двигателя), или точнее — влияние кривизны механической характеристики двигателя на величину оптимального передаточного числа. Для этого он вводит аппроксимацию момента двигателя помощью кривой с параметром  $\beta$ , изменяет параметр  $\beta$  от нуля до бесконечности и констатирует в качестве вывода своего исследования: «небольшое влияние кривизны механической характеристики на величину  $k$ ».

Однако, если бы Р. Л. Аронов с самого начала обратил внимание на соотношение практически встречающихся величин

$$\frac{M_c}{M_1} \text{ и } \frac{J_c}{J_{\partial}} = \frac{GD^2_c}{GD^2_{\partial}},$$

то он убедился бы, что вторая из них в десятки раз превосходит первую и потому является наиболее важной, определяющей величиной. В сравнении с ней первая величина  $\frac{M_c}{M_1}$  настолько незначительно влияет на результат (т. е. на величину  $k$ ), что исследование этого влияния уже заранее может быть определено как бесперспективное.

Недаром в работе Н. А. Тищенко, опубликованной еще в 1940 г. (см. ниже), предлагается для приближенных расчетов вообще пренебрегать величиной  $\frac{M_c}{M_1}$  и принимать

оптимальное передаточное число приближенно

$$k \approx \sqrt{\frac{GD^2_c}{GD^2_{\partial}}} = \sqrt{\frac{J_c}{J_{\partial}}}$$

вместо написанного у Р. Л. Аронова значения

$$k = \frac{M_c}{M_1} + \sqrt{\left(\frac{M_c}{M_1}\right)^2 + \frac{J_c}{J_{\partial}}}.$$

В статье А. И. Целикова и Н. П. Куницкого (см. ниже) в самой наглядной и притом компактной форме в виде нескольких кривых охвачены все решения для  $k$ , в то время как Р. Л. Аронов ищет их для каждого частного случая.

В первой серии примеров в автореферате Р. Л. Аронова значения отношения  $\frac{M_c}{M_1}$  взяты в диапазоне от 2 до 0,8; во второй серии — от 4 до 0,67. И те и другие взяты при величине

$$\delta = \frac{J_{\partial}}{J_c} = \frac{GL^2_{\partial}}{GD^2_c} = \frac{1}{56,1} = 0,018.$$

Обратившись к рис. 1 упомянутой статьи А. И. Целикова и Н. П. Куницкого, можно усмотреть, что разобранные Р. Л. Ароновым примеры во всех диапазонах практически изображаются одной и той же кривой и дают одно и то же решение. Этим предпрещается цитированный выше вывод, к которому Р. Л. Аронов приходит в результате кропотливых и громоздких расчетов для двигателя с контактными кольцами и ступенчатым пуском<sup>1</sup>.

Не удивительно, что и во второй части автореферата, посвященной короткозамкнутому двигателю, Р. Л. Аронов приходит к отнюдь не оригинальному выводу о том, что оптимальные значения  $k$  для разных конечных чисел об/мин (50, 75 и 100) получаются от 10,5 до 8,8, т. е. получаются одинаковыми с точностью  $\pm 8\%$ .

Суть дела не в форме механической характеристики двигателя и не в конечных числах об/мин, а, как было уже сказано, в малом влиянии величины отношения  $\frac{M_c}{M_1}$ ,

которая остается второстепенным фактором.

В то время как в работе А. И. Целикова и Н. П. Куницкого выявлены соотношения всех участвующих в процессе факторов, что является целью всякого исследования, цели и смысл автореферата Р. Л. Аронова остаются неясными.

Непонятно, почему Р. Л. Аронов, рассматривая все возможные варианты механической характеристики двигателя, т. е. принимая  $M_{\partial\partial} \neq \text{const}$ , в то же время для механизма сохраняет значение статического момента  $M_c = \text{const}$ . Хотя влияние формы механической характеристики и двигателя механизма, как было показано выше, очень мало отражается на исследуемом вопросе и конечных результатах, такая непоследовательность автореферата является методическим его недостатком. Обращает на себя внимание отрыв рассматриваемой работы от практики. Автор нигде не подчеркивает условного характера «оптимального» передаточного числа, т. е. не оговаривает, что на практике использовать его все равно не представляется возможным. С одной стороны, выбранное по условиям пуска «оптимальное» передаточное число не обеспечивает требуемой скорости механизма при установившемся его движении и потому приходится выбирать значительно большее передаточное число, чем «оптимальное». С другой стороны, осуществление в электроприводе «оптимального» передаточного числа приводит к ухудшению теплового режима двигателя. Отступление от опти-

<sup>1</sup> То обстоятельство, что в указанных примерах работы Р. Л. Аронова рассматривается только пуск, а в статье А. И. Целикова и Н. П. Куницкого — пуск и торможение, в данном случае, очевидно, не имеет значения.

мального» числа в сторону повышения его практически не меняет производительности механизма (так как время процесса остается почти неизменным из-за логического протекания функции  $t=f(k)$  (вблизи минимума), но зато достигается значительное сокращение пусковых потерь энергии в двигателе. Оба эти соображения, хорошо известные проектировщикам электропривода, к сожалению, не получили никакого отражения в работе Р. Л. Аронова.

В заключение нужно остановиться еще на одном вопросе — невнимании Р. Л. Аронова к отечественным исследованиям. Кроме двух собственных работ, в автореферате упомянуты еще статья в американском журнале GER за 1922 г. и в то же время игнорируются более прогрессивные в данной области работы советских электротехников, с которыми следовало Р. Л. Аронову познакомиться, прежде чем выступать в журнале «Электричество».

К этим работам относятся: Н. А. Тищенко «Рациональный электропривод автоматического блуминга» (ВЭП, № 9, 1940); работы проектных организаций Главэлектромонтажа и, в частности, работа Б. М. Яковлева и О. А. Синицына «Наивыгоднейшее передаточное число при трапециoidalном графике и заданном пути» (Технический сборник № 6 Московского проектно-конструкторского управления Центроэлектромонтажа, октябрь 1946 г.); А. И. Целиков и Н. П. Куницкий, «Выбор передаточного числа для электроприводов вспомогательных механизмов прокатных станов (ВЭП, № 9, 1947), Н. А. Тищенко «Выбор оптимального передаточного числа» (доклад на Всесоюзном совещании ВНИТОЭ по электроприводу, 8—15 декабря 1947 г. в Ленинграде).

Можно предполагать, что если бы Р. Л. Аронов был знаком с перечисленными выше советскими работами по выбору оптимального передаточного числа, рассматриваемый его автореферат не появился бы в печати.

#### Доктор техн. наук, проф. Р. Л. АРОНОВ

По поводу упрека Л. Б. Гейлера по моему адресу о невнимании к советским исследованиям считаю достаточным сообщить, что моя работа была выполнена в 1946 г. и отослана в редакцию 13 февраля 1947 г. Таким образом, в то время я не мог предвидеть появления более поздних работ: опубликованной в № 9 «Вестник электропромышленности» за 1947 г. статьи А. И. Целикова и Н. П. Куницкого или доклада Н. А. Тищенко на Всесоюзном совещании ВНИТОЭ в декабре 1947 г. В равной мере я не информирован о неопубликованных работах Главэлектромонтажа, в том числе о работе Б. М. Яковлева и О. А. Синицына. Технический сборник Московского проектно-конструкторского управления имеет ограниченное распространение.

Следовательно, из всего перечня, приведенного Л. Б. Гейлером, для предъявления мне упрека могла бы идти речь только о статье Н. Е. Тищенко «Рациональный электропривод автоматического блуминга», опубликованной в 1940 г., посвященной в основном вопросам, не связанным с темой моего автореферата. В работе Н. А. Тищенко используется упрощенная формула

$$i_{opt} = \sqrt{\frac{GD^3_m}{mGD^3_{\delta}}},$$

при исследовании нажимного устройства, причем автор формулы предостерегает против обобщения принятого упрощения: «Влияние момента внешних сил не учитывается, так как его величина для нажимного устройства

реверсивного прокатного стана относительно невелика». По содержанию статья Н. А. Тищенко не может быть связана с исследованием влияния момента двигателя, так как последний вообще не входит в указанную упрощенную формулу. Таким образом, сделанный Л. Б. Гейлером упрек неоснователен.

Вторым вопросом, поднятым Л. Б. Гейлером, является актуальность исследования влияния изменений  $M_{\delta}$ . Давая правильную положительную оценку статье А. И. Целикова и Н. П. Куницкого, Л. Б. Гейлер тем самым отказывается от всех выдвинутых в своей заметке построений и проявляет свою необъективность. Ибо, если следует пренебречь влиянием

$$\frac{M_c}{M_1} = \frac{1}{\beta} \text{ по сравнению с } \frac{GD^3_c}{GD^3_{\delta}} = \frac{1}{\delta}$$

и если «исследование этого влияния уже заранее бесперспективно», то все выводы А. И. Целикова и Н. П. Куницкого приводятся к формуле Н. А. Тищенко, как и показали это авторы статьи.

Л. Б. Гейлер далее утверждает, что «для практически встречающихся величин»  $1:\delta$  в десятки раз превосходит  $1:\beta$ , но тут же признает правильность областей изменения этих величин, указанных А. И. Целиковым. Из рисунка его статьи видно, что эти величины могут быть одного порядка.

Характерно, что при сопоставлении моей статьи с данными А. И. Целикова и Н. П. Куницкого, Л. Б. Гейлер замечает, что в численных примерах надо учитывать перестановку мест числителей и знаменателей дробей. Это им учтено при вычислении  $\delta = \frac{1}{56,1} = 0,018$ . Однако,

для  $\beta$  он берет не  $\frac{M_n}{M_c}$ , а принятое у меня  $\frac{M_c}{M_1}$ , т. е. поменяет диапазон изменений  $\beta$  от 0,25 до 1,5 на таковой от 4 до 0,67, что существенно меняет дело и может ввести читателей в заблуждение. В то же время в статье названных выше авторов указано в заголовке, что исследование проведено для электроприводов вспомогательных механизмов прокатных станов, т. е. вовсе не претендует на охват всех возможных случаев.

Нелогично требование Л. Б. Гейлера об увязке изменений  $M_{\delta}$  и  $M_c$ . Первый всегда является функцией скорости и претерпевает большие изменения при пуске и торможении; второй при тех же процессах управления часто определяется лишь трениями и для исследуемой категории механизмов в большинстве случаев постоянен в течение рассматриваемых периодов.

Вопрос о влиянии меняющегося в широких пределах и по различным законам момента двигателя давно стоял на повестке дня и служил объектом кропотливых сравнительных расчетов у нас и за границей. Общая методика исследования в моем автореферате дается впервые и позволяет получить существенно новые решения при близких порядках  $\beta$  и  $\delta$  (обозначения по статье А. И. Целикова и Н. П. Куницкого) и обосновать влияние и метод усреднения момента двигателя (например, для вычисления коэффициента  $\beta$  при пользовании кривыми вышеназванной статьи). По общепринятым представлениям строгое обоснование допустимости упрощений считается необходимым во избежание заблуждений.

В заключение следует отметить, что деловая критика помогает развитию науки и установлению истины, однако этим качеством заметка Л. Б. Гейлера не обладает.

#### ОТ РЕДАКЦИИ

Сложный вопрос о выборе оптимального передаточного числа для электропривода с повторно-кратковременным режимом может получить наилучшее решение лишь при рассмотрении конкретных объектов электропривода с точными исходными условиями и определенными конечными целями исследования. В этой связи замечание Л. Б. Гейлера о том, что обсуждаемый автореферат не отражает практических требований необходимо признать существенным.

Учитывая, что вопрос о расчете оптимального передаточного числа требует в дальнейшем более глубокого исследования, следует считать, несомненно, полезным состоявшийся обмен мнениями о содержании автореферата Р. Л. Аронова.





## Роль Б. С. Якоби в развитии русской и мировой электротехники

М. И. РАДОВСКИЙ

*Комиссия по истории физико-математических наук Академии наук СССР*

«Если достигнутые в сфере науки результаты приносят пользу всему миру, то без сомнения тем большее значение они имеют для страны, в пределах которой результаты эти достигнуты... Культурно-историческое значение и развитие народов оценивается по достоинству того вклада, который каждый из них вносит в общую сокровищницу человеческой мысли... Нижеподписавшийся поэтому обращается с чувством удовлетворенного сознания к своей тридцатисемилетней ученой деятельности, посвященной всецело стране, которую привык считать вторым отечеством, будучи связан с нею не только долгом подданства и тесными узами семьи, но и личным чувством гражданина.

Нижеподписавшийся гордится этой деятельностью потому, что она, оказавшись плодотворной в общем интересе всего человечества, вместе с тем принесла непосредственную и существенную пользу России...» Эти слова Б. С. Якоби [Л. 1] могут быть поставлены эпиграфом к очерку, посвященному его научной и инженерной деятельности.

В истории русской и мировой электротехники академик Борис Семенович Якоби занимает видное место. Можно без преувеличения сказать, что среди изобретателей,

В Комиссии по истории физико-математических наук Академии наук СССР ведутся работы по изучению материалов, характеризующих труды Б. С. Якоби—одного из выдающихся деятелей Петербургской Академии наук, внесшего вслед за М. В. Ломоносовым, Г. Рихманом, В. В. Петровым, Э. Х. Ленцем ценный вклад в научное исследование и практическое применение электричества. Труды Б. С. Якоби оказали значительное влияние на все развитие русской и мировой электротехники в области создания электродвигателя, гальванопластики, электроминных устройств, телеграфа и т. п. В публикуемой статье, основанной на изучении первоисточников, главным образом, материалов Архива Академии наук СССР, дан очерк о работах Б. С. Якоби, связанных с изобретением электродвигателя и гальванопластики.

создавших современную электротехнику, одним из наиболее выдающихся исследователей был Якоби. Он отдал все свои силы на то, чтобы воплотить научные исследования в области электричества в практически полезные изобретения. Вместе с тем Якоби не были чужды и чисто теоретические изыскания. Имя его неразрывно связано с историей электротехнического образования в России, с историей Академии наук, где в течение почти сорока лет осуществлялись его труды, относящиеся к электротехнике и к той области науки, которую ныне называют технической физикой.

Развернув свою деятельность в масштабах, невиданных до того ни в России, ни за границей, Якоби пришлось испытать косность и недальновидность бюрократических верхов царской России. На склоне лет, подводя итоги своей деятельности, принесшей так много ценного благодаря поддержке и содействию передовых русских ученых, Якоби с горечью должен был отметить, что «не может не остановиться с сожалением на грустной мысли, что во многих важных случаях обстоятельства предоставляли только возможность инициативы, но не способствовали полнейшему осуществлению пламенного желания дать научным работам такое развитие, чтобы Россия могла в этом

отношении, не прибегая к помощи заграничной техники, сама стать научным и промышленным центром, к которому остальные народы и страны должны были бы обращаться, как к источнику новых научных путей и практических применений» [Л. 1].

Эта мечта не могла быть осуществлена в общественно-политических условиях царской России.

Б. С. Якоби родился 21 сентября 1801 г. в Потсдаме. После окончания Геттингенского университета он занялся строительным делом, воздвигая мосты и другие сооружения, а также выступил с отдельными самостоятельными инженерно-экономическими исследованиями. Успешные работы в этой области выдвинули Якоби как подающего надежды инженера-ученого.

В 1835 г. Якоби был приглашен на кафедру архитектуры Дерптского (Юрьевского) университета (ныне университета в г. Тарту), которую он и занял, будучи избран 8 июня 1835 г. советом этого университета экстраординарным профессором по кафедре гражданской архитектуры [Л. 2, стр. 408]. В ноябре 1835 г. Якоби приехал в Юрьев и с тех пор всю свою жизнь прожил в России, где и протекала вся его научная и инженерная деятельность.

В университете Якоби сразу же занял видное место. Уже через год ему была поручена речь на торжественном собрании. Она была произнесена им 22 августа 1836 г. и называлась: «О значении внутренних путей сообщения» [Л. 2, стр. 454]. Однако, ни профессорская деятельность, ни архитектура вообще не были главным предметом его интересов. В течение ряда лет он был глубоко заинтересован возникшей тогда проблемой электродвигателя, которая начала усиленно привлекать внимание ученого мира.

**Изобретение электродвигателя.** Проблема электродвигателя возникла тотчас же, как только было открыто явление электромагнитного вращения, когда Фарадей в своем трактате «О некоторых новых электромагнитных движениях и о теории магнетизма» [Л. 3], датированном сентябрем 1821 г., показал, что «проводник имеет стремление вращаться вокруг магнитного полюса, а полюс вокруг проводника».

Как только были созданы первые удачные лабораторные конструкции электродвигателя, в научной прессе заговорили уже о новой эре, которую несет с собой новый двигатель. Вот что писал, например, редактор *American Journal of Science and Arts* Е. Силиман в 1837 г.: «Наука совершенно неожиданно дала нам в руки новую силу большой, но не знакомой еще нам энергии. ... При помощи самых простых средств—соприкосновения металлических поверхностей малых размеров, при помощи слабых химических реактивов возникает загадочным образом энергия, рассеянная повсюду в природе, непознаваемая нашими чувствами; эта энергия увеличивается еще более загадочным путем, перемещаясь в изолированной проволоке, увеличивается в тысячи и тысячи раз, пока не проявляется с невероятной силой; между ее зарождением и полной зрелостью нет промежутка: ребенок сразу рождается гигантом».

Со времени открытия всемирного тяготения и структуры небесной системы не было ничего более чудесного, чем энергия, порождаемая гальванизмом» [Л. 4, стр. 261—262].

Немало других столь же восторженных высказываний встречалось на страницах газет и журналов того времени. Однако, только наиболее осторожные исследователи были в состоянии трезво оценить положение, понимая, что для создания нового двигателя необходимы еще не только огромные усилия изобретателей, но и чисто научные изыскания. К таким исследователям принадлежал и Б. С. Якоби, предложивший наиболее удачную по тому времени конструкцию электродвигателя.

Постройкой «магнитного аппарата», как называл вначале Якоби свой двигатель, он занялся в мае 1834 г. Но «мыслью о применении новой силы в механике» Якоби был занят уже в течение нескольких предшествующих лет. В течение долгого времени он, как и многие другие пионеры в области электродвигателя, был в плену представлений, связанных с конструкцией паровой машины, которая основана на принципе возвратно-поступательного движения. В ранней истории электродвигателя встречает-

ся ряд предложений, основанных на этом принципе. И него не могли отказаться не только те, кто строил свои аппараты для лабораторных целей, но и те ученые-изобретатели, которые своими изысканиями преследовали и производственные цели. Можно указать на такого видного деятеля в этой области, как, например, Ч. Пэдж, принявший, как и Якоби, опыты в широких масштабах, пользуясь государственными субсидиями. Этот ученый в 1845 г. все еще настаивал на применении в электродвигателе возвратно-поступательного принципа [Л. 4, стр. 49].

В своем труде [Л. 5], в котором изложены основные результаты исследований по электромагнетизму, завершившиеся созданием электродвигателя, Якоби признается, что «не мог сначала стрешиться от идеи получить возвратно-поступательное движение, производимое последовательным притягивающим и отталкивающим действием магнитных стержней, а затем уже превратить это возвратно-поступательное движение в постоянное круговое известным в технике способом» [Л. 4, стр. 150]. Но Якоби одним из первых отказался от этого принципа и уже в 1834 г. построил модель, основанную на принципе вращательного движения.

В ноябре 1834 г. он сообщил Парижской академии наук о своем изобретении. 1 декабря о нем было доложено в заседании Академии, а 3 декабря это сообщение было опубликовано [Л. 6]. Якоби так описал свою конструкцию: «Аппарат состоит из двух групп по восемь стержней мягкого железа, длиной по 7 дюймов и толщиной в 1 дюйм. Обе группы стержней располагаются на двух досках под прямым к ним углом и симметрично одна по отношению к другой, таким образом, чтобы полюсы приходились один против другого. Один из дисков неподвижен, а другой вращается вокруг некоторой оси, благодаря чему группа подвижных стержней проходит мимо группы неподвижных на возможно более близком расстоянии от них. Все шестнадцать стержней обмотаны тремястами двадцатью фунтами медной проволоки толщиной в одну с четвертью линии; концы обмоток соединяются с полюсами гальванической батареи. Масса вращающейся со скоростью шести футов в секунду части машины доходит до 50 фунтов, что дает весьма значительную живую силу. Полезная работа этого аппарата, измеренная прибором, аналогичным тормозу Прони, эквивалентна работе поднятия груза в 10—12 фунтов на высоту в один фут в секунду. Успешная работа этой машины обусловлена удачной конструкцией жиротропа или коммутатора, осуществляющего перемену полюсов восемь раз за один оборот, т. е. восемь раз в  $\frac{1}{2}$  или  $\frac{3}{4}$  секунды (обычная скорость вращения машины), если раствор батареи состоит из слабо подкисленной воды, при которой едва заметно выделение газа» [Л. 4, стр. 111].

Предложенная Якоби конструкция была еще далеко не пригодна для практического использования. Понадобилось около четырех лет настойчивых изысканий, чтобы объявить о практической пригодности выдвинутой идеи. Тем не менее Якоби уже в кратком сообщении Парижской академии наук отмечает преимущества и выгоды, получаемые от применения электродвигателя. Имея в руках далеко еще не совершенную модель, он обращает внимание на дефекты паровой машины, от которых свободен новый двигатель. Одним из главных достоинств электродвигателя, подчеркивает Якоби, является то, что «машина эта дает непосредственно постоянное круговое движение, которое гораздо легче преобразовывать в другие виды движения, чем возвратно-поступательное движение» [Л. 4, стр. 114].

Не все наблюдения и выводы Якоби были верны. Так, например, он писал: «Магнитная сила действует во всех направлениях, не встречая препятствий в то время, как сила тяжести имеет препятствие в виде земной поверхности. Наконец, чтобы коротко определить всю значительность новой силы, можно сказать: в электрической машине скорость не стоит денег» [Л. 4, стр. 113].

В дальнейшем Якоби был более осторожен и таких решительных выводов не делал. Техно-экономическая характеристика электрической машины стала ясной только значительно позже. Сам Якоби писал в 1835 г. [Л. 5], что от многого ему пришлось отказаться, так как некоторые его объяснения были «поколеблены и опрокинуты». Но в главном и основном он был непоколебим. Он был

тврдо убежден, что электричество—это та сила, которая призвана создать новый переворот в производственных процессах. В то время как многие изобретатели и конструкторы, работавшие одновременно с ним, предназначали свои предложения только для ограниченных целей, Якоби указывал на возможность применения электромагнетизма для приведения в движение машин, т. е. для универсальных целей. Вспомним, что К. Маркс главной заслугой Дж. Уатта считал, что последний предназначал свою паровую машину не для особых целей, а имел в виду «универсальный двигатель крупной промышленности» [Л. 7].

По широте взглядов и по глубине понимания тех физических процессов, с которыми ему приходилось сталкиваться, Якоби резко выделялся среди своих современников. Якоби был первый, кто понял, оценил и применил на практике выводы Г. С. Ома (1789—1854), исследования которого, как известно, долгое время не получали признания в ученом мире и были встречены даже враждебно. Лишь около пятнадцати лет спустя после выхода в свет известного «Математического исследования гальванической цепи» [Л. 8] Ом был удостоен акта официального признания, получив от Лондонского Королевского общества в 1841 г. медаль Коплея. Якоби же еще до официального признания трудов Ома писал в 1835 г.: «Теория, предложенная Омом..., так проста и настолько хорошо согласуется со всеми явлениями, происходящими в гальваническом элементе, что я не колебался принять ее и положил в основу моих работ по конструированию моего магнитного аппарата» [Л. 4, стр. 159].

До приезда в Россию Якоби находился в стесненных обстоятельствах и опытами в области электромагнетизма мог заниматься урывками в весьма ограниченных размерах. Он писал об этом: «Я не мог продолжить свои опыты и даже должен был прекратить их на время» [Л. 4, стр. 231]. С переездом в Россию Якоби стал думать о реальном выполнении задуманных им планов.

В письме к министру просвещения и президенту Петербургской академии наук С. С. Уварову Якоби подчеркивает, «что надежда приблизиться к моей цели... носилась передо мною, когда я поступил на службу государству» [Л. 4, стр. 231]. Приехав в Петербург, Якоби лично передал Уварову составленную им записку и вместе с министром обсудил план действий, рассчитанный на пять лет. В этой же беседе был решен вопрос об окончательном переезде Якоби в Петербург с сохранением за ним должности профессора в Дерптском университете. К своей записке Якоби приложил цитированный выше меморандум «О применении электромагнетизма для приведения в движение машин» [Л. 5].

В записке Якоби подчеркивает прежде всего исключительно важное значение электромагнетизма. «Дело идет об одном из тех редких явлений, о коих всегда с гордостью говорит наука, так как они представляют собой прямой и непосредственный источник общего блага и промышленной пользы». Идеей практического применения достижений науки проникнута вся деятельность Якоби и особенно ярко эта идея выступает в его исследованиях в области электромагнетизма.

«... То громадное влияние, которое оказали механические двигатели на общественную и материальную стороны жизни,—пишет Якоби,—в настоящее время настолько всеми признано, что изобретение всякого нового двигателя... должно рассматриваться не просто как любопытное открытие, а как событие мирового значения, тем более это относится к тем силам природы, которые до настоящего времени использовались в совершенно других областях» [Л. 4, стр. 231].

Как и все другие изобретатели, работавшие одновременно с ним в этой области, Якоби в качестве генератора электрической энергии применял гальванические элементы. И лишь по прошествии многих лет напряженных, но по существу бесплодных исследований ученые убедились в том, что электрохимический генератор экономически не эффективен и для использования в широких промышленных масштабах не пригоден. Но на ранней стадии развития электротехники, когда опыты питания электродвигателя гальваническими батареями только начинались, изобретатели, в том числе и Якоби, видели только достоинства нового генератора. Якоби, например, был убежден,

что эксплуатационные расходы, связанные с новым двигателем, будут ничтожны.

Вот что он писал в разделе, трактуемом о «преимуществах» нового двигателя, касаясь «возможности» уменьшения эксплуатационных расходов: «Питание электромагнита гальваническим током происходит за счет взаимодействия веществ, которое имеет место при электрохимическом процессе. Таким наиболее дешевым в настоящее время процессом является применение раствора медного купороса, который, будучи проводником, сам заряжается отрицательным электричеством и на медном полюсе выделяет химически чистую металлическую медь. Мне удалось при некоторых условиях получить плотный слой меди, прекрасно поддающийся ковке; изумительно еще то, что на поверхности этой искусственно полученной меди повторились с замечательной точностью все очертания и углубления, бывшие на поверхности медного электрода, как будто бы это был его собственный отпечаток. Вслед затем я повторил опыт с гравированной медной пластиной и через несколько дней получил на отпечатке выпуклые черточки с такой точностью, которая не могла быть достигнута никаким иным способом. Свободная серная кислота сама заряжаясь положительным электричеством, разлагает цинк и образует раствор сернокислого цинка такой плотности, что для получения цинкового купороса в кристаллах не требуется особого выпаривания. Сернокислый цинк или цинковый купорос является весьма полезным веществом в красильном деле и других технических производствах... Из вышесказанного следует, что расходы по эксплуатации магнитных машин могут быть сведены к абсолютному нулю» [Л. 4, стр. 235].

В действительности же все оказалось гораздо сложнее. И никто иной, как сам Якоби, был одним из первых, кто это ясно и отчетливо понял. И хотя в 30-х и начале 40-х гг. прошлого столетия подобное заблуждение было всеобщим, все же предпринятые изыскания оказались не совсем бесплодными. Достаточно указать на то, что повышенный интерес к электрохимическому генератору вызвал целый ряд исследований в области гальванических элементов. Вместе с тем опыты с электромагнитными машинами—так назывались ранние электродвигатели—оказали огромное влияние на развитие учения об электромагнетизме. И в этом отношении Якоби, как увидим ниже, принадлежат большие заслуги. Кроме того, с опытами построения электродвигателей связаны так же и другие достижения Якоби.

В своей записке к Уварову Якоби особенно подчеркивает преимущества и выгоды нового двигателя. «В моем двигателе,—пишет он,—отсутствуют все управляющие и регулирующие механизмы, как-то: клапаны, вентили, поршни, полые цилиндры и пр., которые в паровой машине дорого стоят и быстро изнашиваются при работе. Благодаря этой простоте стоимость двигателя уменьшается и со временем может быть доведена до четверти стоимости паровой машины» [Л. 4, стр. 234].

Он отмечает: «Вследствие отсутствия трущихся частей двигатель почти не подвергается изнашиванию—в нем вращается в подшипниках только один вал, несущий на себе систему подвижных магнитов. В лучших паровых машинах изнашивание выражается по меньшей мере ежегодно в 10% стоимости... Магнитная машина обладает почти бесшумным действием благодаря тому, что в ней отсутствуют неизбежные в паровой машине сотрясения и удары, столь вредно действующие, в особенности в локомотивах». Якоби пишет далее, что при применении электродвигателя гарантирована «абсолютная безопасность от высоких труб и дыма, которые в паровых машинах являются существенным недостатком». Весьма важным является также и то, что обслуживание двигателя совершенно упрощено: «Двигатель не требует постоянного наблюдения за собой, он может быть на целые часы и даже дни предоставлен самому себе, его действие остается равным и спокойным» [Л. 4, стр. 234].

На протяжении всей записки Якоби говорит о своей «магнитной машине», как о двигателе вообще. В заключительных же строках он указывает и на вполне определенную область применения нового двигателя, а именно на судоходство, «чтобы мое новое отечество,—замечает он,—с которым я уже связан многими узами, не лишилось славы сказать, что Нева раньше Темзы или

Тибра покрылась судами с магнитными двигателями» [Л. 4, стр. 239].

Записка Якоби была составлена им в Дерпте и датирована 27 мая 1837 г. [Л. 9]. Ровно через месяц после этого Уваров доложил о ней Николаю I. Уваров подчеркивает, что речь уже идет по крайней мере... о замене паровой машины новым двигателем: «Открытие, или правильнее сказать, приложение новой силы, доселе еще не измеренной, но существенной в своих последствиях, электромагнетизма, начинает обращать повсюду на себя особенное внимание и любопытство. Ближайшим результатом сего приложения была бы замена паровой машины другою более верной, менее опасной и почти никаких издержек не требующей» [Л. 9, № 1, лист 4].

Тут же Уваров, ссылаясь на газетные сообщения, указывает, что за границей (в Северной Америке) делаются опыты применения электродвигателя к судоходству и добавляет, что этот двигатель «с равным успехом» может быть применен «к каждой части машинного производства». В принципе, — писал Уваров, — проблема эта решена, но для практического осуществления новой идеи требуется «для проверки опытов в большом виде» ассигновать 50 000 рублей, которые будут расходоваться в течение 3—4 лет. Для осуществления этого проекта Уваров предлагает «учредить особый комитет из академиков и разных ученых других ведомств, дабы предварительно рассмотреть наблюдения и планы профессора Якоби и составить полный проект ожидаемых опытов».

Результатом обращения Уварова к Николаю I было назначение «Комиссии для производства опытов относительно приспособления электромагнитной силы к движению машин по способу профессора Якоби». В состав Комиссии вошли: вице-адмирал И. Ф. Крузенштерн — председатель, или старший член, как именовался он в протоколах Комиссии, академики Э. Х. Ленц, М. В. Остроградский, А. Я. Купфер, П. Н. Фусс, член-корреспондент П. Л. Шиллинг<sup>1</sup>, корпуса горных инженеров полковник П. Г. Соболевский и корпуса корабельных инженеров капитан С. А. Бурачек, назначенный в Комиссию по представлению начальника Главного морского штаба.

Состав Комиссии, данные ей инструкции и значительные по тому времени кредиты свидетельствовали об особом внимании, которое встретило предложение Якоби, казавшееся высшему начальству весьма близким к практическому осуществлению. С. С. Уваров в письме к И. Ф. Крузенштерну с извещением о назначении его председателем Комиссии, а также в письме, адресованном непременно секретарю Академии наук Н. И. Фуссу, прямо говорит о замене паровой машины «другим удобнейшим, безопаснейшим и несравненно менее издержек требующим средством» [Л. 9, № 1, л. 1, 3].

9 июля 1837 г., как видно из протокола, состоялось первое заседание Комиссии, протокол которого вел Э. Х. Ленц<sup>2</sup>. На этом заседании Якоби продемонстрировал модель своей машины и, как отмечалось в донесении Комиссии, члены Комиссии (на заседании присутствовали Шиллинг, Фусс, Остроградский, Соболевский и Ленц) «удостоверились в успешном действии» [Л. 9, № 1, л. 16]. После этого Якоби огласил текст своей записки Уварову, «содержащей полное изложение выгод, которыми машины сего рода отличаются перед прочими», подчеркнул, что «ныне наступила пора к употреблению всех усилий для практического приспособления сего нового движителя», с чем «члены Комиссии единодушно согласились».

Правительство поручило Комиссии направить усилия к применению электродвигателя для судоходства, сосредоточив все внимание на «приложении сего нового рычага к ботике соразмерной величины» [Л. 9, л. 16]. Таким образом, перед новым органом Академии наук была поставлена не теоретическая, а чисто прикладная задача, и Комиссия в цитированном донесении подчеркивает, что она «озаботилась начертанием ряда предварительных опытов

для скорейшего достижения сего практического результата, с устранением на первый случай всех могущих встретиться при том любопытных теоретических задач и сомнений». В подтверждение этого в донесении тут же мечается: «Это казалось тем более необходимым, что некоторого времени внимание всех просвещенных государств устремлено на приспособление электромагнитной силы к судоходству и что пребывание г. Якоби в отечестве нашем дает нам надежду предупредить в этом отношении успехи иностранных физиков». Правительство в лице Уварова всячески подчеркивало важность и первоочередность этой узкоприкладной задачи, в то время, когда проблема создания электродвигателя требовала более широких научных исследований.

О деятельности Комиссии и работах Якоби Уваров как это видно из бумаг<sup>3</sup>, входящих в Архив министерства народного просвещения, неоднократно письменно докладывал царю.

Вскоре работы Якоби стали предметом всеобщего внимания. П. Н. Фусс в годовом отчете Академии наук [Л. 10], читанном им 29 декабря 1837 г., говоря о важнейших работах мировых ученых в области электричества, особенно выделял труды Якоби. Об исследованиях Якоби он надеждах, которые на них возлагаются, узнала широкая публика. Примерно через год после начала регулярной деятельности Комиссия представила министру донесение, в котором содержался отчет о работе Комиссии, завершившей испытание электродвигателя. Опыт начался в Комиссии вполне удачным, и донесение начиналось следующими словами: «Комиссия, учрежденная по высочайшему повелению для устройства судна, приводимого в движение электромагнитной силой, разрешила некоторым образом свою задачу тем, что 13 сентября произвела на Неве первый опыт подобного плавания — опыт, впоследствии неоднократно повторенный» [Л. 11].

Донесением Комиссии Уваров был настолько доволен, что готов был уже придать ему широкую огласку в печати, однако, запросил мнение Крузенштерна, не следовало ли напечатать этот документ в «С.-Петербургских ведомостях». Крузенштерн, считая целесообразным воздержаться от широкой публикации донесения Комиссии, с своей стороны предложил Якоби составить для газеты лишь краткий отчет [Л. 12], а полный текст донесения «без всякой перемены напечатать в «Журнале Министерства народного просвещения», что и было сделано.

Первые опытные испытания электродвигателя не совсем образом превосшли ожидания самой Комиссии. В противоположность первоначальному плану, — отмечается в донесении, — по которому предполагалось было производить опыты на тихой воде, удалось совершить плавание в самой Неве и даже против течения» [Л. 13, стр. 9].

Но эти же опыты воочию показали и то, что достигнутая цель еще далеко. Главный недостаток двигателя Якоби заключался в его ничтожной мощности, равной всего  $\frac{1}{4}$  л. с. Якоби, однако, считал возможным вести мощность своего двигателя до  $\frac{1}{2}$  л. с., что и было отмечено в донесении: «Якоби, основываясь на прежних опытах, твердо был убежден получать силу по крайней мере в  $\frac{1}{2}$  лошади, между тем как доселе едва удалось получить  $\frac{1}{4}$  лошадиной силы» [Л. 13, стр. 14]. Однако, в донесении указывалось, что о практическом применении электродвигателя в судоходстве можно говорить, лишь имея машину мощностью в 40 л. с.

Комиссия не скрывала и других трудностей чисто технического характера. Выявился ряд дефектов как в самом двигателе, так и в генераторе, главным из которых была их громоздкость. Несмотря на это, Комиссия твер-

<sup>1</sup> Изобретателю электрического телеграфа П. Л. Шиллингу принять участие в работе Комиссии не пришлось — он умер 25 июля (ст. ст.) 1837 г. и присутствовал только на первом заседании (9 июля).

<sup>2</sup> Сохранившийся экземпляр протокола написан рукой Ленца [Л. 9, № 1, л. 11—12].

<sup>3</sup> Копии (заверенные) этих документов были сняты в 1901 г. сыном Б. С. Якоби Н. Б. Якоби, тщательно собравшим материалы, относящиеся к деятельности его отца. Материалы эти в 1933 г. были приобретены Академией наук СССР у детей Н. Б. Якоби и переданы в архив Академии Наук СССР (см. «Архив истории науки и техники», вып. 4, статью, Л. Б. Модзалевского «Архив акад. Б. С. Якоби. Обзор архивных материалов»; в исправленном и дополненном виде обзор этот напечатан тем же автором в «Архиве Академии наук СССР. Обзор архивных материалов», т. II, стр. 84—95).

стала, что опыты следует продолжать: «Комиссия счи-  
ла нужным изложить наперед свое мнение о том, дол-  
жно ли, судя по сделанным доселе опытам, отказаться от  
надежды пользоваться электромагнетизмом, как двига-  
тельной силой, и можно ли полагать, чтобы избранная  
конструкция и расположения были именно та-  
кие, которые дают наибольшее действие и далее которых  
уже невозможно перейти при настоящей степени на-  
копления познаний? Комиссия имеет полное основание отвечать  
на этот вопрос отрицательно» [Л. 13, стр. 14]. В донесе-  
нии подчеркивалось, что «бывает чрезвычайно редко, что  
машина с первого раза исполнила то, чего от нее  
ожидают».

За год работы были достигнуты и несомненные успе-  
хи, которые были особо отмечены. «Хотя главным внима-  
нием и было устремлено на практическую сторону откры-  
тия, но она, как уже следует из высочайше утвержден-  
ного состава ее, должна была иметь в предмете и науч-  
ную сторону, тем более, что действовала на почве, почти  
неизведанной до того времени. Этою-то научною сторо-  
ною предмета, которая и должна быть впредь основанием  
каждому практическому приспособлению нового двигателя,  
занимались со взаимной ревностью профессор Якоби и  
академик Ленц, и Комиссия поставляет себе в удоволь-  
ствие засвидетельствовать, что исследования их более и  
полезнее послужили к объяснению количественных от-  
ношений электромагнетизма, нежели другие какие-либо  
работы новейшего времени» [Л. 13, стр. 13].

Испрашивая разрешение на дальнейшие опыты и рас-  
суждения, связанные с ними, Комиссия соблюдает исключи-  
тельную осторожность, указывая, что опыты ближайшего  
года покажут, можно ли будет, устранив обнаруженные  
дефекты, приступить к сооружению судна, хотя бы на  
маленьком, или же «предоставить другому благоприятнее-  
му времени объяснение сущности этих сил природы, ко-  
торые для нее (Комиссии.—М. Р.) еще должны были ос-  
таться неразгаданными и неупотребительными в пользу»  
[Л. 13, стр. 16].

Дальнейшие исследования оказались не безрезультат-  
ными. Якоби действительно удалось усовершенствовать  
свой двигатель, увеличив в несколько раз его мощность.  
Значительно упростить конструкцию генератора. В доне-  
сении Уварову, датированном 21 августа 1839 г., Крузен-  
штерн писал: «По введении значительных улучшений в  
устройство машины в прошлом году машине, занимающей толь-  
ко весьма мало места, оказалось, что избранная в ней  
конструкция имеет большое преимущество перед всеми  
другими, доселе изготовленными для опыта моделями.  
Сила ее увеличилась не только вдвое... но даже втрое и  
четверть, и 8 числа сего месяца с гребным судном, на  
котором находилось 11 человек, удалось достигнуть ско-  
рости четырех верст в час, причем новоустроенная  
батарея едва занимала шестую долю прежнего ее про-  
странства» [Л. 14].

На этот раз «электроход»<sup>4</sup> обратился на себя всеобщее  
внимание. Как видно из доклада Николаю I, в испытании  
судна, приводимого в движение двигателем Якоби, при-  
нимал участие глава флота генерал-адмирал великий князь  
Константин Николаевич<sup>5</sup>, а также министр просвещения и  
президент Академии наук Уваров.

Испытание «электрохода» в этом году производилось  
множественно и одно из них довольно пространно описа-  
но в газете «Северная пчела», уделившей этому событию  
специальную статью, носящую название «Новые успехи на  
поприще электромагнетических опытов и радостные на-  
дежды в будущем». Хотя автор статьи<sup>6</sup> и не был компе-  
тентен в вопросах учения об электричестве и его практи-  
ческого применения, однако, сообщил немало любопытных  
данных, проливающих свет на обстановку, в которой ра-  
ботал Якоби.

<sup>4</sup> Такое название часто встречается в бумагах цити-  
руемых фондов.

<sup>5</sup> «Главе» военно-морского флота тогда едва минуло  
двадцать лет и его личное участие в опыте, как пишет  
Уваров, выразилось в том, что он «сделал прогулку на  
магнетическом ботике» [Л. 14, л. 32].

<sup>6</sup> Она принадлежит, повидимому, редакции и изда-  
телю этой газеты Ф. Бугарину — статья подписана его  
инициалами.

«Квартира г. Якоби, на Васильевском Острове, в до-  
ме Парланда № 30, на берегу Невы, между 16 и 17 ли-  
ниями, это точно жилище волшебника. Везде стоят ма-  
шины и аппараты самого простого и удобного свойства, и  
по прикосновению волшебного жезла, вдруг все машины  
движутся, мечут искры, плавят металлы! От прикоснове-  
ния другим концом жезла (сила положительная и отри-  
цательная) все мертвеет. Любопытно и поучительно! В  
средние века фанатики сожгли бы г. Якоби, а поэты и  
сказочники выдумали бы об нем легенду, как о Фаусте.  
В наше время мы не сожжем его, а согреем чувством  
признательности за его полезные труды и, вместо леген-  
ды, скажем правду, а именно, что г. Якоби, сверх учено-  
сти, отличный человек во всех отношениях и что наука  
вправе от него надеяться много, потому что в нем нет  
педантизма, а истинная, пламенная страсть к наукам и столь  
же пламенное желание быть полезным гостеприимной и  
благодарной России» [Л. 15].

Оставляя в стороне примитивное содержание и стиль  
сообщения, следует отметить, что автор его в характе-  
ристике дальнейших перспектив изобретения электродви-  
гателя пользовался, повидимому, сведениями, представ-  
ленными самим Якоби. На это указывает осторожность  
автора, когда речь идет о «надеждах насчет электромаг-  
нитической силы». Вспомним, что Якоби не говорил  
о немедленной замене паровой машины  
электродвигателем. Именно этим объясняется  
то, что автор статьи, написанной в восторженном тоне,  
счел нужным поместить такой абзац:

«Позволяем себе сделать здесь несколько замечаний.  
Наше время, проникнутое промышленными выгодами, от-  
личается преувеличениями и неумеренными ожиданиями.  
Мы часто забываем, что во всем должно руководство-  
ваться надлежащею мерою, хотя лодка, о которой было  
говорено, совершает при умеренной скорости только от  
четырех до пяти футов в секунду, однакоже многие вы-  
сказывают свои надежды насчет электромагнитной силы  
и именно в том отношении, что она вскоре вытеснит па-  
роходство, как будто два предмета сии не могут жить  
мирно друг подле друга и как будто одно открытие долж-  
но непременно уничтожить другое. Пар подобен старо-  
му, поседевшему и окрепнувшему в битвах исполину,  
который оказывает невероятные услуги общественному раз-  
витию нашего времени; электромагнетизм — дитя, в телос-  
ложении которого проявляется зародыш исполинской си-  
лы. Не согласно было бы с законами природы, если бы  
это дитя внезапно преобразовалось в исполина» [Л. 15].

Это прямо противоречит утверждению американского  
научного журнала о том, что «ребенок сразу рождается  
гигантом».

На электромагнитную машину и, в особенности, на  
опыты Якоби возлагались самые смелые надежды. В этом  
отношении чрезвычайно характерным является письмо  
М. Фарадея к Якоби, датированное августом 1839 г. Фа-  
радей писал: «Я душевнейшим образом желаю, чтобы ва-  
ши большие труды получили высокую награду, которую  
они заслуживают... Как подумаю только об электромаг-  
нитной машине на Great Western или British Queen<sup>7</sup> и от-  
правке их этим способом в плавание по Атлантическому  
океану или даже в Ост-Индию! Какое это было бы  
славное дело». [Л. 14, № 1, л. 129].

А практика показала, что электродвигатель поистине  
находился в младенческом возрасте. Как ни утешительны  
были для Комиссии результаты, которых добился Якоби  
в течение года, после первого испытания его машины, все  
же и новые успехи не направили вперед решение  
основной задачи: наглядно показать пригодность электро-  
двигателя в техническом и экономическом отношении для  
практических целей. Понадобилось еще три года, чтобы  
окончательно убедиться в том, что эту задачу нельзя ре-  
шить средствами, которыми пользовались исследователи  
того времени. Однако, прийти к такому выводу означало  
отказаться от самого заманчивого, что сулило практиче-  
ское применение электрической энергии — создать двига-  
тель, который был бы свободен от дефектов, присущих  
известным до того двигателям. Упорству изобретателей  
содействовало также то, что результаты, полученные в  
других областях электротехники, превзошли во многих

<sup>7</sup> Крупные суда того времени. — М. Р.

случаях самые смелые надежды. Так, например, к 40-м годам XIX столетия можно было говорить об электрической телеграфии, стоявшей уже на прочной базе. Изобретение Якоби гальванопластики, блестяще оправдавшееся на практике, вызвало восхищение во всем мире. Изыскания Якоби в области электроминного дела также увенчались успехом. Но наиболее дальновидным умом, и в первую очередь Якоби, было ясно, что все это только частные вопросы, и о новой промышленной эре можно будет говорить только в случае разрешения проблемы электрического генератора и электрического двигателя. Выдающаяся роль трудов Якоби в этой области заключалась в том, что именно в первой половине XIX столетия перед наукой и техникой были уже поставлены вопросы промышленного использования электроэнергии для двигательной цели в универсальном смысле, и выдвинуты задачи создания соответствующих запросам промышленности и транспорта электрических генераторов и двигателей.

Именно от Якоби больше всего ждали успехов в этом направлении. Об этом ярко свидетельствует всеобщее одобрение, встретившее доклад Якоби на съезде Британской ассоциации естествоиспытателей (август 1840 г.), куда были приглашены многие видные ученые [Л. 16]. Доклад этот, называвшийся «Об основах электромагнитных машин», был опубликован в целом ряде научных журналов [Л. 17]. Ко времени съезда Ассоциации Якоби удалось лишь в 3—4 раза повысить мощность двигателя и значительно упростить генератор. Но и эти результаты произвели большое впечатление.

Отправляясь за границу, Якоби имел задание ознакомиться с работами по электромагнетизму, и он убедился, что результаты, полученные в России, значительно превосходят все то, что было достигнуто за рубежом, где также проводились опыты по практическому применению электромагнетизма.

И. Ф. Крузенштерн в своем донесении (январь 1841 г.) Уварову писал: «Г. Якоби во время своего путешествия по Англии и Германии, предпринятого с высочайшего соизволения, имел, согласно изустного его донесения, неоднократно случай убедиться в том, какую важность и высокое значение в обеих странах и в Америке придают практической стороне электромагнетизма и сколь большие усилия, поддерживаемые значительными денежными пожертвованиями и обширными техническими средствами, употребляют там для достижения цели. Но вместе с тем он убедился и в том, что сколь ни велики в чужих краях успехи по этой части, они, однако, уступают достигнутым у нас еще в 1839 г. результатам, хотя, может быть, употребленные в Англии и Америке системы отличаются большею простотою. Общее внимание света, присовокупляет г. Якоби, обращено в этом деле на Россию, которая уже столь часто явила себя щедрою покровительницей и спешествовательницей ученых предприятий. В России уже сделано одно важное, принятое со всеобщим одобрением открытие в области прикладного гальванизма<sup>8</sup>. От нее в праве ожидать также соответственных успехов и по части движения машин» [Л. 14, л. 3\*].

Однако, прошло свыше трех лет со времени учреждения Комиссии, а задание, которое на нее возложили, было еще далеко не выполнено. Еще не могло быть и речи о широком применении электродвигателя. Сомнения, зародившиеся в Комиссии в 1838 г. после первого испытания электродвигателя, теперь усилились. Перед Комиссией стоял вопрос о целесообразности ее существования. Но прежде чем вопрос о ликвидации Комиссии был окончательно решен, Якоби, как говорится в цитированном донесении Крузенштерна, «убежденный в важности предмета», приложил «все свое старание и труды на то, чтобы достигнуть этой цели хотя бы приблизительным образом».

Но ни усилия Якоби, ни затраченные большие по тому времени средства не привели да и не могли привести к успешному разрешению задачи. Комиссия в следующем своем донесении (декабрь 1842 г.) должна была констатировать, что желанных результатов добиться оказалось невозможным, и она предложила «прекратить временно действия свои впредь до открытия какого-либо нового пути, могущего вести к усовершенствованию приложения электромагнитной силы к движению судов» [Л. 14, л. 122].

В течение всего этого периода сам Якоби работал весьма успешно, над другими задачами практического применения электрической энергии. Тем не менее он хотел оставлять исследований в области электродвигателя. Эти исследования носили чисто научный характер и ощутительных результатов от них можно было бы ожидать лишь в неопределенном будущем, кроме того, они требовали систематического расходования средств и поэтому уже не интересовали царское правительство, близоруко рассчитывавшее на получение от электродвигателя немедленного коммерческого материально-технического эффекта. Правительство было значительно более заинтересовано в реализации другого изобретения Якоби — гальванопластики. В связи с этим было решено прекратить деятельность Комиссии. Гребное судно, на котором были произведены опыты с электродвигателем Якоби, было передано в Адмиралтейство «для хранения, впредь до востребования» [Л. 9, № 7, л. 181], «письменные дела» поступили в Архив Академии наук<sup>9</sup>, а «инструменты и прочие принадлежности» — в физический кабинет Академии.

Якоби, однако, и в дальнейшем в течение еще многих лет продолжал свои изыскания, неизменно наталкиваясь на непреодолимое препятствие, которое, по его словам, заключалось в том, что «химическая энергия в настоящее время дороже механической». [Л. 18]. Он был убежден, что наука с этим препятствием справится и его преодолит. Еще до ликвидации Комиссии в январе 1842 г. в докладе, носящем название «О моих работах по электромагнетизму в 1841 г.», Якоби выражал уверенность, что ему удастся разрешить свою задачу, хотя бы «сприблизительным образом», так как считал, что «работу из механической частью, в частности, над механизмами для передачи движения почти законченной». Но... «иначе обстоит дело с возбуждением гальванической деятельности, являющейся источником этой силы».

Сознавая, что «цинк является слишком дорогим», Якоби приходит далее к такому выводу: «надо будет приложить старания к тому, чтобы найти способ для получения более дешевого пути и тем самым обеспечить будущее этих (электромагнитных) машин» [Л. 18, стр. 95, 96].

Несмотря на то, что в течение пяти лет Якоби не удалось разрешить поставленной задачи, он никогда не сомневался в целесообразности начатых исследований, к которым бы разочарованиям они подчас не приводили. «На одном пункте, — подчеркивал он, — необходимо стоять твердо и неуклонно — я имею в виду дальнейшее развитие науки. Дайте нам только время».

2.

**Изобретение гальванопластики.** Официальной датой изобретения гальванопластики принято считать 5 октября (ст. ст.) 1838 г. В этот день непреходящий секретарь Петербургской академии наук П. Н. Фусс доложил Академии полученное от Б. С. Якоби письмо, датированное 4 октября того же года [Л. 19]. Якоби писал:

«...Позволяю себе передать при сем искусственное гальваническое произведение, с покорнейшей просьбой соблагословить представить его Академии, как доказательство, что гальванизм не только в состоянии приводить к движению машины, но имеет также свою эстетическую или, вернее, художественную сторону. Что не удалось многократным старанием медно-гравюрного искусства — производить рельефно вырезанные металлические доски — то сумело совершить тихое творчество природы».

К этому предмету, который лежит в стороне от моих прочих занятий, меня, конечно, мог привести только случай...

При чистке гальванических приборов, мне не раз случалось замечать, что осадившаяся на медном полюсе медь могла быть снимаема в совершенно связанных пластинках, в роде того образчика, который я позволил себе при сем приложить. В то же время я замечал и то обстоятельство, что на этих осаденных медных пластинках воспроизводились в обратном виде все случайные шероховатости, следы молотка, напильника и т. п. Это было, действительно, любопытно, так как свидетельствовало о большом спокойствии и постоянстве означенного молекулярного действия. Засим уже, понятно, должно было явиться, так сказать, само собою, желание испытать — что станет с гравиро-

<sup>8</sup> Имеется в виду изобретение гальванопластики. — М. Р.

<sup>9</sup> Они и составляют многократно цитированный фонд 44

ванною медною пластинкою, если ввести таковую в вольтаическую комбинацию, вместо обыкновенной пластинки. Результат оказался, как можно было ожидать, благоприятным в отношении резкости и точности воспроизведенных линий, но неблагоприятным в том отношении, что не удалось в целости отделить наросший осадок от гравированной медной пластинки. Можно было получить только отдельные обломки, причем портилась и гравированная медная пластинка. Такую испорченную медную пластинку я позволил себе тоже приложить, так как весьма возможно, что подобная пластинка, пожалуй, представит еще более научного интереса, чем другая, вполне удавшаяся и вделанная в красивую рамку, художественная пластинка. У первой именно наросший осадок так плотно соединился с оригинальною медною пластинкою, что невозможно разъединить их, и они оказываются в такой полной связи, такая могла бы иметь место только при сплавке...

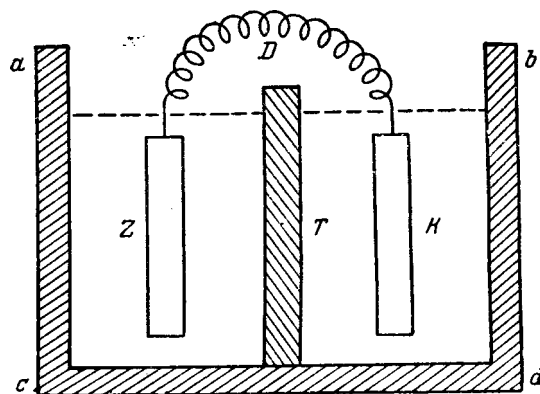
Обращаясь снова к данному естественному или искусственному произведению, я позволю себе обратить еще, внимание на резкость и точность очертаний, которые лучше всего наблюдать в луну. Я не сомневаюсь, что, если бы заняться этим делом, было бы возможно производить по этому способу рельефные медные доски для тиснения, подобно тому, как печатают гравюры на дереве; тут была бы еще и та выгода, что самые штемпельные доски можно воспроизводить в неограниченном количестве, для чего потребовалось бы только одна гравированная модель.

Способ, которым производятся эти доски, следующий: *wood* деревянный, не пропускающий воды ящик, разделенный пополам перегородкою из слабо обожженной глины или пленчатую перепонкою. В одном из этих отделений помещается цинковая пластинка *Z*, в другом — гравированная медная пластинка *K*, обращенная своею гравюрною стороною к цинку. Обе пластинки связаны между собою более или менее длинною соединительною проволокою *D*, в которую, по желанию, может быть введен мультипликатор. В отделение *Z* вливается вода с небольшою примесью серной кислоты или нашатыря, в другое — *K* — раствор медного купороса, постоянно поддерживаемый в насыщенном виде. Затем все это представляется собственной самодеятельности; через несколько дней можно снять с пластинки *K* готовую (наросшую) пластинку. Прилагаемый экземпляр получен в течение примерно около 2½ дней. Следует заметить, что оригинальная пластинка отнюдь не должна быть совершенно чистою и гладкою; ее надлежит покрывать тончайшим, вроде легкого налета, слоем жира или масла.

Как видно из этого документа, к октябрю 1838 г., когда работы Якоби над электродвигателем были в самом разгаре, он довел свои изыскания над новой возникшей перед ним проблемой до такой степени, что можно было говорить уже о завершеном изобретении. Как и многие другие выдающиеся достижения науки и техники, это изобретение имеет свою историю полную, выражаясь словами Якоби, «ночных бдений, страхов, борьбы и перепитий» [Л. 20].

Историю своего открытия Якоби изложил, когда ему пришлось отстаивать свои права на приоритет, впервые в письме к Беккерелю (1788—1878) в марте 1846 г., а потом в более расширенном виде в публичной лекции, прочитанной Якоби в Париже в музее искусств и ремесел в июне 1867 г.

Вот что рассказывал Якоби: «Это было летом 1836 г., когда, будучи еще профессором Дерптского университета, я произвел опыты с элементами покойного г. Даниэля. Сначала я пользовался конструкцией, похожею на конструкцию, предложенную г. Мюллиусом, но этот аппарат совершенно не отвечал поставленной мною цели и я велел *Académie Impériale des sciences de St.-Petersbourg*, II, p. 60, где находится также и письмо к г. Ленцу, читанное в заседании 3 февраля 1837 г.), в котором я сообщил этому ученому серию опытов, выполненных с помощью этого аппарата. В этом письме есть одно место, которое имеет отношение к моему открытию, а именно: Следует отметить, что при последних двух сериях опытов медь в совершенно твердом состоянии совершенно равномерно осела на дно сосуда. Но если бы цепь была замк-



нута с помощью короткой проволоки, то медь осела бы в виде порошка».

Через несколько дней после того, как было послано это письмо, намереваясь произвести другой опыт, я взял медный цилиндр из аппарата Мюллиуса. Этот цилиндр, наружная поверхность которого была покрыта кристаллическими и порошкообразными зернами меди, нужно было вычистить и покрыть бычачьим пузырем. Произведя над цилиндром эту операцию, мой служитель отделил от него несколько кусочков меди, достаточно больших, но тонких и хрупких. Вначале я был далек от мысли приписать им вольтаическое происхождение. Меня занимали элементы с перегородками, и среди многочисленных вопросов, которые эти замечательные аппараты возбуждают в науке, я был занят только одним — сделать их возможно устойчивыми и достаточно легко применимыми к движению электромагнитных машин. До сих пор я еще не понимаю, каким образом кусочки, о которых я говорил, могли создать у меня представление, что они образовались вследствие того, что медь, из которой был сделан цилиндр, была, быть может, плохо сплющена или что служитель, не имея достаточно толстых листов меди, сдвоил их.

Движимый первым побуждением, я призвал служителя и велел ему сказать мне правду, упрекая в том, что он мне плохо служит. Его горячий протест навел меня на мысль решить вопрос о происхождении этих кусочков, сравнивая их внутреннюю поверхность с внешней поверхностью цилиндров. Начав это исследование, я тотчас же увидел несколько почти микроскопических царапин напыльника на обеих поверхностях, точно соответствующих друг другу: вогнутые на поверхности цилиндра и рельефные на поверхности отделенного листка».

Гальванопластика явилась следствием этого тщательного исследования [Л. 14, л. 579—591]; письмо к Беккерелю *Annales de Chimie et de Physique*, т. XI, стр. 238—248, 1867].

Тщательные исследования Якоби не проводились, однако, непрерывно. Как раз тогда, когда он дошел до обнадеживающего результата, перед ним открылись необычайно широкие перспективы в разрешении основной задачи, которую он перед собой ставил — построить электродвигатель для практических пригодных целей. Отъезд его в Петербург и работа в Комиссии для применения электромагнетизма к движению машин поглощали все его внимание. Однако, добившись еще в Дерпте таких результатов, которые не могли не стимулировать его дальнейших изысканий, Якоби не оставлял начатое им дело и довел его до конца.

В цитированном письме к Беккерелю Якоби отмечает, что в феврале 1837 г. он уже твердо установил:

«1) что медь восстанавливается не только в виде кристаллических зерен, но и плотных листочков, которые пристают к электроду;

2) что частицы меди, группируясь вполне правильно, заполняют собою все углубления пластинки, служащей отрицательным полюсом.

В том же письме к Беккерелю и в публичной лекции в Париже Якоби указывает на следующую запись в своем дневнике, датированную 28 марта 1837 г.: «Начал серию опытов для подтверждения закона Фарадея относительно эквивалентности металлов и определенных действий галь-

банического тока. В данном случае я пользовался в качестве положительного полюса очищенным цинком и, желая одним выстрелом убить двух зайцев, я употребил в качестве отрицательного полюса, вместо обычного медного листка, — гравированную дощечку, которая служила для печатания моих визитных карточек. Через два с половиной его способа получения «вольтаических копий», ука- цинка же было израсходовано 305 гранов». В результате, — рассказывает Якоби, — он получил «несколько кусочков гальванической меди, из которых самый большой имел очень ясный рельефный отпечаток моего имени».

По признанию самого Якоби, тогда, в 1834 г., он полагал, что до практического применения его открытия еще далеко, что для этого потребуются еще длительные исследования, которые отвлекут его от работы над электро- двигателем. В дальнейшем, как писал он Беккерелю, он понял, что не нужно было «много трудов для того, чтобы ускорить это усовершенствование». В этом он убедился более, чем через год, когда в сентябре 1838 г. изготовил «хорошую гальваническую копию медной гравированной дощечки», которую и приложил в виде образца своего изобретения к письму к П. Н. Фуссу.

Несмотря на то, что международных телеграфных сношений тогда еще не было (в 30-х гг. делались лишь первые опыты в области электрической телеграфии), Якоби говорил, что сообщения об его открытии в иностранной прессе (немецкой, английской и французской) были опубликованы «с быстротой распространения, которая характеризует наш век».

Ободренный успехами первых испытаний электрохода (сентябрь 1838 г.), встретивших высокую оценку и одобрение, Якоби сообщил о своем новом изобретении Уварову, который тотчас же доложил об этом Николаю I. Практическое значение нового изобретения было очевидно. Оно в скором времени оказалось весьма полезным в разрешении ряда задач, стоявших перед правительством России. Но и до того, как Якоби принялся за внедрение своего изобретения на практике, было ясно, что в России сделан очень важный шаг в деле практического применения электричества.

В столичной газете «С.-Петербургские ведомости» [Л. 21] было напечатано сообщение, называвшееся: «О новом открытии, сделанном профессором Якоби»:

«Гальванические снаряды, — говорилось в нем, — изобретенные и устроенные профессором Якоби, для приведения в движение электромагнитных машин, послужили ныне поводом к открытию чрезвычайно замечательного и вместе с тем очень простого способа получать посредством гальванизма медные доски, на которых изображается выпукло то, что на оригинале выгравировано вглубь».

«...Не подлежит, как кажется, ни малейшему сомнению, — писала в заключение газета, — что этот способ, доселе никем не знаемый, со временем принесет большую пользу в практическом или техническом применении. На первый случай довольно важно и то, что мы получаем теперь возможность делать с гравированной медной доски, ежели она не слишком велика, сколько угодно выпуклых снимков, потому, что она не подвергается никакому химическому повреждению. Очень вероятно также, что вместо медных досок с выпуклыми изображениями можно их делать и из благородных металлов».

«Побочное» изобретение Якоби принесло ему больше славы и материального благополучия, чем какие-либо другие его труды. Гальванопластика тотчас же стала предметом внимания ученого мира и сразу же прочно вошла в практическую жизнь. Образцы своих изделий Якоби послал виднейшим ученым того времени. Хранившиеся в Архиве Академии наук СССР ответные письма Фарадея, Гумбольдта, Эрстеда, Грове и многих других ученых красноречиво свидетельствуют о том, как было принято открытие Якоби и как высоко его ценили в научных кругах.

Особенно интересна переписка Якоби и Фарадея. На посланном Фарадею экземпляре гальванического изделия Якоби начертал: «Фарадею от Якоби с приветом» (Faraday from Jacoby with his compliments)<sup>10</sup>. При этом Якоби при-

ложил весьма пространное, содержащее результаты ряда его исследований в разных научных областях письмо, датированное 21 июня 1839 г. Фарадею письмо Якоби пока- залось необычайно интересным и важным, и он почти немедленно послал его в Philosophical Magazine, где оно было напечатано под заглавием: «О способе производства копий с награвированных пластинок при помощи вольтаического действия; о получении смешанных газов для друмлиондо- света при помощи электролиза, о применении электромагнетизма в качестве движущей силы в навигации и об электромагнитных токах» [Л. 4, стр. 331—335].

В своем письме Якоби говорит о «техническом значении» его способа получения «вольтаических копий», указывая на то, что теперь можно изготовить стереотипы с меди в любом количестве копий. Не менее важной является и чисто художественная сторона. «Благодаря этому способу, — подчеркивает Якоби, — все delicate штрихи, которые являются главным достоинством и красотой таких произведений и которые обычно пропадают при отливке, могут быть сохранены; отливка же не в состоянии передать все детали в их чистоте. Художники будут чрезвычайно благодарны гальванизму, который открыл перед ними новую дорогу [Л. 4, стр. 333].

В ответном письме Фарадей писал: «Пластины, которые Вы мне прислали, не только весьма приятны и лестны для меня, они прекрасны сами по себе в теоретическом и практическом отношении. Все, что бы их здесь ни видел, восхищался ими» [Л. 14, № 1, л. 129]. В этом письме Фарадей также дает высокую оценку и другим трудам Якоби и, как равному коллеге, посылает ему экземпляр первого тома «Experimental Researches on Electricity».

В бумагах Якоби сохранились также письма Гумбольдта, Грове, Эрстеда.

Знаменитый естествоиспытатель XIX столетия А. Гумбольдт (1769—1859) в восторженных тонах описывал перспективы, которые открываются в связи с новыми достижениями Якоби. «Для меня, — писал Гумбольдт, — большая радость, глубокоуважаемый коллега, выразить Вам, хотя бы лишь в нескольких, при внешней помехе напечатанных строках, мою самую искреннюю благодарность за Ваше любезное письмо и Ваш великолепный подарок — «Описание гальванопластики». Это сочинение обладает достоинством полной ясности и благороднейшей простоты изложения. Круг технических применений Вашего прекрасного, разумно осмысленного открытия расширился в громадной степени. Даже те, которые, повидимому, сомневались в его обще-практическом применении, сознали свое заблуждение и отдают полную справедливость гальванопластическому процессу. Но подобное открытие важно не только тем, что оно непосредственно производит; оно является началом, средством распространения научных сведений в тех слоях народа, куда они до сих пор не проникали. Оно возбуждает во всех слоях общества чувство почтения к тем лицам, которые в поисках истинного обретают общепольное».

Английский ученый В. Р. Грове (1811—1896), известный в истории учения об электричестве своим гальваническим элементом (элемент Грове), был лично знаком с Якоби. Грове в своем письме напоминает Якоби их научные беседы и отмечает, что изобретенный им элемент может оказаться «полезным для гальванопластических опытов».

Эрстед, подобно Фарадею, воздавая должное гальванопластике («вызванное Вашим открытием искусство показало уже великолепнейшие плоды и обещает принести многообразные плоды как для художеств, так и науку), не проходит мимо других трудов Якоби, которые представляются ему еще более значительными. «Я не могу, — писал он, — упустить случая, чтобы не заявить Вам, как высоко я ценю прочие Ваши гальванические работы. Сочетание экспериментальной и математической солидности в этих исследованиях создают твердую почву для дальнейших открытий. Только такими трудами будет продолжен путь к наиболее выгодной конструкции электромагнитного двигателя».

<sup>10</sup> См. примечание сына Б. С. Якоби — Н. Б. Якоби — к русскому переводу письма к Фарадею (Записки Русского Технического общества, т. XXIII, № 4, стр. 11—15, 1889).

<sup>11</sup> Русский перевод этого тома издан Академией наук СССР в серии «Классики науки» в 1947 г., под редакцией Т. П. Кравца.

Приведенные выдержки из писем Фарадея и Эрстеда, исследования которых легли в основу электротехники, характеризуют отношение крупнейших ученых XIX столетия к Якоби.

Как уже отмечалось, изобретение гальванопластики оказало влияние на ход его основных исследований. Несмотря на эту победу, вряд ли удалось бы получить субсидии на исследования в области электродвигателя в столь больших размерах и в течение столь длительного времени. Не случайно гальванопластика тотчас же после ее изобретения заменила услуги русскому правительству, царская казна оказалась бы не столь щедрой. А услуга эта была как раз кстати. В 1839 г. в России проводилась денежная реформа — ассигнации заменялись кредитными билетами, — и печатание их гальванопластический способ воспроизведения гравюр оказался исключительно выгодным. Прежде всего гарантировалось точное воспроизведение, а так же и ускорение процесса изготовления новых знаменитостей, что имело особо важное значение, новый способ трудился подделку этих бумаг. Гальванопластика стала применяться не только для изготовления денежных знаков. Стало совершенно ясно, что она незаменима в деятельности так называемой «Экспедиции заготовления государственных бумаг». Отсюда понятен повышенный интерес к изобретению Якоби. Полученное им

довольно высокое вознаграждение в 25 тыс. руб. обязывало его не патентовать, а публиковать свое изобретение, которое могло быть употреблено во всех тех случаях, когда оно могло оказаться полезным.

Это поручение Якоби выполнил, издав в 1840 г. книгу о гальванопластике [Л. 22], которая сразу же была переведена на немецкий, английский и французский языки (об этом сочинении и писал в упомянутом выше письме Гумбольдт). Согласно поставленному ему условию, Якоби должен был так составить свое сочинение, чтобы им смог бы пользоваться и малоподготовленный читатель, особенно в вопросах учения об электрическом токе, или, как тогда говорили, гальванизме. На такого именно читателя и рассчитано произведение Якоби, который к тому времени имел уже опыт подготовки специалистов-электротехников, насколько этот термин применим для того времени. Вот что пишет он в предисловии к своему труду:

«Я сам испытал, что люди без малейшего ученого образования и воспитания, получив от меня некоторые наставления, весьма скоро приобрели навыки, как в обращении с гальваническими приборами, так и в самом производстве гальванопластики» [Л. 22]. И тут же он выдвигает перед широкой читательской публикой задачу овладеть новой областью знаний, которая достигла такого уровня развития, что можно и должно говорить о практи-

Автограф письма Фарадея к Якоби.  
17 августа 1839 г. (публикуется впервые).

№ 111.

Royal Institution  
London

17 August 1839

My dear Sir

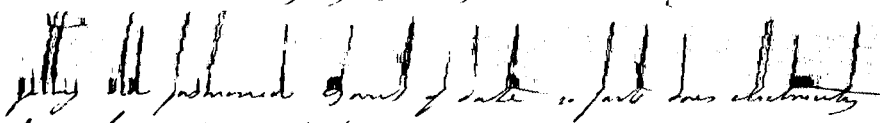
Your letter was an honor for hands of which I had no expectation; and I thank you most heartily for it. I only wish I had in answering it good news like you are to send, but mine will be a very poor letter in comparison with yours for I have not been strong enough of late to work much and have nothing at present to tell. I felt so much interest in your letter of the great result of which you gave me so good an account that I have translated it of such an abstract nature to the Editors of the Philosophical Magazine hoping that they will think it fit news for their readers. I trust I have not offended you in this but I wished them to know of your results as well as myself. I wish or other own means of communication are so bad that we obtain the news from the Mouth of Europe in a very imperfect way and I who unfortunately do not read German am too old to have to

and our ignorance of the great things in electrical  
science which are described in that language

I shall hope as soon as convenient to hear in one way  
or another further results of your experiments especially as  
regards the application to mechanical purposes of I must  
fervently wish that your great experiments should meet  
with the high rewards they so richly deserve of course I  
am a little dubious of having the probability of the  
power obtained but I am also aware that in first  
applications the cost is no guide to the power at which  
the power may ultimately be obtained I think only  
of putting an electric engine on a machine with the Great  
Western or the British Green I and my train across the  
Atlantic by it or even to the East Indies! what a glorious  
thing it would be.

The plates too which you sent me are very kind of  
complimentary but they are also full in theory of practice  
exceedingly successful of all who have seen them have  
admired them and as to your demand light your  
account is most exciting I hope you will soon let us know  
how your battery is constructed and also the arrangement of  
the other part of the apparatus

Will you do me the favour to mention me to  
Mr Long & Perist as also to Mr Trapp. I do not know<sup>130</sup>  
them personally or by letter but by their labours I do  
and beg to present my sincere respects

I have lately sent my Reminders (which are  
  
pencil sketches of some of date is just over electricity  
progr. ) into a collected form they make an 8<sup>th</sup> volume  
I beg to offer copy to you for your kind acceptance  
I shall give it into the hands of Mr Hudson at  
the Royal Society to send by the first opportunity  
with the transactions of the R. Society I hope you  
will receive it safe

I am My dear Sir

Your Very Obedt & most faithful Servt

W. Sturgeon

F/

W. Sturgeon  
at the R. S.

are in sad ignorance of the great things in electrical science which are described in that language

I shall hope as soon as convenient to hear in one way or another further results of your experiments especially as regards the application to mechanical purposes of I must fervently wish that your great experiments should meet with the high reward they so richly deserve of course I am a little conscious of being the probable offender of the power obtained but have also aware that in first applications the cost is no guide to the price at which the power may ultimately be obtained I think only of putting an electric magnet machine into the Great Western or the British Green & sending them across the Atlantic by it or even to the East Indies! what a glorious thing it would be.

The plates too which you sent me are very kind & complimentary but they are also full in theory & practice exceedingly laudable of all who have seen them here admire them and as to your Diamond Light your account is most exciting. Hope you will soon let us know how your battery is constructed and also the arrangement of the other part of the apparatus

Will you do me the favour to mention me to Mr Long & Pascoe as also to Mr Tuff. I do not know them personally or by letter but by their labours I do and beg to present my sincere respects

I have lately put my Reminders (which are getting old fashioned sort of date & facts does electricity progress) into a collected form they make an odd volume I beg to offer copy to you for your kind acceptance & shall give it into the hands of Mr Hudson at the Royal Society to send by the first opportunity with the transactions of the R. Society. I hope you will receive it safe

I am My dear Sir

Your Very Obedt & most faithful Servant

W. Sturgeon

2/11

S. Jacob  
as directed

ческом ее приложении. «...Уже настало время и гальванические силы представлять промышленной публике для полезного употребления и не отнимать у нее более тех выгод, какие от этого проистекают могут. Таким образом, гальванизм будет служить новым примером и подкреплением в том все более и более распространяющемся мнении, что наука и практика должны взаимно поддерживать и усовершенствовать друг друга, что взаимное их действие друг на друга всегда будет иметь полезные следствия, что недоверчивость, стеснявшая до сих пор людей практических от людей ученых, теперь не может более иметь места и должна совершенно уничтожиться, что один другим не должны отказывать в справедливом уважении и, наконец, что и самое малое зерно, посаженное наукою, рано или поздно, но непременно принесет плоды» [Л. 22, стр. IX—X].

Якоби иллюстрацией высказанного здесь положения служат исследования самого Якоби. Инженер-практик, он пользовался великими открытиями в области электромагнетизма, чтобы приложить их в технике. Но не только это является отличительной чертой его деятельности. Якоби выделялся среди своих современников, как правильно это отметил Эрстед, «сочетанием экспериментальной и математической основательности».

Характерным в этом отношении является изобретение гальванопластики.

Якоби отмечал, что исследование этого наблюдения было «предметом совершенно побочным», но он не упускал его из виду и с самого начала был проникнут мыслью, что оно «может быть использовано для какого-нибудь полезного процесса с технической точки зрения» [Л. 1—22, стр. VI].

За работы, подобные «Гальванопластике» Якоби, в России в 30-е годы XIX столетия Академия наук присуждала так называемые Демидовские премии, которыми были увенчаны лучшие произведения того времени. Демидовская премия в 5 000 руб. была присуждена и Якоби в 1840 г. От получения ее он, впрочем, отказался, пожелав, чтобы эти деньги пошли на расходы, связанные с деятельностью Комиссии для приложения электромагнетизма к движению машин, и, частично, на покупку аппаратуры для физического кабинета Академии.

Когда Якоби писал «Гальванопластику», появился претендент на изобретение, и в печати возник спор о приоритете. В предисловии к своей книге Якоби подчеркивал: «Гальванопластика исключительно принадлежит России. Здесь она получила свое начало и свое образование», и опубликование этого открытия дало «возможность для всеобщей пользы сделать этот способ вполне известным и тем самым подарить его и остальной Европе» [Л. 22].

Будучи переведено на многие иностранные языки, это сочинение «скоро появилось во многих иностранных, в особенности английских, газетах и в разных ученых и технических журналах». «Я, — писал Якоби, — нарочно ссылался на эти печатные официальные документы затем, чтобы не иметь надобности упоминать о тех опытах, которые в других местах произведены были вследствие полученных сведений о существовании моего открытия».

Англичанин Спенсер, оспаривающий у Якоби право называться изобретателем гальванопластики, меньше всего имел на это оснований, что, впрочем, признавалось и его соотечественниками. Сохранилось немало документов и материалов, связанных с этим спором. Мы же ограничимся тем, что приведем письма к Якоби двух англичан — Дж. Локита и Г. Диркса. Эти документы, как нельзя лучше опровергают какие бы то ни было притязания на право, принадлежавшее Якоби. Они сохранились в бумагах Якоби и в 1889 г. были опубликованы на русском языке [Л. 19, № 1, л. 499 и 501]. Приведем их текст.

Манчестер, 17 февраля 1841 г.

Профессору Якоби

Пользуясь случаем, чтобы препроводить через посредство приятеля, отправляющегося в Петербург, экземпляр перевода Вашего сочинения о гальванопластическом искусстве, равно как и экземпляр недавно вышедшего номера *Mechanics Magazine* (статья Диркса

в этом журнале, стр. 73—79 и 115—128, 1844. — М. Р.), где Вы найдете Вашего английского соперника мистера Спенсера лишенным его лавров; ему в конце концов придется отступить от всех притязаний на изобретение электрометаллургии.

Я осмелился обратиться к Вам, полагая, что я не совсем безызвестен Вам, и имел честь быть в числе друзей, познакомившихся с Вашим братом в бытность его в Манчестере, и принимать его в своем доме во время съезда Британской Ассоциации. Я и другие джентельмены Манчестера горячо желаем утвердить за Вами бесспорное право на честь открытия, о котором идет речь, и если Вы расположены передать мне какие-либо сведения, которые послужат средством для выяснения истины, я сочту за честь и удовольствие быть Вам полезным.

Остаюсь Ваш почительнейший

Джозеф Локкитт

21 февраля 1841 г.

Профессору Якоби

Осмеливаюсь выслать Вам безотлагательно экземпляр второй части моей статьи, опровергающей притязания мистера Томаса Спенсера на открытие электрографии — предмет, который, я убежден, должен особенно интересоваться Вас. Я знаю от мистера Локкита из Манчестера, что он уже выслал Вам первую часть моего сообщения.

Если какие-нибудь сведения появятся в Ваших журналах, касательно интересных фактов, которые я привел по этому предмету, я сочту за особое мне одолжение, если Вы поставите меня в известность. Я снесся с д-рами Фарадеем, Юром и Брэндом на этот счет, и, повидимому, они были довольны моими разъяснениями. Мистер Спенсер — грубый и упрямый человек и, кажется, решил стать гением, хотя природа, очевидно, предназначает ему быть только механиком.

Имею честь пребывать Вашим покорным слугой

Генри Диркс

Несмотря на то, что в печати была показана полная несостоятельность притязаний Спенсера, спор о приоритете не прекращался, и через два года в него был втянут и сам Якоби. Якоби счел необходимым огласить на общем собрании Академии наук 4 марта 1846 г. письмо свое к Беккерелю от 20 февраля 1846 г. (уже упоминавшееся здесь).

Вот что писал Якоби:

«Письмо, которое Вы сделали мне честь направить в мой адрес 20 ноября прошлого года и которое я получил только в январе месяце текущего года, было мне тем более приятно, что оно представляет мне случай исправить распространенное в отношении моего изобретения гальванопластики заблуждение, — заблуждение, которое можно было бы избежать, если бы обратиться к датам печатных документов, всем известных, или же к датам менее известных документов, но которые легко можно было бы достать. Если я молчал до настоящего времени, если я не предъявлял никаких требований, то только потому, что я рассчитывал на силу времени, которое исправляет слишком преждевременные суждения и уничтожает стремления, возбужденные самолюбием или честолюбием желанием заставить говорить о себе. Я ограничусь здесь только изложением истории моего открытия».

Далее Якоби сообщает факты, изложенные нами выше, и выражает надежду, что крупнейший авторитет в области электрохимии, со своей стороны, «придаст надлежащую гласность» его письму, чем внесет ясность в этот вопрос.

Однако, Якоби пришлось коснуться этого вопроса еще раз через двадцать лет. В 1867 г. в Париже была организована Всемирная выставка, на которой существовал отдел гальванопластики. Экспонаты, выставленные Якоби, демонстрировали его заслуги в этой области электротехники и принесли ему заслуженную славу и награду. По настоянию дирекции Музея искусств и ремесел Якоби выступил с публичной лекцией, в которой он не мог пройти мимо притязаний Спенсера, хотя, как подчеркивал Якоби, ему

было «противно вступать в дискуссии относительно приоритета». Успех, который Якоби имел на этой выставке, был огромный. Знаки внимания со стороны выдающихся ученых мира, съехавшихся на эту выставку, воздавали должное изобретателю гальванопластики и стране, где она зародилась. «Все страны, — говорил Якоби, — собравшиеся на публичную лекцию, — из которых Вы не исключаете, конечно, мою страну, имеют право потребовать себе часть, приходящуюся на их долю, из того огромного сокровища, которые представляют собою человеческие знания в целом». В области электротехники России принадлежала значительная доля, и Якоби с полным правом мог закончить представленный Академии наук «Отчет о гальванопластике на Парижской всемирной выставке в 1867 г.» [Л. 23] следующими словами:

«В вышеизложенном мы пытались дать небольшую, но по возможности полную критику развития и настоящего состояния гальванопластики в том виде, как она представлялась на Марсовом поле; мы указали также и на развитие ее применений в будущем. Созаемся, что обязаны предпринимчивому духу нашего времени, содействию счастливых обстоятельств, здравомыслию и деятельностью лиц, поименованных нами в этом отчете, — тем счастьем, что уже успели видеть развитие зачатков прогресса, нами посеянных. Гальванопластика уже достаточно выказала свою живую силу на тех замечательных приложениях, которых удостоилась в разнообразнейших отраслях человеческой деятельности, в науках, в искусстве и промышленности, и нам приятно надеяться, что ей предстоит и будущность не менее блистательная».

При жизни Якоби история созданной им области электротехники была предметом публичного доклада профессора А. С. Владимирского на годовом торжественном собрании Московского технического училища (ныне МВТУ) [Л. 24]. С тех пор научная общественность нашей страны не раз отмечала даты, связанные с изобретением гальванопластики. Особенно широко было отмечено 50-летие гальванопластики. Этот юбилей вылился в большое празднество русской науки в 1889 г. в Петербурге. В Соляном городке Русское техническое общество устроило большую выставку, имевшую до двадцати отделов, демонстрировавших достижения техники гальванопластики в России. Первый отдел выставки был посвящен изобретателю гальванопластики, «его жизни и творчеству, особенно в той области, родоначальником которой он является» [Л. 25].

Русское техническое общество так объясняло принятую им организацию выставки: «Полстолетия тому назад было сделано одно из важнейших открытий в области прикладных знаний, оказавшее громадное влияние на развитие и распространение наук и искусств. Открытие это — гальванопластика. В истории образованности открытие гальванопластики должно быть приравнено к открытию книгопечатания, а для России открытие имеет еще и другую цену — оно сделано в России, русским ученым, академиком Б. С. Якоби» [Л. 26].

### Литература

1. Записка Б. С. Якоби министру финансов, 1872. Архив Академии наук СССР, ф. 1187, опись 1, л. 2.
2. Юрьевский, бывший Дерптский, университет за столет его существования (1802—1902). Том I, первый и второй периоды (1802—1865). Исторический очерк Е. В. Петухова, стр. 408, 1902.
3. On Some New Electro-magnetical Motions, and on the Theory of Magnetism. By M. Faraday. Quarterly Journal of Science, Literature and Arts, v. XII, p. 74—96, 1822.

Русский перевод опубликован в книге «Электродвигатель в его историческом развитии. Документы и матери-

лы». Составили Д. В. Ефремов и М. И. Радовский, под редакцией В. Ф. Миткевича. Изд. Академии наук СССР, 1933.

4. Электродвигатель в его историческом развитии. Изд. Академии наук СССР, 1936.

5. Mémoire sur l'application de l'électromagnétisme au mouvement des machines par Jacobi.

Русский перевод опубликован в книге «Электродвигатель в его историческом развитии», стр. 148—180.

6. L'Institut, Journal general des sociétés et travaux scientifiques, v. 2, p. 394—395, 1834.

7. К. Маркс. Капитал. Гос. изд., т. I, стр. 285, 1930.

8. Die galvanische Kette, mathematisch Bearbeitet von Dr. G. S. Ohm. Berlin, 1827.

9. Архив Академии наук СССР, фонд 44, опись № 1.

10. Recueil des actes de la séance publique de l'Académie Impériale des sciences de Saint-Petersbourg, p. 1—4, 1838.

11. Архив Академии наук СССР, ф. 187, опись 1, № 73, л. 34. Отчет этот опубликован дважды: в «Журнале Министрства народного просвещения», XXI, 1839 и в «Записках Русского технического общества», т. XXVII, № 2, 1900, в статье «Электромгнитный бот Б. С. Якоби», написанной сыном Якоби. Статья издана и отдельной брошюрой в том же году.

12. С.-Петербургские ведомости и St.-Petersburgerische Zeitung, № 11, 14 января, 1839.

13. Н. Б. Якоби. «Электромгнитный бот Якоби», СПб., 1903.

14. Архив Академии наук СССР, ф. 187, опись 1, № 74, л. 30.

15. «Северная Пчела», газета политическая и литературная. № 217, 27 сентября 1839.

16. Glasgow constitutional, № 533, 23 сентября, 1840.

17. Report of the British Association for the Advancement of Science, p. 18—24, 1840. Annalen der Physik und Chemie, The Annals of Electricity, magnetism and chemistry, Annali di Fisica, Chimica, e Matematiche, The Athenaeum.

В русском переводе это произведение Якоби напечатано в книге «Электродвигатель в его историческом развитии», стр. 357—376.

18. Динамомашин в ее историческом развитии. Составили Д. В. Ефремов и М. И. Радовский, под редакцией В. Ф. Миткевича. Изд. Академии наук СССР, стр. 113, 1934.

19. Краткое содержание письма в Bulletin Scientifique, т. IV, № 95, стр. 358, 1838. Полный текст по русски в «Записках Русского технического общества», № 4, стр. 9—11, 1889.

20. Публичная лекция, прочитанная Б. С. Якоби в Париже, в Музее искусств и ремесел, июнь, 1867. Annales du Conservatoire impérial des Arts et Métiers, т. VII, стр. 541—556.

21. Санктпетербургские ведомости, № 291, 24 декабря, 1839.

22. Б. С. Якоби. Гальванопластика или способ по данным образцам производить разные изделия из металлов раствором, помощью гальванизма. СПб., 1840.

23. Записки Академии наук, т. V, кн. 1, стр. 1—32, 1869.

24. Речи и отчет, произнесенные в Торжественном собрании Московского технического училища, 5 сентября 1869 г., стр. 1—17.

25. Каталог юбилейной выставки гальванопластики, устроенной Русским техническим обществом в память пятидесятилетия открытия гальванопластики академиком Б. С. Якоби, 1889.

26. А. А. Ильин. Борис Семенович Якоби. Исторический очерк изобретения гальванопластики. СПб., стр. 2, 1889.



## Высокочастотный нагрев в электровакуумной промышленности

До последнего времени область использования высокочастотного нагрева в электровакуумной промышленности ограничивалась нагревом деталей электровакуумных приборов для их обезгаживания при откачке.

Рабочая частота, используемая для нагрева деталей, изменяется от 0,2 до 1,5 МГц в зависимости от размера и материала деталей, подлежащих нагреву.

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к ламповым генераторам для целей высокочастотного нагрева, являются минимальная стоимость оборудования и эксплуатации, высокая отдача и полная безопасность для работающих. Качество высокочастотных колебаний, важное для генераторов радиопередающих устройств, здесь не имеет существенного значения. При питании от источника переменного тока генераторные лампы имеют универсальное использование, выполняя одновременно функции вентиляторов, что дает возможность строить маломощные переносимые передвижные генераторы, получившие в заводской практике название «бомбардиров». Принципиальная схема и эскиз такого генератора приведены на рис. 1.

Интенсивность нагрева регулируется либо реостатом накала генераторных ламп, либо путем изменения расстояния между индуктором и нагреваемой деталью; катушка индуктора одновременно выполняет роль индуктивности колебательного контура.

В случае питания от источника переменного тока (при условии равенства амплитуды переменного и постоянного напряжения источника питания анодной цепи) при одноконтурной схеме колебательная мощность в 4 раза меньше, чем при питании от источника постоянного тока. Для увеличения колебательной мощности приходится повышать либо амплитуду переменного напряжения, либо амплитуду анодного тока, либо одновременно и то и другое. Другим путем повышения колебательной мощности является применение двухтактных и трехтактных схем, в которых генерирование колебаний происходит в течение всего периода низкой частоты.

При значительной колебательной мощности (10–40 кВт) строят выпрямители на газотронах по простой или мостовой трехфазной схеме, которая дает выпрямление, соответствующее шестифазному; сглаживания пульсации при этом в большинстве случаев не требуется.

Такие генераторы обычно выполняются с промежуточным контуром и служат для прогрева деталей крупных электровакуумных приборов, а также для обслуживания автоматов откачки, где включается параллельно несколько нагревательных индукторов; последние изготавлиются в виде соленоидов (для прогрева деталей радиоламп) или в виде плоских спиралей (для распыления геттеров и ампулок с ртутью).

Для изготовления нагревательных индукторов используется исключительно красная медь как наиболее электро- и теплопроводный материал; лучше всего выполнять индуктор из медной трубки, охлаждаемой протекающей по ней водой.

Производство мощных генераторных ламп, а также ламп микроволновой серии вызвало необходимость искать новые пути применения высокочастотного нагрева для сварки металлов со стеклом и сварки различных сортов стекол. В частности, к новым методам высокочастотного нагрева следует отнести спайку стеклянных деталей (чаще всего трубок небольшого диаметра) с помощью металлических колец толщиной 0,3–0,4 мм, накладываемых на стык между трубками. Материал колец: платинит для легкоплавких стекол и молибден или вольфрам для тугоплавких стекол. Кольцо после установки на стеклянную деталь нагревается в специальной одновитковой катушке генератора; нагретое кольцо в местах соприкосновения со стеклом расплавляет последнее, в результате чего получается хорошая спайка стеклянных трубок.

Особого внимания заслуживает так называемая высокочастотная факельная сварка стекла, которая может найти широкое применение при сваривании стеклянных изделий больших диаметров и значительной толщины, например при заварке ламп-фар и при изготовлении электронно-лучевых трубок, особенно же трубок с большим экраном. Приспособление для факельной сварки стекла, представленное на рис. 2, состоит из укрепленного на стойке 1 стального кольца 2, внутренняя образующая которого имеет профиль боковых стекол завариваемой колбы. В кольцо 2 устанавливается колба катодно-лучевой трубки 3. Стеклянный плоский экран диаметром до 300 мм из стекла толщиной 8–12 мм прикрепляется к шлифо-

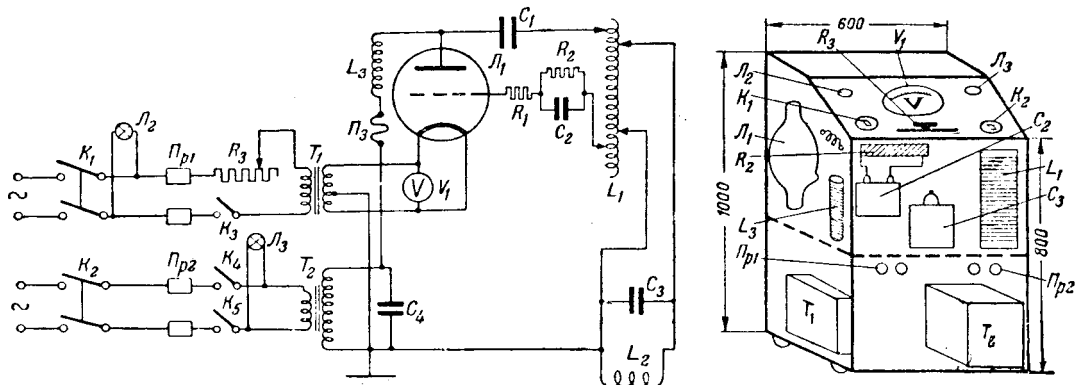


Рис. 1. Принципиальная схема и расположение деталей генератора высокой частоты.

$K_1$ —двухполюсные рубильники;  $K_2$ —двухполюсные рубильники;  $K_3$ —дверная блокировка;  $K_4$ —дверная блокировка;  $K_5$ —ножная кнопка;  $T_1$ —трансформатор накала;  $T_2$ —трансформатор;  $R_1$ —антипаразитное сопротивление;  $R_2$ —сопротивление утечки сетки;  $R_3$ —реостат накала;  $L_1$ —катушка потенциометра;  $L_2$ —катушка колебательного контура;  $L_3$ —анодный дроссель;  $C_1$ —блокировочный конденсатор;  $C_2$ —конденсатор утечки сетки;  $C_3$ —конденсатор колебательного контура;  $C_4$ —конденсатор для защиты источника питания;  $P_{p1}$  и  $P_{p2}$ —пробковые предохранители;  $P_3$ —плавкая вставка;  $V_1$ —вольтметр накала;  $L_1$ —генераторная лампа;  $L_2, L_3$ —сигнальные лампочки.

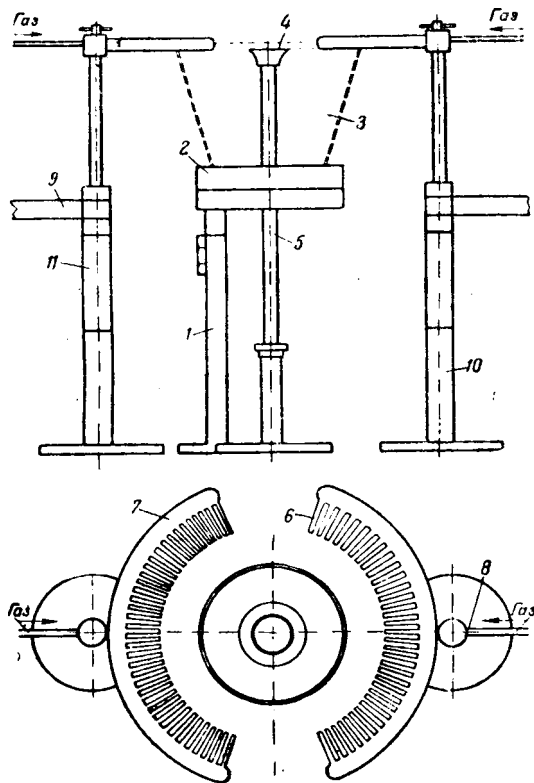


Рис. 2. Эскиз приспособления для факельной сварки колб катодно-лучевых трубок.

бальным краям колбы с помощью специального присоса 4, подключенного через пустотелый вращающийся шпиндель 5 к форвакуумной системе. Герметичность присоса достигается благодаря резиновой пробке, скользящей по шпинделю 5 и закрывающей отверстие в кольце 2. Скорость вращения колбы — 30 об/мин. Предварительный прогрев завариваемого стекла производится с помощью 52 газовых горелок 6, укрепленных на стальных дугах 7, к которым через трубки 8 подводится светильный газ, смешанный в определенном соотношении с воздухом. Высокая частота подводится от генератора мощностью 40 kW с длиной волны 600 м через медные или латунные хомуты 9, укрепленные на верхней части латунных стоек 10, нижняя часть которых изолирована от верхней эбонитовыми стержнями 11. Предварительный прогрев свариваемых деталей газовыми горелками поднимает температуру стекла настолько, что оно значительно повышает свою электропроводность. После этого включается поле высокой частоты; пламя горелок является электропроводящим вследствие того, что в нем имеется большое количество ионизированного газа. Токи высокой частоты, проходя по разогретому до размягчения стекла, интенсивно разогревают и сплавляют его. Регулировка температуры свариваемого стекла достигается изменением сварочного тока. Метод особенно эффективен при сварке тугоплавких стекол, например кварцевого стекла.

Дисковые спаи меди со стеклом, имеющие в целом ряде электровакуумных приборов в настоящее время широкое применение, почти исключительно выполняются с помощью высокочастотного нагрева на специальных вертикально- или горизонтально-заварочных станках (рис. 3).

Получение рантовых спаев металла со стеклом до последнего времени являлось узким местом в технологии изготовления мощных генераторных ламп, а также приборов, работающих в сантиметровом и дециметровом диапазоне волн. Только благодаря применению высокочастотного нагрева эта проблема теперь решена полностью.

Приспособление для высокочастотной сварки стеклянных трубок и колб с медными и коваровыми стаканами диаметром до 150 мм (рис. 4) с успехом используется в серийном производстве, давая значительный экономиче-

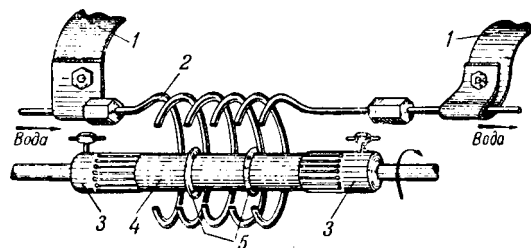


Рис. 3. Заварка медных дисков в стекло на горизонтальной заварочной машине с помощью высокочастотного нагрева. 1—медная шина от генератора высокой частоты; 2—катушка индуктора, охлаждаемая проточной водой; 3—зажимы для стекла; 4—стеклянные трубки; 5—медные диски.

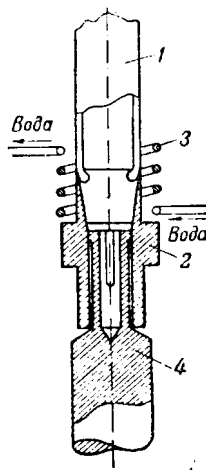


Рис. 4. Рантовая спайка меди со стеклом с помощью высокочастотного нагрева.

1—стеклянная трубка; 2—медный конус; 3—катушка индуктора, охлаждаемая водой; 4—свеча из жароупорной стали.

скать внутрь металла только на незначительную глубину. Концентратор питается от генератора высокой частоты мощностью порядка 40 kW при длине 500—600 м. Питание катушки производится импульсами от специального реле времени (датчика импульсов), которое размыкает первичную цепь трансформатора высокого напряжения. Генератор находится под напряжением в течение рабочего импульса, что облегчает работу ламп генератора. Могут использоваться маломощные лампы в расчете на покрытие только средней, но не импульсной мощности.

Помимо высокочастотной сварки корпуса и ножек металлических радиоламп и высокочастотной пайки отдельных деталей высокая частота может быть использована для сварки двух разнородных металлов (в частности, никеля и кобальта) в атмосфере водорода.

Высокочастотный нагрев может быть использован также при производстве и обработке таких тугоплавких металлов, как молибден, тантал и вольфрам, находящих большое применение в электростационарных приборах.

### Литература

1. Г. И. Бабат. Применение индукционного нагрева в электровакуумной промышленности. Гл. XVII. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. Госэнергоиздат, 1946.
2. J. R. Taylor. High-Speed Soldering with Radio-Frequency. Power. Electronics, т. 17, № 2, стр. 114 и 232, 1944.
3. R. A. Ammon. R-F. Soldering of Metal — to — Glass Seals. Electronics, т. 19, № 3, стр. 120, 1936.
4. H. G. Vogt. Metallized Glass for Low Cost Joining of Glass to Metal. Materials and Methods, т. 75, № 6, стр. 81, 1947.

## Об аналитическом методе электрического расчета проводов тяговой сети

По поводу статьи К. Г. Марквардта в журнале „Техника железных дорог“ (№ 7, 1947)

Опубликованная в журнале «Техника железных дорог» статья доктора техн. наук, проф. К. Г. Марквардта «Аналитический метод расчета проводов контактной сети» содержит много противоречий и ошибок, дезориентирующих читателей.

В вводной части К. Г. Марквардт, заявляя, что все прежние методы расчета тяговых сетей неправильны, противопоставляет им собственный, «новый» метод. В защиту своего ответственного утверждения он приводит, в основном, два довода: 1) что прежние методы «исходят из неверного, наперед заданного, постоянного числа поездов на линии» и 2) что в прежних методах расчеты основывались на неверном принципе, так как не учитывались реальные средние значения и не производился анализ влияния организации движения. После этого можно было бы ожидать, что в рассматриваемой статье указанные вопросы уточнены и задача решена К. Г. Марквардтом по-новому. Однако, к удивлению читателя, автор, позабыв о собственном предисловии, вводит в свои расчеты опять... то же самое, наперед заданное, постоянное число поездов на линии: именно,  $n_1$  — поездов на одном пути и  $n_2$  — поездов на другом [см. обозначения к формуле (14), в которой, по видимому, перепутаны индексы]. Между тем, по мнению автора, принятие постоянного числа поездов на линии «практически обесценивает рассматриваемые методы».

Не лучше обстоит дело и с «новым» принципом расчета. Заявляя, что до него все неправильно подходили к методике расчета тяговых сетей, К. Г. Марквардт в своей работе, по существу, исходит из принципов расчета, опубликованных проф. В. Е. Розенфельдом еще в 1937 г. в §§ 21 и 23 его книги «Расчет тяговых сетей» и в дальнейших развитых им в ряде докладов (например, в ЛИИЖИТ, 1945 г.). В одном из немногих мест, где автор пытается по-новому учитывать вероятности, — в рассуждениях к расчетной формуле (15), служащей для определения падения напряжения, — он совершает ошибку, умножая второй член формулы на отношение  $n_0 - 1$  к  $n_0$  (где  $n_0$  — количество перегонов на участке) и утверждая, что вероятность нахождения поезда на одном пути относится к вероятности расположения его на другом пути, как  $n_0 - 1$  к  $n_0$ . Ошибка заключается в том, что здесь вообще нельзя говорить о вероятности нахождения поезда на том или другом пути, если заранее принято количество поездов  $n_1$  (кроме рассматриваемого) на одном пути и  $n_2$  — на другом. По той же причине, видимо формулы (15), неверна и другая, окончательная формула (26). В связи с этим утверждение К. Г. Марквардта о негодности старых методов и о достоинствах его «нового» метода представляется, по крайней мере, странным.

Однако, основная ошибка автора как с точки зрения теории вероятностей, так и с точки зрения железнодорожного дела (последнее особенно печально) заключается в том, что автор связывает пропускную способность со средним значением среднего падения напряжения на лимитирующем перегоне. Так как вероятность превышения среднего значения составляет примерно 0,5, то автор считает, по видимому, допустимым, чтобы в 50% случаев не обеспечива-

лась запроектированная пропускная способность (в тех условиях, когда она определяется именно падением напряжения). Ошибочность подобного подхода очевидна и не нуждается в дальнейших доказательствах. В действительности для данного расчета следовало исходить не из математического ожидания падения напряжения, а отыскивать максимальное значение среднего падения напряжения.

Таким образом, исходные положения рассматриваемой статьи порочны, не соответствуют поставленной задаче и обесценивают всю статью со всей ее «новой методикой».

Рассмотрим все же предложенные автором расчетные формулы, хотя бы с точки зрения возможности использования их для расчета среднего падения напряжения. Как в вводной части, так и на протяжении всей статьи автор настаивает на том, что его метод отличается интегрированием всех без исключения величин только по времени, а не по пути. Не входя в обсуждение того, действительно ли это так существенно уточняет расчет, рассмотрим выкладки К. Г. Марквардта с точки зрения подчеркиваемого им же принципа необходимости вести все интегрирование по времени.

Выводы формул начинаются с простейшего случая одностороннего питания. И вот на стр. 7 мы неожиданно сталкиваемся со столь порицаемым интегрированием по пути, ибо среднее значение определяется автором «величиной средней ординаты площади  $FF'M'D'D$ ». Площадь же эта построена в функции и пути и, следовательно, средняя ордината ее представляет собой как раз среднее значение по пути. Напрасно автор пытается спасти положение, умножая полученную среднюю ординату на коэффициент  $s$ , представляющий собой отношение среднего по времени значения расстояния поезда от питающего пункта к среднему по пути значению этого расстояния. Умножение на коэффициент  $s$  имеет, очевидно, смысл только тогда, когда падение напряжения прямо пропорционально расстоянию поезда от питающего пункта. Во всех же прочих случаях это умножение неправильно и может даже усугубить погрешность. Из-за этой ошибки неверны формулы (7) и (8).

В формулах (9) и (10) к указанной ошибке добавляется еще одна: автор множит на коэффициент  $s$  первые члены своих формул, которые, как это видно из формул (3) и (4), и без того представляют собой интегралы, взятые по времени. Те же ошибки содержатся в формулах (11), (12), (16) и (17). Совсем непонятно, зачем введен коэффициент  $s$  в формулу (13). Непонятно также назначение формулы (14). Помимо того, что она содержит те же ошибки, что и формулы (7) и (8), сама постановка вопроса в данном случае неправильна, так как эта формула пригодна лишь для случая, когда на рассматриваемом пути находится только один поезд.

Ошибки, допущенные автором при выводе формул для случая одностороннего питания, повторяются в случаях двустороннего и узлового питания. Автор множит на тот же коэффициент  $s$  всю формулу (18). Между тем, на  $s$  надо множить лишь величину  $l_0$ , т. е. вместо формулы

$$\Delta U''_{km} = \Delta U'_m \frac{l - l_0}{l - x_m} s \text{ написать } \Delta U''_{km} = \Delta U'_m \frac{l - l_0 s}{l - x_m}.$$

Можно было бы подумать, что это просто опечатка, но та же ошибка упорно повторяется в формулах (21), (22), (24), (29), (33) и (34). Как и раньше, вместо интегрирования по времени, в формуле (20) автор переходит к расчету средней ординаты площади, построенной в функции пути, вследствие чего становятся ошибочными формулы (20), а также и без того ошибочные формулы (21) и (22). Все эти погрешности суммируются в формуле (23), в которой особенно явно проявляется неправильное применение коэффициента  $z$ .

Остается констатировать, что вся статья К. Г. Марквардта представляет собой нагромождение логических и математических ошибок.

Достаточно подчеркнуть, что, помимо неправильных исходных принципов из 37 нумерованных формул, как было показано выше, неверными являются формулы 7,

8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 29, 33 и 34; верными же оказались лишь некоторые втростепенные промежуточные формулы!

Настоящее письмо было составлено в результате суждения статьи К. Г. Марквардта на совместном заседании кафедр электроснабжения и электрических железных дорог Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (ЛИИЖТ).

По поручению кафедры электроснабжения ЛИИЖТ  
Зав. кафедрой доц. С. Е. КУЗИН

По поручению кафедры электрификации железных дорог  
ЛИИЖТ  
Зав. кафедрой доц. Н. Н. СИДОРОВ



## Портативный прибор для испытания изоляции электрических машин

В своей статье «Профилактические испытания изоляции электрических машин» (Электричество, № 2, 1948) А. М. Залесский, а также ряд участников дискуссии по его статье отмечали желательность изготовления портативного прибора для испытания витковой изоляции и изоляции на корпус в обмотках электрических машин с

Результаты полугодового испытания опытной пары в условиях эксплуатации на двух заводах МЭП и в одной из лабораторий ВЭИ позволили приступить к массовому изготовлению такого прибора ВЭИ для промышленности.

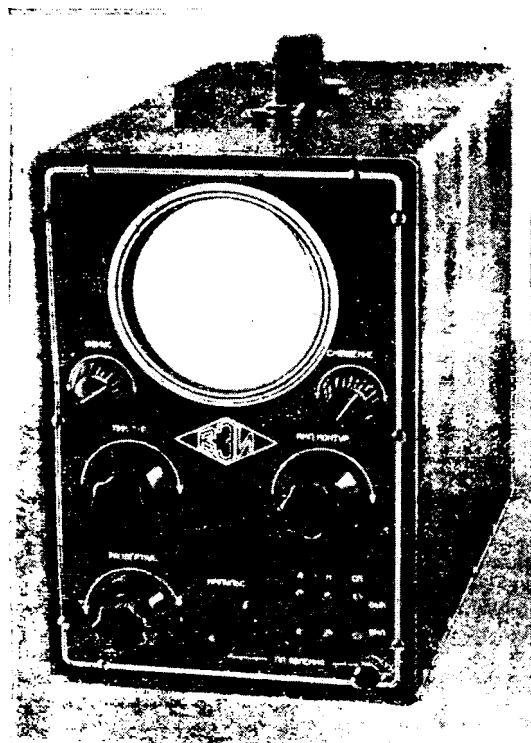
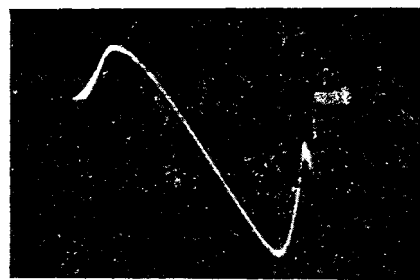
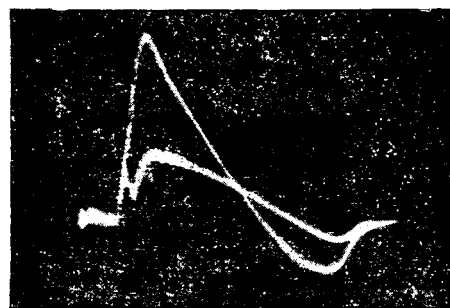


Рис. 1.



а — витковых замыканий нет.



б — один виток из 16 имеет короткое замыкание.

Рис. 2

помощью генератора импульсов. В связи с этим считаем необходимым довести до сведения читателей, что во Всесоюзном электротехническом институте им. Ленина был разработан и изготовлен опытный образец такого прибора, о чем в июне прошлого года нами был сделан доклад на заседании секции электрических машин МОНИТОЭ совместно с электропромышленной секцией НТО МЭИ.

На рис. 1 помещен фотоснимок прибора ВЭИ для испытания и контроля витковой изоляции обмоток электрических машин, а на рис. 2 — осциллограммы, полученные с помощью этого прибора.

Кандидат техн. наук М. В. СМЕРНОВ  
и кандидат техн. наук В. Д. МАЖУГ



## Второе совещание по координации научной деятельности энергетических учреждений Академии наук СССР и академий наук союзных республик

В мае 1948 г. в Энергетическом институте им. Кржижановского Академии наук СССР состоялось второе совещание по координации научной деятельности энергетических учреждений Академии наук СССР и академий наук союзных республик.

Работы по координации научной деятельности в области энергетики имеют целью дальнейший подъем и мобилизацию больших резервов научных сил братских республик, более рациональное и полное использование экспериментальной базы, со значительной экономией средств, с устранением параллелизма в научной работе и с увеличением темпов и производительности научной работы вообще.

На пленуме и в секциях совещания (энергетической, электротехнической, теплотехнической, электрохимической и гидротехнической) было заслушано и обсуждено 100 научных докладов и сообщений.

Совещание открыл докладом о научных проблемах энергетики академик Г. М. Кржижановский, который подробно осветил итоги, состояние и предстоящие задачи научно-исследовательского фронта в области энергетики. Затем выступили представители энергетических учреждений Академии наук СССР и академий наук союзных республик с краткими сообщениями об основных итогах и перспективах научно-исследовательской деятельности своих учреждений.

В секции *энергетической* вступительный доклад члена-корр. АН СССР В. И. Вейца был посвящен обзору управления научно-исследовательских работ и основных результатов, полученных в отделе общей энергетики ЭНИН АН СССР в 1947—1948 гг., по промышленной энергетике, местной энергетике и электрификации сельского хозяйства и по развитию сложных электроэнергетических систем и их объединений.

По вопросам энергетики сельского хозяйства секция заслушала доклады: доктора с.-х. наук П. Н. Листова (ЭНИН АН СССР) «Схема ЭНИН АН СССР электрификации полеводства в системе комплексной электрификации сельского хозяйства», доктора с.-х. наук А. Г. Захарина (ЭНИН АН СССР) «Местная электроэнергетическая система в сельскохозяйственных районах», кандидата техн. наук Н. А. Караулова (ЭНИН АН СССР) «Вопросы регулирования малых гидроэлектростанций на равнинных реках», доктора техн. наук И. Н. Бутакова (Транспортно-энергетический институт Западно-Сибирского филиала АН СССР) «Локомотивы с противоаварийным, как двигатели сельской электрификации», кандидата техн. наук В. С. Лугового (Киргизский филиал АН СССР) «Энергетические ресурсы малых рек Киргизии и пути их использования для нужд сельской электрификации» и кандидата техн. наук Л. М. Логова (Энергетический институт АН АзССР) «Использование энергии ветра в условиях Апшеронского полуострова».

По вопросам энергетических схем и по научным основам развития энергетических систем и их межрайонных объединений секция заслушала доклады: доктора техн. наук В. В. Болотова (Ленинградская группа ЭНИН) «Основные методические вопросы исследования развития сложных электроэнергетических систем», кандидата техн. наук А. М. Осе-

яна (Водно-энергетический институт АН Армянской ССР) «Электрическая печь в качестве сезонного потребителя-регулятора гидроэнергетической системы», доктора эконом. наук Л. А. Мелентьева (Ленинградская группа ЭНИН) «Некоторые вопросы развития электроэнергетических систем на примере энергетики Ленинградского и Северо-Западного районов», доктора техн. наук А. И. Мухелишвили (ЭНИН АН Грузинской ССР) «Рациональный топливно-энергетический баланс и пути развития энергетики Тбилиси».

В секции *электротехники* были сделаны доклады: члена-корр. АН СССР К. А. Круга (ЭНИН АН СССР) «Моделирование линий передачи постоянным током», члена-корр. АН СССР М. П. Костенко (ЭНИН АН СССР) «Электрооборудование в системе передачи энергии постоянным током высокого напряжения» и доктора техн. наук В. И. Попкова (ЭНИН АН СССР) «Вопросы коронного разряда на проводах линий передачи постоянным током».

Электрическим системам и передаче энергии на дальние расстояния переменным током были посвящены доклады: члена-корр. АН СССР И. С. Брука (ЭНИН АН СССР) «Передача электроэнергии переменным током на дальние расстояния», кандидата техн. наук Х. Ф. Фазылова (АН Узбекской ССР) «Методика анализа нормальных и послеаварийных стационарных режимов в электроэнергетической системе» и кандидата техн. наук М. М. Лебедева (АН Армянской ССР) «Количественный анализ технико-экономических характеристик схем коммутации распределительных устройств».

О выполненной работе в области грозозащиты доложил кандидат техн. наук Л. М. Вильчур (АН Армянской ССР) «Грозопоражаемость и грозовые отключения в высокогорных районах».

Результаты исследований в области новых типов электрических генераторов и двигателей были сообщены в докладе доктора техн. наук А. И. Москвитина (ЭНИН АН СССР) «Тихоходные машины малой мощности».

На электротехнической секции были заслушаны сообщения о полученных некоторыми электротехническими лабораториями ЭНИН результатах разработки новой аппаратуры для научных исследований. Эти работы удостоены Сталинских премий в 1948 г. Об одном таком исследовании сделал доклад доктор техн. наук Л. И. Гутенмахер (ЭНИН АН СССР) «Типы приборов для электро моделирования», а также И. С. Стекольников (ЭНИН АН СССР) «Использование катодных трубок для осциллографирования процессов высоковольтных устройств». Участникам совещания была продемонстрирована работа расчетного стола переменного тока ЭНИН АН СССР.

Опыт Энергетического института им. Кржижановского по совместной работе с академиями наук союзных республик показывает большие возможности научного сотрудничества. Объединение усилий нескольких институтов будет значительно способствовать быстрейшему разрешению больших задач послевоенной сталинской пятилетки в области энергетики.

Кандидат техн. наук Г. А. МАТВЕЕВ  
и инж. А. Б. МАРКИН



## Всесоюзная научно-техническая сессия по обобщению опыта эксплуатации кабелей и кабельных сетей

23—27 марта 1948 г. в Москве состоялась организованная МЭС и ВНИТОЭ научно-техническая сессия по обобщению опыта эксплуатации высоковольтных кабелей и кабельных сетей. Актуальность поставленных на обсуждение сессии вопросов вызвала участие в работе сессии около 350 человек, в том числе с периферии более 250 делегатов. Сессия привлекла также внимание большого количества гостей—представителей инженерно-технической общественности московских заводов и учреждений и студентов ряда столичных вузов. Помимо работников энергосистем МЭС на сессии были представлены: Министерство коммунального хозяйства, Министерство черной металлургии, Министерство химической промышленности и др.

С докладами и сообщениями выступили 39 человек. Доклады по общим вопросам были сделаны на пленарном заседании, а специализированные по секциям.

С докладом «Задачи эксплуатации кабельных сетей» выступил кандидат техн. наук И. А. Сыромятников (технический отдел МЭС). Докладчиком были изложены основные задачи энергетиков, работающих в области эксплуатации кабельных сетей, заключающиеся в повышении общей культуры эксплуатации, в бесперебойном снабжении потребителей электроэнергией, а также в изжитии аварий и снижении потерь в сетях и повышении качества электроэнергии. Особое внимание в докладе было уделено роли планового-предупредительного ремонта и профилактических испытаний для повышения бесперебойного электроснабжения. Докладчик особо подчеркнул, что одновременно с улучшением качества выпускаемых заводами кабелей, освоением и выпуском кабелей улучшенных конструкций Министерство электропромышленности должно обеспечить комплектную поставку вместе с кабелями всей необходимой кабельной арматуры и гарнитуры (кабельных муфт). Эксплуатация кабелей выдвигает много вопросов, требующих научно-исследовательской разработки, для чего в системе МЭС должна быть создана кабельная лаборатория; одновременно должны оживить свою работу лаборатории крупных кабельных сетей.

Доклад «Перспективы развития высоковольтных кабелей» сделал доктор техн. наук, проф. С. М. Брагин (МЭИ). Развитие электроснабжения требует значительного увеличения выпуска силовых кабелей на напряжения до 35 kV, при одновременном улучшении их качества. Должно быть организовано регулярное производство высоковольтных кабелей с газом под давлением и маслонаполненного типа на 60—220 kV. В докладе была приведена классификация основных типов кабелей и основные требования эксплуатации к высоковольтным кабелям. Докладчик осветил пути развития конструктивных форм и технологии изготовления силовых кабелей. Современное состояние кабельной техники позволяет осуществить надежно работающую кабель на повышенное рабочее напряжение.

Проф. С. С. Городецкий (ЦНИИ КП МЭП) сделал на пленарном заседании два доклада: «Новые конструкции кабелей, кабельной гарнитуры и аппаратуры и перспективы их освоения отечественными заводами» и «Физика явлений, происходящих в изоляции кабелей постоянного тока высокого напряжения». Задача создания конструкции кабеля со сплошными жилами сечением до  $3 \times 50 \text{ mm}^2$  и напряжением до 6 kV успешно разрешена. Теперь ЦНИИ КП работает над созданием более совершенных конструкций кабелей 35 kV с вязкой пропиткой: кабеля с применением бумаг различной упругости и кабеля с частичным применением сажевых полупроводящих бумаг. В программу института и заводов кабельной промышленности входят также разработка и выпуск опытных партий новых конструкций газонаполненных и маслоэстатических кабелей. Кабели постоянного тока представляют наиболее дешевый способ выполнения

магистральных линий электропередачи протяженностью сотни и тысячи километров. При переходе на постоянный ток изменяются условия работы изоляции и иначе ведутся процессы старения, главным образом, вследствие прекращения непрерывного действия ионизации в газовой включенных. Докладчик указал на высокую прочность кабелей на постоянном токе. Выбор сечения токопроводящих жил кабельных линий постоянного тока будет проводиться, исходя из допустимых потерь напряжения. В докладе было охарактеризовано содержание ряда научно-исследовательских задач, подлежащих разрешению при решении надежных конструкций кабелей постоянного тока (учет пульсаций постоянного тока, перенапряжения при частичных разрядах, разработка арматуры и т. д.).

Доклад «Отличительные особенности конструкций и производства кабелей СССР и США» сделал инж. В. Е. Пашенко (завод МЭП). Докладчик осветил ряд особенностей технологии изготовления силовых кабелей за рубежом: скрутка всех проводящих жил в одном направлении и уплотнение жил с применением дополнительных ребровых роликов; изолирование с резко уменьшенным числом оборотов обмотчика, предельная сушка секторных жил перед их общей скруткой, проводимая с целью предотвращения появления машин в фазной изоляции; более длительное время, затрачиваемое на сушку и пропитку кабелей (примерно в 2—2,5 раза); оксидирование кабелей с применением вакуума; заливки свинца или нейтральной газовой среды (азота).

Доклад «Опыт эксплуатации московской 110-kV маслонаполненной линии» сделал инж. Д. И. Малиничев (Мосэнерго). Линия 110-kV кабеля выполнена целиком из материалов и оборудования отечественного производства и находится в эксплуатации. Отметив ряд недостатков маслонаполненной кабельной линии, докладчик перечислил задачи, подлежащие разрешению: устранение и замена черного американского кембрика в стопорных муфтах, вызывающего разложение масла; переделка системы сигнализации давлений масла; разработка эксплуатационных норм на масло и методов наблюдения за изоляцией маслонаполненных кабельных линий и контроля над ними.

Инж. В. И. Погарский (Орггрэс) сделал доклад «Анализ аварий в кабельных сетях МЭС». Аварийность кабельных сетей в СССР по ряду показателей значительно ниже, чем в ряде зарубежных стран. Анализ аварий указывает, что по прямой вине эксплуатационного персонала происходит до 30—40% аварий. Большое количество аварий происходит вследствие механических повреждений кабелей посторонними организациями. Анализ технических причин повреждаемости кабельных линий приводит к выводу, что относительно высокий процент повреждений кабелей происходит по внутренним причинам: из-за быстрого старения изоляции, выхода кабелей из строя вследствие перегревов и перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю.

Доклад «Заводские дефекты кабелей, выявляемые при отбраковке перед прокладкой» сделал инж. А. И. Грачев (МЭС Мосэнерго). Докладчик подробно осветил результаты многолетней работы электротехнической лаборатории МЭС Мосэнерго по вскрытиям, осмотрам и отбраковке вновь поступающих с заводов кабелей. Всего за период 1939—1947 гг. лабораторией было вскрыто и проверено 5 000 барабанов кабелей, из которых было забраковано и переклассифицировано на низшие напряжения 12% барабанов. Наибольший процент отбраковки по союзным заводам падает на Колчугинский кабельный завод (19%); из импортных кабелей в наибольшей мере бракуются финские кабели (35—55%). Основными причинами браковки финских кабелей, как указал докладчик, являются недостаточная толщина изоляции, хрупкость изоляции, большое количество повреждений бумажных лент, морщины и складки в изоляции

плохая скрутка и опрессовка жил. Необходимо пересмотреть ГОСТ 340-41 в части большей конкретизации допустимых отклонений от норм и введения в него ряда новых требований, обеспечивающих необходимое качество кабельной продукции.

С докладом «Производство кабельной арматуры заводами МЭС» выступил инж. С. Т. Солянский (Армсеть). Докладчик отметил недопустимость отклонения кабельной промышленности от производства и комплектной поставки вместе с кабелем кабельных муфт. На местах вынуждены кустарничать и применять крайне плохого качества кабельную арматуру. Трест Армсеть (МЭС) намерен в 1948 г. начать выпуск в небольших количествах наиболее дефицитных муфт наружной установки. Докладчик продемонстрировал чертежи заново переработанных конструкций кабельных муфт. Однако, как указал докладчик, комплексным изготовлением (конструирование, проверка, выпуск и комплектная поставка муфт) должны заниматься кабельные заводы и институт кабельной промышленности МЭП.

На пленарном заседании сессии был заслушан доклад исследования финских кабелей, произведенные Оргрэс и МКС Мосэнерго (докладчик инж. В. И. Погарский). Неудовлетворительное качество финских кабелей заставило МЭС произвести специальные исследования этих кабелей. Исследования показали, что кабели имеют серьезные производственные дефекты (в жилах и изоляции) и крайне неудовлетворительные электрические характеристики. В частности, финские кабели крайне нестойки к изгибам и, как правило, пробиваются при последующих испытаниях высоким напряжением. Несмотря на небольшой срок их работы в эксплуатации (1—1,5 года) уже имеются многочисленные случаи их аварийного выхода из строя. Далее докладчик кратко осветил содержание циркулярного письма Техотдела МЭС, регламентирующего применение и порядок использования в эксплуатации финских кабелей.

Научно-техническая сессия продолжала свою работу в трех секциях: 1) эксплуатация кабельных сетей; 2) монтаж и прокладка кабельных линий; 3) профилактические испытания и измерения на кабельных линиях.

На секции *эксплуатации кабельных сетей* было заслушано 8 докладов. Доклад «Опыт эксплуатации компенсированных кабельных сетей» сделал инж. Б. М. Баранов (МКС Мосэнерго). Он указал, что в компенсированных сетях количество переходов однофазных замыканий в двух- и трехполюсные короткие, примерно в три раза меньше, чем в некомпенсированных сетях; снижены перенапряжения, почти не встречаются местные повреждения. Опыт МКС Мосэнерго по применению дугогасящих аппаратов, по мнению докладчика, должен найти самое широкое распространение.

С докладом «Организация эксплуатации кабельных сетей» выступил инж. В. Н. Беляев (МКС Мосэнерго), отметивший особенности структуры управления и постановки эксплуатации в Московской кабельной сети и указавший на необходимость изжития ряда имеющихся в этом деле ненормальностей.

Доклад «Старение и порча кабелей в условиях эксплуатации» сделал инж. В. И. Погарский (Оргрэс МЭС). Указав на органические недостатки кабелей с вязкой пропиткой и наличие в них дополнительных заводских и монтажных дефектов, докладчик на большом фактическом материале проанализировал случаи преждевременного старения кабелей и неустойчивой работы многих кабельных линий, в особенности проложенных по наклонным трассам или имеющим вертикальные участки. В докладе были приведены материалы, показывающие зависимость срока жизни кабелей от их нагрева. В заключение были предложены мероприятия по производству и эксплуатации кабелей, осуществление которых позволит предотвратить преждевременное старение кабелей.

Инж. Р. Я. Миньков (ЛКС Ленэнерго) представил доклад с большим количеством графиков и иллюстраций «Опыт двадцатилетней эксплуатации кабелей 35 кВ Ленэнерго». Докладчик, в частности, указал на необходимость выпуска заводами кабелей 35 кВ с улучшенной технологией, обеспечивающей их надежную

работу не только на горизонтальных, но и на вертикальных участках, а также на необходимость разработки и выпуска заводами надежной арматуры (муфт) к кабелям 35 кВ.

Доклад «Опыт эксплуатации туннельных прокладок кабелей» сделал инж. Е. И. Горин (Московский метрополитен).

С докладом «Опыт эксплуатации туннельных и блочных прокладок» выступил инж. А. А. Колесников (Магнитогорский металлургический комбинат). В эксплуатации заводских электросетей большое внимание уделяется профилактическим ремонтам и испытаниям кабелей, в результате чего большая 3—10-кВ кабельная сеть комбината работает в последние годы почти безаварийно. В условиях крупных заводов и больших сетей туннельно-блочные прокладки кабеля создают большие удобства в эксплуатации.

На секции *монтажа и прокладки кабельных линий* был заслушан доклад «Подземные прокладки кабелей в условиях крупных городов» инж. Б. З. Рыскина (МКС Мосэнерго). Проектирование и строительство кабельных сетей должны увязываться с развитием и реконструкцией городов. Необходимо широко внедрять туннельно-блочные прокладки и сооружение коллекторов. Необходимо осуществлять глубокие вводы в города высоких напряжений кабелями 35 и 110 кВ.

Доклад «Применяемые в эксплуатации конструкции муфт» сделал инж. И. А. Фридкин, обобщивший в этой части опыт эксплуатации Московской кабельной сети.

Доклад «Новые виды сухих концевых заделок кабелей» сделал инж. Е. А. Прошин (Главэлектромонтаж). Главэлектромонтажом освоено производство свинцовых перчаток методом окунания. ЦЭМ разработал новый способ сухой разделки кабелей с использованием ленты пластичного материала и нового типа лака.

Доклад «Ремонт и прокладка подводных кабелей» сделал инж. Н. С. Туманов (ЛКС Ленэнерго). О прокладке кабелей при низких температурах сделал доклад инж. П. А. Умов (Мосэнерго). О применении битумных составов и компаундов холодного застывания сделал сообщение инж. Д. В. Смирнов (МКС Мосэнерго).

Работы секции *профилактических испытаний и измерений в кабельных сетях* привлекли большое внимание участников научно-технической сессии. На тему «Методы отыскания мест повреждений в кабелях» было сделано два доклада: инж. П. Н. Апушкин (Ленэнерго) и инж. А. С. Якуниным (Мосэнерго). Были отмечены большие возможности применения индукционного метода, с помощью которого в МКС Мосэнерго определяется большинство повреждений в кабелях. В ЛКС Ленэнерго до 65—70% повреждений определяются методом петли Муррея.

Инж. М. В. Хомяков сделал два доклада «Профилактические испытания высоковольтных кабелей» и «Применяемая энергосистемами и промпредприятиями контрольно-испытательная аппаратура». В первом докладе было отмечено, что в числе аварий кабельные аварии занимают первое место и после 1939 г. держатся почти на одном уровне. Профилактические испытания выявляют лишь 80—90% дефектов в кабелях, вследствие чего пробой часто происходит после профилактических испытаний кабеля, чаходящегося в эксплуатации. Нужны, следовательно, более эффективные методы профилактических испытаний для 100%-ного выявления дефектов в кабелях.

Во втором докладе было подчеркнуто недостаточное обеспечение контрольно-измерительной аппаратурой энергосистем и промышленных предприятий, эксплуатирующих высоковольтные кабели.

Некоторыми энергосистемами и промышленными предприятиями успешно изготовлены портативные переносные испытательные аппараты. На основе опыта энергосистем технический отдел МЭС разработал технические условия на кенотронные аппараты. Указано на необходимость поставить промышленное производство кенотронных аппаратов, а также ламп и приборов для них. Кабельные сети должны быть обеспечены в достаточной степени кабель-

ными мостиками, аппаратами для испытания трансформаторного масла, баллистическими гальванометрами для определения заплывающих пробоев и др.

С сообщением «Применение импульсного метода для определения мест повреждений в кабелях» выступил кандидат техн. наук Я. Л. Быховский (ЦНИЭЛ МЭС). Докладчиком была продемонстрирована на отрезках кабеля возможность применения импульсного метода для определения мест повреждений в кабельных линиях. Метод имеет большие перспективы и применение его возможно одновременно с испытанием кабелей повышенным напряжением.

Доклад «Новые методы испытаний и исследований кабелей» сделал проф. С. С. Городецкий (ЦНИИ КП МЭП). Были освещены новые методы лабораторного исследования кабелей и показаны преимущества осциллографирования форм кривой тока в изоляции, метода контроля однородности изоляции путем фототрафирования и изготовления шлифов, ускоренные старения кабелей при одновременном воздействии тока и напряжения и др.

Обобщающий доклад на тему «Профилактические испытания кабелей» сделал инж. А. А. Косовский (Ленэнерго). Анализ развития профилактики показывает исключительно большое значение планового-предупредительных испытаний кабелей. Последние позволили в десятки раз снизить аварийность кабельных сетей. При профилактических испытаниях кабелей постоянным током высокого напряжения выявляется до 80—85% всех явно ослабленных мест в изоляции. Докладчик отметил целесообразность более частых испытаний кабельных линий (до 3—4 раз в год). Указав на сравнительно повышенную повреждаемость кабеля 35 kV, докладчик отметил необходимость дальнейшего повышения испытательных напряжений.

Доклад «Профилактические и аварийные испытания и ремонт кабелей» сделал инж. С. Ф. Богомазов (Мосэнерго).

Доклад «Устройство электрических дренажей» сделал кандидат техн. наук В. С. Кальман (АЗНИИ). Осветив экспериментально-исследовательские работы, проведенные институтом, докладчик сформулировал ряд условий, которым должна удовлетворить дренажная защита.

От постоянной междуведомственной комиссии по борьбе с коррозией (при Моссовете) выступили с докладами инж. Л. Н. Акинфиев «Методика составления карт коррозионных зон городских территорий» и инж. Т. Г. Тимофеев «Борьба с коррозией подземных металлических сооружений».

На сессии был заслушан еще ряд докладов. По докладам развернулись оживленные прения. Выступившими был отмечен мощный рост кабельных сетей, повышение уровня эксплуатации и значительное снижение аварийности. Все выступавшие останавливались на задачах даль-

нейшего повышения бесперебойности электроснабжения и устранения имеющихся недостатков эксплуатации кабельных сетей.

Значительное внимание было уделено качеству кабельной продукции, было отмечено отсутствие ряда основных типов кабелей 6—10 kV, например кабелей для вертикальных и наклонных участков трасс и кабелей, стойких к коррозии.

Широкую критику подвергли выступления представителей Главкабеля МЭП (инж. Е. Ф. Клебанов, инж. Г. Д. Архангельский и инж. С. Б. Минц), пытавшиеся доказать, что в части номенклатуры и качества кабелей все обстоит благополучно и что кабельная арматура, нитур, заливочные массы и пр. должны изготавливаться не заводами МЭП, а монтажными и эксплуатирующими организациями и промкооперацией. В частности, строгим прозвучало заявление Е. Ф. Клебанова о том, что кабельная промышленность освоила осушенные кабели для укладки на вертикальных и наклонных трассах, но что не выпускаются заводами, так как потребители не вызывают их, и что Главкабель МЭП может отпустить потребителям кабельные бумажные ролики при условии, что потребители будут присылать за ними денежные банки. В заключение Е. Ф. Клебанов заявил, что Главкабель МЭП проектирует специальный завод по производству указанной выше арматуры, материалов и т. д.

Выступающие отметили также недостаток на месте контрольной и измерительной аппаратуры: кенотронных газотронных установок, аппаратов для испытания малых приборов для определения мест повреждения кабелей, приборов для измерения блуждающих токов и т. д.

Был также отмечен недостаток технической литературы: руководящих и инструктивных материалов по монтажу и эксплуатации кабелей, популярных брошюр для мастеров и электромонтеров и т. д.

На сессии была организована выставка, на которой были представлены усовершенствованные образцы арматуры и пр. Значительная часть этих приборов и арматуры сконструирована и изготовлена силами лабораторий энергосистем и, главным образом, МКС Мосэнерго. Ряд изразцов целесообразно передать промышленности для ее своего производства.

Сессия приняла резолюцию, в которой намечены основные задачи, стоящие перед эксплуатирующими организациями, кабельными заводами и научно-исследовательскими организациями по повышению культуры эксплуатации и также повышению надежности и рентабельности работы кабельных сетей.

По окончании сессии для делегатов был организован ряд интересных экскурсий на Кабельный завод, в ЦНИИ КП, в центральный научно-исследовательский институт кабельной промышленности, показ действующей 110-kV масляной кабельной линии и производства свинцовых чаток в ЦНИИЭПС.

Инж. В. И. ПОГАРСКИЙ  
и инж. А. Л. ФАЕРМАН

## Всесоюзная научно-техническая сессия по городским электрическим сетям

25—29 мая 1948 г. в Ленинграде ВНИТОЭ провело I Всесоюзную научно-техническую сессию, посвященную вопросам городских электрических сетей. Большие послевоенные работы по восстановлению, реконструкции и развитию городских электросетей выдвинули ряд неотложных задач: выбор наиболее целесообразной схемы городской сети, числа и мощности питательных пунктов, оптимальной нагрузки кабелей и линий, напряжения различных звеньев распределительной системы и др. Весьма актуальными являются также вопросы методики учета и снижения потерь электрической энергии в сетях.

В работах сессии приняли участие 169 делегатов из 69 городов.

На сессии были заслушаны следующие доклады.

Заслуженный деятель науки и техники, доктор техн. наук, проф. М. Д. Каменский в докладе «Городские электрические сети» охарактеризовал значение городских сетей, как одного из основных элементов электроснабжающей системы, и отметил достижения советской техники в построении городских сетей.

В 1947 г. в Советском Союзе было 1380 городов, имевших городские электрические сети. Все городское население и значительная часть промышленных предприятий получают электроэнергию по городским электрическим сетям. Советские ученые и инженеры дали много в области разработки теории, методов расчета и построения городских электрических сетей; работа в этой области должна развиваться в дальнейшем в соответствии с достижениями новой техники.

Доклад кандидата техн. наук, доц. Б. Л. Айзенберга «Принципы развития городских электрических сетей, принятые Ленинградской кабельной сетью на период послевоенной сталинской пятилетки» был посвящен вопросам определения нагрузок, выбора напряжения, мощности трансформаторных пунктов и схемам построения городских сетей среднего и низкого напряжения. Для выбора оптимальной мощности трансформаторного пункта была разработана новая расчетная формула, в основу вывода которой положен расчет кабелей сети по допустимой плотности рабочего тока при аварийном режиме работы сети. В качестве типовой схемы для новых участков сети принята замкнутая схема без сетевых автоматов, для участков существующей сети — полузамкнутая схема. Принят режим работы сети низкого напряжения с заземленной нейтралью. Питание шлейфной распределительной сети среднего напряжения принято через фидерные пункты пропускной способностью в 3 000—6 000 kVA.

В докладе С. Н. Никогосова и М. Н. Грибанова «Выбор оптимального напряжения для электроснабжения промышленных предприятий крупных городов» было дано технико-экономическое сопоставление вариантов питания крупных промышленных потребителей при различных напряжениях, установлена зависимость выбора оптимального напряжения от наличия сети среднего напряжения в данном районе и степени ее развития, от протяженности сети, количества и мощности электродвигателей высокого напряжения на промышленных предприятиях района.

В докладе Н. Г. Быкова «Экономические проблемы распределения электроэнергии по сетям высокого напряжения» был рассмотрен тот же вопрос, что и в предыдущем докладе для новых городов, причем намечены пути удешевления экономически целесообразных «глубоких вводов» высокого напряжения.

В докладе «Расчет необходимой мощности синхронных компенсаторов в электрических системах» инж. М. Н. Грибанов сообщил о методе определения мощности компенсирующих устройств на основании баланса реактивных мощностей в системе.

Доклад инж. В. М. Дмитриева «Восстановление городских электрических сетей» показал целесообразность применения в качестве типовой схемы при восстановлении разрушенных во время войны городских сетей или при реконструкции существующих — замкнутой сети без сетевых автоматов не только при кабельных, но и при воздушных сетях низкого напряжения как при большой, так и при малой погонной плотности нагрузки. В докладе на примере выполненного и осуществляемого в настоящее время проекта сети небольшого города с 40 000 жителей показана возможность повышения степени бесперебойности электроснабжения потребителей без увеличения затрат цветного металла и средств на сеть и трансформаторные пункты.

Инж. Н. В. Волоцкий в докладе «Электрические сети жилых домов» информировал о проекте на опыте «Ленпроекта» по устройству электрических сетей жилых домов.

В докладе инж. В. А. Козлова «Сетевые подстанции 6 kV Ленинградской кабельной сети» были отмечены особенности принятых в Ленинграде стандартных сетевых пунктов разного типа, их достоинства и недостатки.

Инж. Д. А. Герман в докладе «Ввод в эксплуатацию опытного участка замкнутой городской сети» осветил удачные испытания селективности работы защиты и опыт ввода в эксплуатацию участка замкнутой сети без сетевых автоматов.

В докладе Б. И. Розенберга «Методика технико-экономических расчетов при проектировании электрических сетей» были даны математические выражения для выбора экономического сечения проводов с учетом предложенного автором принципа сочетания затрат различных размерностей, а также при учете величины потери напряжения и в сочетании с выбором числа цепей.

Доклад доц. В. Т. Рождественского «Методика экономического расчета электрических сетей» был посвящен вопросу о введении в обычный расчет экономического сечения проводов поправочного коэффициента, определяющего эффективность затрат на сеть.

Инж. В. К. Плюгачев в докладе «Определение оптимального срока окупаемости при проектировании электрических сетей» показал необходимость учитывать динамику развития сетей, исходя из принципа общего минимума затрат для всего народного хозяйства в целом.

Доц. В. Г. Холмский в докладе «Расчет городских электрических сетей при регулировании напряжения с помощью трансформаторов» подчеркнул целесообразность применения в городских распределительных воздушных сетях вольтодобавочных трансформаторов и сообщил о методике выбора их параметров.

В докладе кандидата техн. наук А. С. Либмана «О некоторых положениях теории электрических сетей» было введено понятие относительных потерь энергии и показана целесообразность проектирования сетей на основе равенства относительных потерь в различных звеньях сети.

Инж. А. А. Куликовский сделал сообщение о технических данных нейтралеров, создающих искусственную нулевую точку на каждом домовом вводе трехпроводной сети низкого напряжения и позволяющих повысить линейное напряжение городской сети в  $\sqrt{3}$  раз. Сопоставление этого метода и метода использования в качестве четвертого нулевого провода свинцовой оболочки трехжильного кабеля показало преимущества и недостатки того и другого метода и определило условия их практического применения.

Доклад инж. М. А. Гаврилова «Плавкие предохранители напряжением до 500 V большой разрывной способностью» был посвящен принципам расчета селективности предохранителей низкого напряжения и экспериментально проверенным способам повышения их разрывной способности. В кратком изложении теории предохранителей была приведена расчетная формула для определения длительности перегорания плавкой вставки при токах короткого замыкания и значения расчетных коэффициентов для практического пользования этой формулой.

В сообщении кандидата техн. наук А. М. Мелькумова были изложены результаты исследований ВЭИ, на основе которых промышленностью выпускает предохранители высокого напряжения с заполнителем большой разрывной способности.

В докладе инж. М. М. Зархина «Учет потерь электрической энергии в городских сетях среднего и низкого напряжения» был изложен новый оперативный метод расчета потерь, отличающийся приемлемой на практике точностью результатов, основанный на усредненных характеристиках параметров сети, значении среднего тока, определяемого по отпуску электрической энергии в данный элемент сети и по коэффициентам, учитывающим неравномерность загрузки элементов сети, изменение нагрузки в течение суток и т. д.

В докладе кандидата техн. наук, доц. Б. Л. Айзенберга и кандидата техн. наук В. Е. Манойлова «Снижение потерь электрической энергии в городских сетях» были изложены методы снижения технических и коммерческих потерь в сетях и отмечена эффективность отдельных мероприятий.

Инж. Л. Д. Клебанов в докладе «Переход от потери напряжения к потере мощности в городской сети низкого напряжения» дал простой, легко осуществимый способ экспериментального определения технических потерь электрической энергии в сетях низкого напряжения.

В докладе доц. В. В. Кезевича «Уточнение коэффициента продолжительности потерь» была рассмотрена кривая зависимости продолжительности потерь от коэффициента пользования, результат расчета

по которой оказался более точным, чем по другим кривым.

Необходимость пересмотра и дополнения «Руководящих указаний по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока», утвержденных НКЭС в 1940 г., отметил в своем сообщении Б. Л. Айзенберг.

По заслушанным на сессии докладам состоялся широкий обмен мнениями. Сессией была принята резолюция, в которой отражены, в частности, следующие вопросы.

Проектирование городских электрических сетей. Признан целесообразным переход на напряжение 380/220 В. Перевод трехпроводных кабельных сетей на четырехпроводные производить путем использования свинцовой оболочки кабелей. В зависимости от местных условий перевод этот может производиться также путем установки нейтра-леров.

При разработке новых «Руководящих указаний по проектированию городских сетей» рекомендовано расчетную потерю напряжения для нормальных эксплуатационных режимов устанавливать близкой к оптимальной величине, определяемой экономической плотностью тока. Для аварийных режимов провода сети должны проверяться только на величину допустимой по нагреву плотности тока. Для сохранения отклонений напряжения у потребителей в допустимых пределах рекомендовано широко применять новые технические средства регулирования напряжения: трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой на районных подстанциях, регулируемые бустер-трансформаторы и автотрансформаторы в сетях высокого напряжения, нерегулируемые бустеры в пролетах сетей низкого напряжения, особенно в воздушных сетях. При отсутствии регулирующих устройств может быть сохранена предусмотренная существующими руководящими указаниями суммарная потеря напряжения в сети высокого и низкого напряжения в 12—14%. Распределение этой величины между обеими ступенями напряжения должно производиться с учетом удаленности трансформатора. В связи с тем, что повышение надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей, получающих питание от городской электрической сети общего пользования низкого напряжения, является неотложной задачей электроснабжающих организаций, следует считать целесообразным выполнение новых электрических сетей по усовершенствованным схемам, например автоматизированным и полуматериализованным схемам, замкнутой сетке, петлевым вводам и т. д. В случае отсутствия сетевых автоматов обратной мощности рекомендовано проведение осуществленных в Ленинграде опытов применения замкнутой схемы сети без сетевых автоматов с защитой этой сети плавкими предохранителями, вставки которых могут образовать селективную систему.

Признана необходимостью разработка детальных руководящих указаний по проектированию электрических внутридомовых сетей с целью типизации их схем, вводных устройств и метода расчета проводов. Отмечена целесообразность перехода на режим заземленной нейтрали во всех четырехпроводных городских электрических сетях низкого напряжения, выполненных подземным кабелем.

Отмечена необходимость проведения Министерством электростанций и министерствами коммунального хозяйства работы по типизации сетевых сооружений и организация Министерством электропромышленности серийного производства элементов типовых сетевых сооружений для всех городских сетей Советского Союза.

Отмечена необходимость повышения напряжения городских сетей среднего напряжения в целях экономии цветных металлов и снижения величины потерь в сетях. Для повышения экономичности применения распределительных сетей более высокого напряжения найдено необходимым организовать проработку типовых схем и конструкций высоковольтных распределительных сетей и подстанций энергосистем на базе применения комплектных

районных подстанций небольшой мощности с упрощенной схемой без обслуживающего персонала и привлечь заводу электропромышленности к решению задачи выбора оптимальной величины генераторного напряжения на основе конструктивных и экономических изысканий в области изготовления генераторов, кабелей и аппаратуры. В существующих крупных городах, где сооружение воздушных сетей недопустимо и где имеются развитые кабельные сети напряжением 6 кВ, вопрос о переходе на более высокое напряжение следует решать в зависимости от технико-экономических расчетов.

Технико-экономические расчеты при проектировании городских электрических сетей. Ввиду отсутствия четких руководящих указаний о методах экономического сравнения вариантов при проектировании электрических сетей сессия постановила обратиться в МЭС и Госплан СССР с просьбой о разработке единых соотношений между одновременно затрачиваемыми и ежегодными расходами.

Учет и снижение потерь электрической энергии в городских сетях. Разработанный Ленинградским инженерно-экономическим институтом им. Молотова совместно с Энергосбытом Ленэнерго и Ленинградской кабельной сетью метод учета потерь электрической энергии в сети среднего и низкого напряжения, основанный на принципе расчета по усредненным данным, признан заслуживающим внимания для применения в электрических сетях крупных и средних городов. Этот метод требует доработки в отношении учета влияния на величину потерь в сети низкого напряжения неравномерной загрузки фаз четырехпроводной сети, а также, в целом, в отношении применения его к электрическим сетям небольших городов.

Основными мероприятиями по снижению технических потерь электрической энергии в городских сетях, кроме мероприятий, связанных с реконструкцией сети, являются включение резервных фидеров, параллельных рабочим фидерам, и выбор целесообразных эксплуатационных схем распределительных кабелей среднего напряжения, переход на двустороннее питание магистральных кабелей (линий) низкого напряжения, перевод питания потребителей на более высокое напряжение и выравнивание нагрузки фазных проводов четырехпроводной сети низкого напряжения.

С целью снижения коммерческих потерь электрической энергии рекомендовано проведение ряда мероприятий по устранению возможности безучетного пользования электрической энергией.

Пересмотр «Руководящих указаний по проектированию городских электрических сетей трехфазного тока» (НКЭС, 1940) признан безусловно необходимым. Отмечено, что «Руководящие указания», выпущенные в 1941 г., не получили достаточного распространения и неизвестны широкому кругу проектировщиков. «Руководящие указания», составленные в 1937—1938 гг., устарели. «Руководящие указания» следует переработать с необходимой детализацией и дополнением, особенно в разделе о сетях высокого (среднего) напряжения и в части сетевых сооружений. Издание этих руководящих указаний необходимо осуществить большим тиражом и довести их до сведения всех организаций, связанных с проектированием, монтажом и эксплуатацией городских электрических сетей, независимо от ведомственной принадлежности.

На сессии было избрано постоянное бюро по городским электрическим сетям в следующем составе: И. А. Сыромятников, А. А. Куликовский (МЭС), М. Д. Каменский, Б. Л. Айзенберг, М. М. Зархин, П. И. Езов, Н. В. Волоцкий (Ленинград), В. А. Лямин, Б. М. Баранов, А. Ф. Елисеев, Л. М. Фигнер, Я. И. Лейтес (Москва), В. Г. Холмский (Киев), А. Л. Неженко (Харьков), Ф. Д. Мокрицкий (Днепропетровск), Е. П. Миронов (Ростов-Дон), Д. Е. Трофименко (Свердловск).

Кандидат техн. наук, доц. Б. Л. АЙЗЕНБЕРГ



## Вопросы электротранспорта на Всероссийской научно-технической конференции по городскому транспорту

11—15 мая 1948 г. состоялась Всероссийская научно-техническая конференция по городскому транспорту, созданная Академией коммунального хозяйства им. Памфилова, совместно со Всесоюзным научным инженерно-техническим обществом городского электротранспорта и Главным управлением трамваев и троллейбусов Министерства коммунального хозяйства РСФСР.

В работе конференции приняли участие 250 делегатов (гостей (представители ряда министерств, научно-исследовательских организаций, 20 трамвайно-троллейбусных предприятий и др.).

На конференции работали 4 секции: подвижного состава, электрохозяйства, пути и движения. На пленарных и секционных заседаниях было заслушано 35 докладов, посвященных, главным образом, вопросам электротранспорта, а также ряд сообщений с мест.

Конференцию открыл министр коммунального хозяйства РСФСР В. И. Говорков, охарактеризовавший развитие городского электротранспорта в соответствии с пятилетним планом восстановления и развития народного хозяйства РСФСР.

Инж. К. К. Клопотов, начальник Главтрамвая Министерства коммунального хозяйства РСФСР, выступил с докладом «Организационные и технические задачи в области городского транспорта по выполнению послевоенной пятилетки». В текущем году открывается трамвайное сообщение в Орске, Коломне, Томске, Барнауле и троллейбус в Пензе. Развернулось строительство современных двухосных и четырехосных трамвайных вагонов и цельнометаллических троллейбусов, оборудованных быстроходными тяговыми двигателями. Одновременно ведется проектирование нового трамвайного вагона стандартной конструкции.

Председатель ВНИТО ГЭТ проф. В. Е. Розенфельд сделал доклад о работе ВНИТО ГЭТ. Обществу существует уже более 25 лет; в его составе — 83 юридических члена (трамвайно-троллейбусных предприятий) и около 1 000 инженерно-технических работников. Одной из задач общества является консультационная работа, а также распространение лучших рационализаторских мероприятий отдельных трамвайных предприятий. Необходимо возобновить издание технического журнала, посвященного вопросам городского электротранспорта.

Кандидат техн. наук В. А. Изъюров (ВНИТО ГЭТ) остановился на вопросах рационализации и изобретательства в области городского электротранспорта.

Кандидат техн. наук Ю. М. Галонен (Академия коммунального хозяйства им. Памфилова) подчеркнул необходимость усиления внимания к вопросам токосъема и, в частности, отметил, что угольно-графитные контактные ставки для токоприемников трамвая обеспечивают в 15 раз больший срок службы по сравнению с алюминиевыми; отметил необходимость внедрения в новом подвижном составе автоматической системы управления, системы отключения с использованием тепла пусковых реостатов и тяговых двигателей, флюоресцентного освещения и счетчика энергии.

Инж. Б. И. Шульга (Архангельский трамвай) сообщил о рационализаторских мероприятиях, стабилизирующих эксплуатацию: целная подвеска контактной сети на вылетных маршрутах, электромонтажное устройство для вагонов и др.

Инж. Е. И. Ольховик (Симферопольский трамвай) указал на использование «вечных» опор для контактной сети в хромированном стальном прокате.

В секции подвижного состава (председатель инж. П. В. Маренков) было заслушано 7 докладов: инж. В. И. Строганова (ЦКБ Управления московского трамвая) «Новые двухосные трамвайные вагоны с быстроходными тяговыми двигателями»; инж. Г. А. Лучая (технический отдел Главтрамвая МКХ РСФСР)

«Вопросы модернизации подвижного состава городского электротранспорта»; кандидата техн. наук Ю. М. Галонена «Экспериментальная база городского наземного электротранспорта»; инж. А. И. Ежова (Управление московского метрополитена им. Кагановича) «Подвижный состав Московского метрополитена»; инж. М. Н. Шполянского (трест «Мостроллейбус») «Опыт эксплуатации нового типа троллейбуса МТВ-82»; инж. С. С. Тихомирова (Управление московского трамвая) «Опыт эксплуатации нового четырехосного вагона типа МТВ-82». Вагон нового типа развивает пусковое ускорение  $0,85-0,5 \text{ m/sec}^2$  и тормозное замедление  $1-1,1 \text{ m/sec}^2$ . Максимальная скорость  $60 \text{ km/h}$ . Пропускная способность линии с вагонами нового типа определяется в 85 поездов в час ( $8\,500-10\,000 \text{ пас/час}$ ). Вагоны МТВ 82 имеют меньшую аварийность по сравнению с вагонами других типов: повреждения якоря МТВ-82 —  $0,04\%$  к выпуску; для М-38 —  $0,33\%$ ; для КМ —  $0,32\%$ ; дефекты контроллера МТВ-82 —  $0,14\%$ ; для М-38 —  $2,5\%$  и для КМ —  $0,5\%$ ; в среднем по всем видам оборудования МТВ-82 —  $3,9\%$ ; М-38 —  $7,31\%$  и для КМ —  $5,76\%$ ; и инж. Л. Я. Лехтмана (завод «Динамо» им. Кирова) «Современное электрооборудование подвижного состава городского электротранспорта». Заводом «Динамо» созданы новые быстроходные тяговые двигатели для четырехосного трамвая МТВ-82 ( $55 \text{ kW}$ ,  $275/550 \text{ V}$ ,  $1\,430 \text{ об/мин}$ , вес  $450 \text{ kg}$ ), для двухосного вагона УКЗ ( $50 \text{ kW}$ ,  $550 \text{ V}$ ,  $1\,430 \text{ об/мин}$ , вес  $450 \text{ kg}$ ), для метрополитена ( $70 \text{ kW}$ ,  $375/750 \text{ V}$ ,  $1\,450 \text{ об/мин}$ , вес  $625 \text{ kg}$ ), для троллейбуса ( $83 \text{ kW}$ ,  $550 \text{ V}$ ,  $1\,300 \text{ об/мин}$ , вес  $625 \text{ kg}$ ), а также для дизель-электробуса ( $43 \text{ kW}$ ,  $190 \text{ V}$ ,  $1\,000 \text{ об/мин}$ , вес  $450 \text{ kg}$ ). Быстроходные тяговые двигатели выполняются с остовом из бесшовных труб.

В прениях по докладам выступили с замечаниями о конструкции новых трамвайных вагонов и троллейбусов инж. М. Х. Сорока (Ленинград), доц. В. Г. Сосняк (АКХ), кандидата техн. наук Б. П. Петров (МЭИ), инж. С. Э. Салтанов (Мостроллейбус), инж. Б. И. Шульга (Архангельск), кандидата техн. наук В. Л. Марковников (АКХ), инж. М. И. Попов и др.

В секции энергохозяйства (председатель Г. М. Смирнов) было заслушано 5 докладов: инж. И. Е. Поха (ЛОНИТО ГЭТ) «Усовершенствование контактной сети и токосъема троллейбусов»; кандидата техн. наук, доц. Е. В. Чеботарева (МЭИ) «Трехпроводная система электрооснабжения трамвая»; кандидата техн. наук Н. А. Загайнова (УМТ) «Автоматизация электрохозяйства городского наземного электротранспорта в послевоенной сталинской пятилетке» и инж. В. К. Крапивина (завод «Уралэлектротраппарат») «Новые ртутные выпрямители для тяговых подстанций».

В прениях приняли участие: инж. В. Д. Соколов (УМТ), инж. Д. Х. Кузнецов (УМТ), инж. О. П. Громова (Главтрамвай), доц. С. М. Мессерман (МЭИ) и др.

В секции движения инж. А. Г. Лиманов после докладов продемонстрировал свой новый электромеханический автомат для сбора проездной платы на транспорте.

Заключительное пленарное заседание приняло приветствие от участников конференции товарищу И. В. Сталину.

По всем докладам, заслушанным на конференции, были приняты решения, в которых намечены ближайшие задачи по развитию и совершенствованию городского электротранспорта. Принято решение об издании трудов конференции.

Закрывая конференцию, директор Академии коммунального хозяйства им. Памфилова, кандидат техн. наук В. В. Прокофьев в своем выступлении кратко обобщил итоги конференции, работы которой должны способствовать развитию городского электротранспорта.

Кандидат техн. наук Ю. М. ГАЛОНЕН



# Обсуждение деятельности журнала «Электричество» за 1946 и 1947 гг.

## 1. В Министерстве электростанций СССР

3 марта 1948 г. в Техническом совете при Министре обсуждался журнал «Электричество» за 1946 и 1947 гг. Технический совет констатировал правильное общее направление и тематику журнала, стремившегося широко охватить основные области электротехники и освещавшего их на высоком теоретическом уровне.

В журнале освещен ряд актуальных научных, технических и технико-экономических проблем, имеющих большое значение для электрохозяйства и электропромышленности СССР. В тематически направленных номерах журнала были освещены важные вопросы передачи электроэнергии постоянным током высокого напряжения (№ 1), теории и конструкции электрических машин (№ 6), автоматизации электропривода (№ 4), электроприборостроения и электрических измерений, светотехники (№ 10 и 12), новых электротехнических материалов (№ 8) и др. В ряде статей и обзоров были отражены новейшие достижения науки и техники в области исследования и применения электричества. В материалах, помещаемых в журнале «Электричество», уделено внимание выявлению приоритета и достижений русских ученых и инженеров-электротехников в прошлом и в советский период.

Техсовет отметил, что в журнале недостаточно освещаются вопросы проектирования и эксплуатации электрических систем, станций, сетей и линий электропередачи. В журнале мало обзоров и статей, рассчитанных по своему изложению на широкий круг читателей — инженеров энергосистем и заводов электропромышленности.

Для лучшего удовлетворения запросов, предъявляемых электротехниками СССР к журналу «Электричество», Техсовет рекомендовал редакции усилить: освещение в доступной форме при сохранении высокого научного уровня физических основ и новейших достижений электротехники; освещение проблем передачи электроэнергии трехфазным током при напряжениях, превышающих 220 кВ, и передачи электроэнергии постоянным током высокого напряжения; вопросов объединения электрических систем; вопросов релейной защиты сложных электрических сетей и др.

Техсовет одобрил практику редакции по выпуску тематически направленных номеров, признал ценным развитие в журнале раздела научно-технической хроники, рекомендовал усилить научно-техническую критику и улучшить реферирование материалов из иностранных технических журналов.

23 апреля с. г. Коллегия Министерства электростанций СССР заслушала и обсудила доклад о работе журналов «Электрические станции», «Электричество», «Известия ВТИ», «Гидротехническое строительство» и «Промышленная энергетика».

Среди отмеченных Коллегией МЭС общих недостатков в работе журналов указано, что журналы плохо привлекают авторов с производства (большинство опубликованных статей написаны работниками центрального аппарата и институтов), что не изжита порочная практика длительной задержки статей в редакциях журналов. Коллегия в разделе решения по журналу «Электричество» отметила, что журнал правильно освещает ряд актуальных научно-технических и технико-экономических проблем в области электроэнергетики. Как на существенный недостаток Коллегия МЭС обратила внимание на крайне слабое освещение вопросов, связанных с проектированием и эксплуатацией электрических систем, применением более высоких напряжений, а также с передачей энергии на большие расстояния.

Редколлегиям журналов предложено: принять меры по расширению авторского коллектива путем привлечения авторов с производства, повысить качество редактирования, в месячный срок решить вопрос о материалах, нахо-

дящихся в редакциях без движения свыше 40 дней; в дальнейшем рассмотрение поступающих статей и уведомление их авторов о принятии или отклонении материалов производить в месячный срок.

Коллегия МЭС обязала редакции журналов уделять в тематических планах особое внимание: вопросам внедрения новейших технических достижений в эксплуатацию проектирования и строительства энергетических предприятий; вопросам улучшения работы электростанций и использования резервов по досрочному выполнению летнего плана; популяризации достижений советской науки и техники, а также практического опыта советских энергетиков; критическому освещению опыта энергетического хозяйства зарубежных стран.

Госэнергоиздату совместно с редколлегиями журналов предложено на основе решения Коллегии МЭС разрабатывать план практических мероприятий по улучшению работы журналов.

## 2. В Энергетическом институте им. Кржижановского АН СССР

29 апреля с. г. в Энергетическом институте им. Кржижановского АН СССР состоялось заседание Ученого совета под председательством академика А. В. Винтера. В этом заседании по поручению Отделения технических наук АН СССР обсуждалась работа журнала «Электричество» за 1946 и 1947 гг. От бюро ОТН в заседании принимали участие академик А. В. Винтер и члены комиссии АН СССР В. И. Вейц и К. А. Круг.

С отчетным докладом о работе журнала выступил редактор журнала Г. Н. Петров. В выступлениях по докладу приняли участие: Ю. Г. Толстов (сообщивший результаты ознакомления по поручению Электротехнической секции Ученого совета ЭНИН с комплектами журналов «Электричество» за 1946—1947 гг.), В. И. Горюхи, И. С. Стекольников, В. И. Попков, Л. И. Гутенмахер, И. С. Брук, А. И. Москвитин, И. М. Маркович, В. С. Тафт, С. С. Чугунов, И. Т. Тырбович, Н. А. Поляк, Э. А. Меерович и А. В. Винтер.

Ученый совет ЭНИН в своем решении подчеркнул большое значение правильной организации работы журнала «Электричество», являющегося единственным негосударственным научным электротехническим журналом, рассчитанным на широкий круг электротехников всего Советского Союза. Ученый совет отметил, что в числе авторов статей имеется ряд видных советских электротехников; что журнал расширил раздел, посвященный истории электротехники и освещению роли русских электротехников в развитии науки и техники; что в журнале значительно шире, чем раньше, отражалась жизнь научно-исследовательских учреждений, вузов и научных обществ.

Вместе с положительными сторонами работы редакции Ученый совет указал на ряд существенных недостатков: отсутствие систематического организованного руководства основными научными разделами журнала; пробелы в освещении организационных вопросов научно-исследовательской работы и деятельности энергетических институтов АН союзных республик; недостаточность научной критики на страницах журнала и др.

Ученый совет в своем решении, в частности, рекомендует: организовать редактирование и ведение основных научно-технических разделов журнала ответственными за них лицами, опирающимися на широкий актив научных работников; пополнить состав редколлегий представительствами АН СССР и ЭНИН АН СССР; не допускать публикаций статей по частным узкоспециальным вопросам, направляя такие статьи в отраслевые журналы; ввести обсуждение работы научно-исследовательских организаций и вопросов координации научной работы.

## Учебник электротехники для неэнергетических вузов

А. С. КАСАТКИН и М. А. ПЕРЕКАЛИН. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Издание третье, заново переработанное. Допущено Министерством высшего образования СССР в качестве учебника для высших технических учебных заведений. Госэнергоиздат, 1947, 740 стр., тираж 50 000 экз., цена 28 руб. 50 коп.

Книга представляет собой учебник по общей электротехнике для студентов неэнергетических вузов. В главах I—IV излагаются основные сведения по электрическим цепям постоянного тока, электрическому полю и электромагнетизму, в главах V—VII — основные сведения по переменным токам, в главах VIII—IX — электрические измерения и трансформаторы, в главах X—XII — электрические машины асинхронные, синхронные и коллекторные, в главах XIII—XIV — электронные и ионные преобразователи и электрическое освещение и в главах XV—XVII — коммутационная аппаратура, электрические сети и подстанции и электрические станции.

Создание хорошего учебника по курсу общей электротехники является чрезвычайно важным делом. Таким учебником будут пользоваться огромные массы студентов неэнергетических вузов — химических, металлургических, горных, строительных и др. Поэтому рецензируемая книга, как допущенная в качестве учебника, должна удовлетворять высоким требованиям, предъявляемым советской высшей школой к учебникам.

Нужно признать, что в основном книга действительно является хорошим учебником по курсу общей электротехники. Она вполне охватывает материал, излагаемый в курсах общей электротехники при отводимом на них числе часов от 100 до 140. Материал изложен на высоком научном уровне. Книга написана простым и доходчивым языком и снабжена весьма большим числом (586) рисунков, в подавляющем большинстве четко и удачно выполненных. Порядок изложения материала правильный и вполне себя оправдывает. Числовые примеры, приведенные в книге, крайне малочисленные, но выбраны удачно.

Весьма отраднo, что авторы ввели в учебник символический метод (§ 66—68) и краткое и изящное изложение простейших круговых диаграмм (§ 69). Строя круговую диаграмму разветвленной цепи с переменным активным сопротивлением, авторы сумели обойтись без опыта обратного короткого замыкания. Хорошо написан § 77, посвященный механическому устройству электроизмерительных приборов, магнитоэлектрическая (стр. 266) и электродинамическая (стр. 270) системы приборов. Ясно показано различие между векторными диаграммами неподвижного и вращающегося асинхронного двигателя (рис. 302 и 304). Дан сравнительный анализ явлений, имеющих место при загрузке или разгрузке синхронных и асинхронных машин (стр. 444). Хорошо составлены § 133 (об условиях устойчивой работы синхронной машины), § 157 (об однофазных коллекторных двигателях), раздел, посвященный автоэлектронной эмиссии в ртутных выпрямителях (стр. 587—588), § 180 (сравнительная характеристика электрических источников света).

К достоинствам учебника относится то, что отдельные важные вопросы, имеющие большое практическое значение, изложены предельно сжато или даже только поставлены (ламповые усилители и генераторы, катодный осциллограф, радиолокатор, телевизор и др.). Это должно возбудить у читателя интерес к самостоятельному, более углубленному их изучению.

Однако, книга не лишена и недостатков. Прежде всего, объем ее чрезмерно велик. Целый ряд вопросов, изложенных в книге, может быть опущен, ибо обычно в курсах общей электротехники не дается. Сюда относятся: гл. II — разветвленные цепи постоянного тока, за исключением § 14, который посвящен расчету токов в развет-

вленной цепи методом уравнений Кирхгофа и поэтому должен быть сохранен. Для изучения же методов наложения, контурных токов и узловых потенциалов читатели могут обратиться к курсу теоретической электротехники, тем более, что два последних метода нигде дальше в курсе общей электротехники не применяются. Следует исключить вопросы о цилиндрическом конденсаторе, поле двухпроводной линии и § 33 о постоянных магнитах, как не находящие себе дальнейшего применения в данном курсе.

Совершенно излишне подробно приводить математические выкладки при выводе эффективных значений тока и напряжения, сводящиеся к интегрированию квадрата синуса (стр. 166); излишне выводить выражение для эффективного значения напряжения, если это только что сделано для тока (стр. 167). То же относится к выводу вращающего момента индукционного прибора — не стоит тратить целую страницу на элементарное интегрирование (стр. 276).

Вполне можно исключить вопрос о схеме замещения трансформатора и о параллельной работе трансформаторов (§ 98). Следует также значительно сократить гл. X — асинхронные машины, исключив из нее схемы замещения, круговую диаграмму, работу асинхронной машины в качестве электромагнитного тормоза, индукционного регулятора и фазорегулятора и асинхронный генератор (§ 118—121). В главе о коллекторных машинах можно опустить § 139, посвященный устройству петлевой и волновой обмоток, репульсионные (§ 158) и трехфазные коллекторные двигатели (§ 159). Наконец, следует значительно сократить три последние главы (XV—XVII), объединив их в одну главу о производстве, передаче и распределении электрической энергии.

Роль русских электротехников в развитии различных областей электротехники отражена в книге совершенно недостаточно. Авторы указали на изобретения А. Н. Лодыгина, И. Ф. Усагина, М. О. Доливо-Добровольского и А. С. Попова только во введении. В тексте изложены закон Джоуля-Ленца и правило Ленца и в § 75 о вращающемся магнитном поле указано, что М. О. Доливо-Добровольский изобрел асинхронный двигатель. Нужно было бы в тексте сказать об открытии В. В. Петровым электрической дуги, о работах А. Г. Столетова, впервые установившего зависимость намагничивания железа от внешнего намагничивающего поля, о построении русским ученым Б. С. Якоби первого в мире электромагнитного двигателя, о работах М. О. Доливо-Добровольского по передаче электрической энергии трехфазным током, о работах В. Н. Чиколева и др. Следовало бы отметить изобретение М. О. Доливо-Добровольским асинхронного двигателя не в § 75, а в главе X об асинхронных машинах. Авторы во введении указывают, что трансформатор изобрел И. Ф. Усагин. Однако, теперь установлено, что еще раньше И. Ф. Усагина разработал и применял трансформаторы П. Н. Яблочков. Следовало указать, что автор правила Ленца и соавтор закона Джоуля-Ленца — Э. Х. Ленц является русским ученым.

В главе III об электрическом поле в диэлектриках целесообразно определить коэффициент  $k$  в законе Кулона [формула (18,1)], как  $\frac{1}{4\pi\epsilon}$ , немедленно по его введению, тем более, что множитель  $4\pi$  в нем легко ассоциируется

с выражением поверхности сферы  $4\pi r^2$ , на которой величина вектора напряженности поля  $E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2}$  остается постоянной. И не нужно, как это делают авторы, оставлять  $k$  неопределенным. Излагая закон Кулона, вводя понятие напряженности поля и доказывая теорему Гаусса, чтобы только после этого его определить.

Как известно, учение об электростатическом поле и о магнитном поле постоянных токов вполне может быть построено на одном (для каждого из них) каком-либо основном соотношении, вводимом как результат обобщения опытных данных. Например, таковыми соотношениями могут быть закон Кулона в электростатике и закон Ампера в электромагнетизме. Поэтому совершенно излишне авторы вводят в электромагнетизм два основных закона как обобщение опытных данных — выражение силы, с которой магнитное поле действует на движущийся заряд (стр. 102) и закон полного тока (стр. 108); оба эти закона могут быть выведены из закона Ампера.

На стр. 121 при доказательстве равенства нулю напряженности магнитного поля  $H$  вне тороида, взяв два круговых контура вне тороида, из равенства нулю интеграла по контуру  $\oint_e H d\mathbf{l} = \Sigma = 0$ , авторы заключают о равенстве нулю поинтегрального выражения, чего делать, вообще говоря, нельзя.

Странно, что рассчитанную формулу для ферромагнитных участков в  $H \left[ \frac{A}{\text{cm}} \right] = 0,8 B [\text{Gs}]$  авторы дают не при расчете магнитных цепей (стр. 125), а говоря об энергии магнитного поля (стр. 155).

В § 33, посвященном постоянным магнитам, не четко поставлены условия задачи расчета магнитной цепи с постоянным магнитом. Кроме того, решение не доведено до конца, ибо коэффициент  $N = \frac{S_m}{l_m} \sum \frac{l_k}{\mu_k S_k}$  не может

быть подсчитан непосредственно, ибо на каком-либо участке „ $k$ “ магнитной цепи (полюсные наконечники, якорь и др.)  $\mu_k$  с ранее неизвестно и может быть найдено только по  $B_k$ , зависящему от  $B$ , которое, в свою очередь, подлежит определению. Поэтому расчет ведется так. Задаются рядом значений  $\mathcal{F}$ , по ним находят  $B_k$ ,  $\mu_k$  и коэффициенты  $N$  и, построив вспомогательные прямые  $H = NB$ , находят соответствующие значения  $B''$ ; как правило,  $B''$  не равно  $B'$ . Истинное значение  $B$  найдется в точке пересечения кривой  $B'' = f(\mathcal{F})$  с биссектрисой координатного угла  $B'' = B'$ . Обо всем этом в книге не сказано.

Следовало в самом начале главы о переменных токах дать формулу  $\omega_{\text{эл}} = p \omega_{\text{мех}}$  и не вводить вместо этого понятие „некоторого фиктивного двухполюсного генератора“ (стр. 162).

Мотивируя целесообразность пользования синусоидальными переменными напряжениями и токами, авторы забывают указать на то, что синусоида — единственная периодическая зависимость, при изменении по которой формы кривых напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора совпадают.

Непонятно, почему авторы не могут обойтись только с термином «активное сопротивление» и вводят еще и «безреактивное».

В книге иногда встречаются утверждения, которые могут вызвать у читателей недоумение. Например, на стр. 188 сказано:  $x_L = \omega L$  представляет собой частный слу-

чай реактивного сопротивления  $x = \omega L - \frac{1}{\omega C}$  при коротком замыкании пластин конденсатора ( $C = \infty$ ), что равносильно отсутствию в цепи емкости ( $\frac{1}{\omega C} = 0$ ). Едва

ли можно отсутствием в цепи емкости назвать случай, когда  $C = \infty$ . Нужно было бы сказать, что случай  $C = \infty$  равносильен отсутствию в цепи, т. е. равенству нулю, емкостного сопротивления  $x_C$ . На стр. 224 авторы пишут, что „правила алгебраического сложения комплексных и геометрического сложения предельных импедансов практически совпадают“. Если авторы имеют в виду сущность операций, то позволительно спросить, почему „практиче-

ски“, а не „принципиально“? А если они имеют в виду различную точность аналитических и графических расчетов, то об этом нужно сказать.

Способ обоснования символического метода, данный в книге, оставляет желать много лучшего. Авторы не показали, как связано мгновенное значение тока (или напряжения) с его комплексом

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha) = \text{Im} [I_m e^{j\alpha} \cdot e^{j\omega t}] = \text{Im} [I_m e^{j\omega t}]$$

и тем затупили читателю понимание. Также не даны основные соответствия символического метода

$$i \doteqdot I_m, \quad \frac{di}{dt} \doteqdot j \omega I_m, \quad \int i dt \doteqdot \frac{I_m}{j \omega}.$$

Поэтому и законы Кирхгофа в комплексной форме, как они изложены в книге, не могут считаться доказанными с полной строгостью. Раз авторы ввели символический метод, то нельзя не сказать о выражении мощности в комплексной форме, тем более, что это можно сделать очень кратко. Странно видеть, что введя в первой половине книги символический метод, авторы не пользуются им в дальнейшем. Действительно, при изложении трехфазных токов (§ 70–73), трехобмоточных трансформаторов (§ 95), измерительных трансформаторов (§ 99), векторной диаграммы синхронного генератора (§ 127) авторы над векторами ставят черточки и не вводят  $j$  как оператора поворота на  $90^\circ$ .

Излагая при равномерной нагрузке соединения звездой с нулевым проводом и без него (§ 71) и соединения треугольником (§ 72), следовало бы рассмотреть, что получится при перегорании предохранителя в одном из линейных проводов. Этот вопрос имеет большое практическое значение, хотя бы в осветительных сетях.

Нельзя оправдать отсутствия в книге раздела о соединении вращающегося магнитного поля трехфазной распределенной обмоткой. Это настолько важный момент при изложении электрических машин переменного тока, что скорее можно было бы опустить вопрос о получении вращающегося поля при помощи трех катушек, чем вышеуказанный.

Непонятно мотивировано, почему шунты применяются для амперметров магнито-электрической и тепловой систем и не применяются для электромагнитных, электродинамических и индукционных приборов (стр. 284). Остается неясным, почему габариты шунтов должны быть малы для первых и велики для вторых. Не указано, почему температурное влияние на точность измерений совершенно различно для приборов этих систем (исключая из сравнения индукционные приборы).

Излагая характеристики самовозбуждающихся генераторов и двигателей постоянного тока, нужно было бы вначале дать их общее определение вне зависимости от способа соединения обмоток якоря и возбуждения. Это позволило бы изучающему легче разобраться в многообразии этих характеристик и лучше усвоить особенности их для шунтовых, серийных и компаундных машин.

Недостатком книги является отсутствие последовательно проведенной сравнительной характеристики важнейших свойств машин синхронных, асинхронных и коллекторных. Подобное сравнение, как показал опыт, весьма помогает изучающим лучше разобраться в достоинствах и недостатках отдельных видов машин и легче их запомнить. Во всяком случае, такое сравнение, органически вытекающее из обобщенной теории электрических машин, особенно необходимо и полезно в курсе общей электротехники.

Неясно изложены вопросы о репульсионных (§ 158) и трехфазных коллекторных двигателях (§ 159), может быть потому, что они разобраны слишком сжато.

Если уж говорить об отпаянном игнитроне (стр. 603), то нужно объяснить, зачем в нем нужен анод возбуждения.

При определении понятия люмена (стр. 625) необходимо пояснить происхождение цифры  $\frac{1}{621}$ .

В настоящее время находят широкое применение разьединители мощности, способные отключать рабочий ток фидера, и снабжаемые для выключения токов к. з. предохранителями. О них необходимо сказать наряду с обычными разьединителями и масляными выключателями.

Встречаются и отдельные промахи в тексте: на стр. 408 указано, что намагничивающий ток асинхронного двигателя пропорционален магнитному потоку и обратно пропорционален магнитному сопротивлению. Однако, из закона Ома для магнитной цепи следует, что намагничивающий ток прямо пропорционален магнитному сопротивлению; из формулы  $\vec{E}_{р\gamma} = \vec{I}x_{\gamma}$ , приведенной на стр. 453, следует, что  $\vec{E}_{р\gamma}$  коллинеарно  $\vec{I}$ , что неверно; формулы, приведенные в конце стр. 465 и 467, противоречат друг другу без наличия множителя  $j$  при  $x$  неправильны; по той же причине неверна первая формула (на стр. 468); в

формуле (141,2) коэффициент должен быть 0,102, а не 10,2.

Указанные недостатки не меняют, однако, общей оценки книги, данной выше. От уменьшения объема книги только выиграет и приобретет еще большую популярность среди студентов неэнергетических вузов.

Кандидат техн. наук, доц. С. В. СТРАХОВ

Московский энергетический институт им. Молотова



## Книга о слюде

Е. К. ЛАШЕВ. СЛЮДА. ч. 1. Свойства слюд. Промстройиздат, 1948, 296 стр. + вклейка, тираж 3 000 экз. Цена 16 руб. 50 коп.

Несмотря на то, что слюда является одним из лучших и важнейших электроизоляционных материалов и уже давно находит широкое применение для весьма ответственных целей в электропромышленности, в радиопромышленности, в производстве электровакуумных приборов, свечей зажигания для авиамоторов и т. п., подробной монографии, посвященной свойствам и применению слюды, до сих пор не существовало как в русской, так и иностранной литературе.

Автор книги является видным специалистом в области слюды и слюдяной электроизоляции. Год выхода в свет рецензируемой книги совпадает с годом исполняющегося 50-летия непрерывной плодотворной деятельности Е. К. Лашева в области изучения слюды и изделий из нее. Прекрасное знание излагаемых в книге вопросов позволило ему широко рассмотреть свойства слюд на основе как собственных экспериментальных данных, так и изучения опыта различных лабораторий, работавших в области исследования слюды и литературных данных.

Рецензируемая книга дает минералогическую и химическую характеристики различных слюд и подробное описание химических, общез физических, тепловых, механических и электрических свойств слюд различных союзных (включая открытие за самые последние годы), а также некоторых зарубежных месторождений.

Книга содержит четыре главы, 151 рисунок, 152 таблицы, указатель литературы, предметный и именной указатели. В первой главе на 65 страницах рассматриваются следующие свойства слюд: минералогическая характеристика, химический состав, общие физические свойства. В частности, достаточно подробно рассматриваются кристаллическое строение слюд и их оптические константы, а также зависимость между оптическими свойствами и химическим составом, химическая стойкость, гигроскопичность и водопоглощаемость слюд.

Вторая глава посвящена тепловым свойствам слюды и изложена на 68 страницах. В этой главе рассматриваются: изменение внешнего вида слюды при нагревании, плавление, вспучивание, обезвоживание различных слюд, их теплопроводность, теплоемкость и линейное расширение. Помимо сводок, данных в виде таблиц и кривых, дано описание установок и методики испытания.

В третьей главе на протяжении 59 страниц рассматриваются механические свойства слюд, а именно: расщепление, прочность на разрыв, на сжатие, на срез, упругость, гибкость, твердость, общая характеристика механических свойств.

Четвертая глава (89 страниц) посвящена электрическим свойствам. В этой главе непосредственному рассмотрению электрических свойств слюды автор предвещает подробное (на 18 страницах) рассмотрение встречающихся в слюдах включений как минеральных, так и воздушных, а в дальнейшем, при рассмотрении электрических свойств, специально останавливается на зависимости электрических свойств от тех или иных включений. Автор приводит методики измерений и данные измерений, касающихся различных слюд, для удельного объемного и поверхностного сопротивлений, перпендикулярно и параллельно плоско-

стям спайности, для диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь, в зависимости от частоты, напряжения и температуры, и, наконец, для электрической прочности при различной форме электрического поля, в зависимости от длительности приложения напряжения и его вида, в зависимости от температуры.

Предположенная к изданию вторая часть книги посвящается вопросам обработки и применения слюды и характеристике различных слюдяных изделий.

Ряд разделов книги, например изложение вопросов нагревостойкости различных слюд, твердости слюд, и особенно важных для электротехники вопросов электрических свойств слюд, в частности, в связи с минеральными и газовыми включениями, получил в рецензируемой книге достаточно подробное рассмотрение впервые, причем как раз в этих разделах весьма интересно изложение оригинальных работ автора. Очень ценны обобщения по тепловым, механическим и электрическим свойствам слюд, в сжатом изложении подводящие итоги весьма длительного и глубокого изучения автором рассматриваемых вопросов.

При составлении книги использовано большое число литературных источников; указатель литературы, помещенный в конце книги, содержит 183 названия. При изложении упоминаемых литературных работ Е. К. Лашев дает их критический разбор. Так, при рассмотрении ряда иностранных работ, например Цикермана по адсорбции газов на слюде (стр. 65), Брена—по обезвоживанию мусковита при нагреве (стр. 103), Вуда—по теплопроводности слюд (стр. 131), Хиднерта и Диксона—по тепловому расширению слюд (стр. 133), Британской исследовательской ассоциации—по твердости слюд (стр. 86), Е. К. Лашев вскрывает существенные недостатки этих работ на основании как собственных опытов, так и ссылки на работы других советских исследователей. Менее критически автор освещает литературные данные по исследованию электрических свойств слюд. С достаточной полнотой в книге освещены работы по изучению электрических свойств слюд, проведенных в СССР Б. М. Вулом, А. Ф. Иоффе, М. И. Мантровым, М. М. Михайловым и другими исследователями-электрофизиками. К сожалению, не приведены интересные данные о природе проводимости слюд В. И. Пружининой-Грановской, опубликованные в 1937 г.

Книга Е. К. Лашева представляет большую ценность для работников предприятий и научно-исследовательских организаций, имеющих дело с добычей, обработкой, исследованием и применением слюды. Несомненно, что потребность в книге, посвященной рассмотрению свойств широко применяющегося, главным образом, в электротехнике и радиотехнике, материала—слюды, крайне необходима и выход в свет такой книги весьма своевременен.

Кандидат техн. наук, доц. Б. В. ГОРЕЛИК  
Научно-исследовательский институт МПСС СССР

Кандидат техн. наук, доц. Б. М. ТАРЕЕВ  
Заведующий кафедрой электроматериаловедения Всесоюзного заочного энергетического института



# Книги по вопросам электричества, электротехники и электроэнергетики, изданные в СССР в 1947—1948 гг.<sup>1</sup>

Издания 1947 г.

Аронов Б. К. Простейший ламповый радиоприемник. Гостехиздат Украины, 43 стр., ц. 2 руб. (на украинском языке).

Абонентский телеграф. Информационный сборник. Связьиздат, 84 стр., ц. 4 руб.

Агальцов С. Д. Справочник электромонтера. Трудрезервиздат, 184 стр., ц. 4 руб.

Аккумуляторы щелочные кадмиево-никелевые. Изд. БТИ МПСС СССР, 12 стр., ц. 1 руб. 90 коп.

Акулишин П. К. Скрещивание телефонных сетей. Связьиздат, 136 стр., ц. 9 руб.

Алексеев В. М. Электрооборудование и электродвижение судов. Судпромгиз, 308 стр., ц. 30 руб.

Алябьев М. И. Пособие к практическим занятиям по корабельным электрическим машинам. Ч. I. Генераторы двойного тока. Академия кораблестроения им. Крылова, 254 стр., цена не указана.

Арутюнов В. О. Судовые электроизмерительные приборы. Госэнергоиздат, 36 стр., беспл.

Архипов С. Н. Наблюдение и связь на военном корабле. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. Военное изд-во, 96 стр., ц. 1 руб.

Базыкин К. А. Устройство, эксплуатация и ремонт телефонных станций ручного обслуживания. Рекомендовано в качестве учебного пособия для ремесленных училищ связи. Трудрезервиздат, 146 стр., ц. 8 руб.

Балашинский Б. Л., Соколов И. И., Фомин В. Н. Справочник по электрическим лампам накаливания. ВТИ МПС СССР, 63 стр., ц. 6 руб.

Батареи анодные сухие. Изд. БТИ МПСС СССР, 8 стр., ц. 1 руб. 25 коп.

Батареи из щелочных кадмиево-никелевых аккумуляторов. Изд. БТИ МПСС СССР, 8 стр., ц. 1 руб. 90 коп.

Белецкий А. Ф., Гурбанов Е. Ю., Штурбин В. Ф. Руководство к лабораторным занятиям по курсу телефонии. Под ред. А. Г. Эльсниц. Ч. I. Физические основы телефонии. Академия связи им. Буденного, 58 стр., цена не указана.

Бенуа Ф. Ф. Электродуговая сварка. Под ред. В. П. Вологодина. Изд. 4-е, переработанное. Речиздат, 375 стр., ц. 13 руб. 50 коп.

Богомолов. О наивыгоднейшем распределении нагрузки между агрегатами электростанций. Изд. БТИ Мин. угольной промышленности Западных районов СССР, 10 стр., ц. 2 руб.

Бородин С. С. Низковольтная аппаратура (МЭП СССР) ЦБТИ МЭП, 80 стр., ц. 16 руб. 85 коп.

Браславский Д. А., Логунов С. С. Приборы на самолете. Допущено в качестве учебного пособия для авиационных техникумов. Оборонгиз, 524 стр., 18 руб.

Вайнел Дж. В. Аккумуляторные батареи (пер.). Военное изд-во, 460 стр., ц. 15 руб.

Васильев Н. Н., Петров А. И. Схемы электрического управления металлорежущими станками. Вып. I. Гостехиздат Украины, 96 стр. + 46 чертежей, ц. 20 руб.

Вологдин В. П. Токи высокой частоты и их применение в промышленности (Всесоюзное общество по распространению политических и научных знаний). Изд-во «Правда», 24 стр., ц. 60 коп.

Волоцкой А. Н. и др. Телеграфно-телефонные линии связи. Учебник для ремесленных училищ связи. Трудрезервиздат, 356 стр., ц. 15 руб.

Восстановление Днепровской гидроэлектростанции им. В. И. Ленина. Под ред. Ф. Г. Логинова. Госэнергоиздат, 110 стр.

Всесоюзная научно-техническая сессия по светотехнике. Резолюции (ОТН и ОФМН Академии наук СССР, ВНИТОЭ и НТО МЭИ). Госэнергоиздат, 15 стр., беспл.

Всесоюзное научно-техническое общество радиотехники и электросвязи им. А. С. Попова. Труды секции распространения радиоволн. Под ред. С. Э. Хайкина. Изд. ВНИТОЭ, 23 стр., ц. 3 руб.

Высокочастотная техника и промышленность средств связи. Аннотации (МПСС СССР, БТИ). Госэнергоиздат, 36 стр., ц. 6 руб.

Гейзенберг В. Физика атомного ядра. Пер. М. Н. Сельдальцевой. Под ред. К. В. Астахова. Гостехиздат, 171 стр., ц. 2 руб. 60 коп.

Гершенгорн А. И. и др. Разрядники и защитные конденсаторы США. Дом энергетики Минцветметзолото, 151 стр., беспл.

Гиршин П. И. Памятка по экономии электроэнергии. Изд. ВНИТО текстильной промышленности. 29 стр., цена не указана.

Гладкий. Проект типового проволочного вешательного узла мощностью 50 ватт на переменном токе. Изд. Управления электрификации Мин. сельского хозяйства СССР, 35 стр. + 31 лист чертежей, ц. 19 руб.

Головешкин В. Г., Мурашко В. В. Телеграфное дело. Пособие для сержантов и старших специалистов войсковой связи. Военное изд-во, 496 стр., ц. 12 руб.

Головин Г. Волшебные опилки (изобретение радио А. С. Поповым). Союзпечать, 24 стр., ц. 1 руб.

Гольдин М. Пуск мощных короткозамкнутых моторов. Изд. БТИ Мин. угольной промышленности Западных районов СССР, 5 стр., ц. 1 руб.

Гумель А. Н., Малышев В. З. и др. Руководство к электрическим измерениям линий связи. Связьиздат, 11 стр., ц. 3 руб. 50 коп.

Данилевский В. В. Русская техника. Лениздат, 41 стр., ц. 30 руб.

Дас Гупта Н., Гош С. Камера Вильсона и ее применение в физике. Пер. Э. Л. Буриштейна, под ред. П. А. Черенкова. Гос. изд-во иностранной литературы, 152 стр., ц. 11 руб.

Дмитриев И. Н. Определение места корабля по радиолокации. Военное изд-во, 116 стр., ц. 4 руб.

Догадин В. Н. Радиотрансляционные сети. Связьиздат, 204 стр., ц. 7 руб.

Дубенецкий В. Г. Радиоизмерительная техника (общая и специальная). (ЦБТИ МПСС СССР). Госэнергоиздат, 75 стр., ц. 7 руб. 50 коп.

Естин П. М. Амперметры и вольтметры электромагнитной системы ЭК-120 (стационарные). Оборонгиз, 12 стр., беспл.

Жеребцов И. П. Основы радиотехники. Одобрено в качестве учебного пособия для ремесленных училищ. Связьиздат, 348 стр., ц. 12 руб. 25 коп.

Земной магнетизм и электричество. Под ред. Н. В. Пушкова. Вып. I. Гидрометеозиздат, 92 стр., ц. 7 руб. 50 коп.

Иванов Г. К., Холоденко Л. Е. Каталог бытовых электроизделий (МЭП СССР ЦБТИ). Госэнергоиздат, 156 стр., ц. 13 руб.

Игнатьев А. Д., Сысоев В. К. Телеграфный стартовый аппарат Т-15. Связьиздат, 180 стр., ц. 7 руб. 50 коп.

Изоумов Н. М. Импульсные системы многоканальной радиосвязи. Военное изд-во, 112 стр., ц. 2 руб. 75 коп.

Инструкция для дежурного электромонтера кислородной станции. Изд. завода «Азовсталь», 5 стр., цена не указана.

Инструкция для крановщиков мостовых кранов (Челябинский завод ферросплавов). Изд-во «Челябинский рабочий», 38 стр., цена не указана.

Инструкция 30-41 для проверки электрических счетчиков активной и реактивной энергии. Изд. официальное. Комитет по делам мер и измерительных приборов при СНК СССР, 31 стр., ц. 3 руб.

Инструкция по обслуживанию свинцовых разрядников 35 и 6 кв. Изд. Горэнерго, 7 стр., цена не указана.

Инструкция по паспортизации междугородних кабельных линий и кабельных вставок (Мин. связи СССР). Связьиздат, 48 стр., беспл.

Инструкция 69-44 по проверке измерительных трансформаторов. Изд. официальное. Комитет по делам мер и

<sup>1</sup> Электричество, № 7, стр. 96 и № 12, стр. 75, 1947; № 4, стр. 94, 1948.

- измерительных приборов при СНК СССР, 19 стр., 1 руб. 50 коп.
- Инструкция по технике безопасности для электриков цеха газоснабжения. Изд. завода «Азовсталь», 11 стр., цена не указана.
- Инструкция по технике безопасности для электромонтеров и др. Изд. завода «Красный Аксай», 56 стр., беспл.
- Инструкция по уходу и эксплуатации синхронных генераторов серии СГ (Утверждено Управлением по электрификации Мин. сельского хозяйства СССР). Изд-во «Сельхозная газета», 28 стр., беспл.
- Инструкция Л-5 по эксплуатации изоляторов воздушных высоковольтных линий (ВВС Мосэнерго). Госэнергоиздат, 28 стр., беспл.
- Инструкция участковому надсмотрщику по обслуживанию междугородних телеграфно-телефонных линий. Изд. Ленинского обл. управления связи, 31 стр., цена не указана.
- Ионов Б. И. Руководство судовому радисту. Речиздат, 336 стр., ц. 11 руб. 85 коп.
- Иоффе А. Ф. Электрические свойства твердых тел (Всесоюзное общество по распространению политических и научных знаний). Лениздат, 32 стр., ц. 75 коп.
- Исследования в области электрических и магнитных измерений. Под ред. Н. А. Маренина. Институт метрологии им. Менделеева, 132 стр., ц. 8 руб.
- Капцов Н. А. Павел Николаевич Яблочков—слава и гордость русской электротехники (Всесоюзное общество по распространению политических и научных знаний). Изд-во «Правда», 33 стр., ц. 60 коп.
- Кармазов М. Г. Автоматическая телефония. Допущено в качестве учебника для техникумов. Изд. 2-е, переработанное. Связьиздат, 239 стр., и атлас схем—41 лист чертежей, ц. 18 руб.
- Каскнеэм А. Задачник по электротехнике. Изд-во «Педагогическая литература», 100 стр., ц. 8 руб. (на эстонском языке).
- Каталог кранового электрооборудования. Вып. 7. Крайние защитные панели типа В и Е. Изд. ЦБТИ МЭП СССР, 32 стр., ц. 2 руб. 80 коп.
- Каталог на гальванические элементы и батареи (Мин. промышленности средств связи СССР). БТИ МПСС, 32 стр., ц. 2 руб.
- Китаев Е. В. Основы телефонии и телефонные станции. Одобрено в качестве учебника для ремесленных училищ связи. Связьиздат, 240 стр., ц. 9 руб. 50 коп.
- Климов А. Н., Носовичкий, Ю. Е. Ратнер А. В. Справочник по электропитанию установок связи. Военное изд-во, 360 стр., ц. 14 руб.
- Конденсаторы постоянной емкости с диэлектриком из смолы, запрессованным в пластмассу. Изд. БТИ МПСС СССР, 12 стр., ц. 1 руб. 90 коп.
- Конденсаторы постоянной емкости типа КБГ. Изд. БТИ МПСС СССР, 9 стр., ц. 1 руб. 90 коп.
- Кольтоф И. М., Лайтинен Г. А. Определение концентрации водородных ионов и электротитрование. Пер. П. К. Агасян и В. М. Пешковой, под ред. Е. С. Пржевальского. Гос. изд-во иностранной литературы, 254 стр., ц. 15 руб.
- Корф С. Счетчики электронов и ядерных частиц. Пер. В. А. Трофимовой, под ред. В. И. Векслера. Гос. изд-во иностранной литературы, 244 стр., ц. 15 руб.
- Кренделев А. М. Руководство к лабораторным занятиям по специальным электрическим машинам. Под ред. И. И. Буданцева. Академия связи им. Буденного, 70 стр., цена не указана.
- Кушнер Ю. М. Окно в невидимое (электронный микроскоп). Гостехиздат, 56 стр., ц. 90 коп.
- Кюри М. Радиоактивность. Пер. З. В. Ершовой и В. Д. Никольского, под ред. В. П. Баранова. Гостехиздат, 520 стр., ц. 26 руб.
- Лавров В. М. Теория электромагнитного поля. Ч. I. Электростатическое поле, 193 стр., ч. II. Стационарное поле, 139 стр. Всесоюзный заочный электротехнический институт связи, беспл.
- Лебедев М. М. Севанская проблема. Изд. Академии наук Армянской ССР, 77 стр.
- Литвак Л. В. Методические указания по оперативному контролю за техническим состоянием термических электропечей сопротивления. Изд. Мин. авиационной промышленности СССР, 30 стр., цена не указана.
- Майзель С. О. Новые источники света (Всесоюзное общество по распространению политических и научных знаний). Изд-ва «Правда», 19 стр., ц. 60 коп.
- Маккол Л. Основы теории сервомеханизмов. Пер. И. Б. Мандельштама, под ред. Я. З. Цыпкина. Гос. изд-во иностранной литературы, 151 стр., ц. 9 руб.
- Мартынов М. В. Лаборатория горной электротехники (типичное оборудование и методика лабораторно-практических занятий, ч. 3). БТИ Минзапугля, 41 стр., цена не указана.
- Меклер А. Г. Электропривод крановых механизмов. Машгиз, 192 стр. + вклейка, ц. 14 руб.
- Мокеев А. Н. Литейное дело на заводах свинцовых аккумуляторов. Госэнергоиздат, 167 стр., ц. 8 руб.
- Мукерия А. В. Как найти и устранить неисправности и повреждения в электрической цепи электроваз. Под ред. М. А. Хевсуриани. Изд. Дома техники Закавказской железной дороги, 56 стр., ц. 10 руб. (на грузинском языке).
- Мучник А. Я., Соловьев И. И. Замыкания на землю в кабельных сетях и защита от них (МЭС СССР. Институт повышения квалификации ИТР). Госэнергоиздат, 68 стр., ц. 8 руб. 50 коп.
- Научно-техническая сессия по экономии электроэнергии в промышленных предприятиях. Октябрь 1947 г. Тезисы докладов (МОНИТОЭ и Мосэнерго). Госэнергоиздат, 48 стр., беспл.
- Ольсон Г. Динамические аналогии. Пер. Б. Л. Коробочкина, под ред. М. А. Айзерман. Гос. изд-во иностранной литературы, 224 стр., ц. 13 руб.
- Пайерлс Р. Электронная теория металлов. Пер. Г. М. Будянского, под ред. Б. Т. Гейликмана. Гос. изд-во иностранной литературы, 96 стр., ц. 7 руб. 50 коп.
- Пацiora П. П. Цепные электромоторные пыли серийного производства. Изд. Техн. совета по механизации трудоемких и тяжелых работ при СНК СССР, 20 стр., ц. 2 руб.
- Передатчик радиомаяка с одновременной телефонией. Изд. Аэрофлота, 39 стр., беспл.
- Перли С. Б. Самодельная ветряная электростанция. Гостехиздат Украины, 44 стр., ц. 2 руб. (на украинском языке).
- Пинес М. И. Задачник по теории переменных токов. Академия кораблестроения им. Крылова, 278 стр., цена не указана.
- Пистолькорс А. А. Антенны. Допущено в качестве учебника для вузов связи. Связьиздат, 480 стр., ц. 14 руб. 50 коп.
- Подземное освещение в шахтах Англии. Углетехиздат Западугля, 26 стр., ц. 1 руб. 25 коп.
- Покрышевский Д. Н. Инструкция по технике безопасности при работе с переносной электролампой. Изд. Днепровского отделения НИТО водного транспорта, 9 стр., цена не указана.
- Поллард Э., Дэвидсон В. Прикладная ядерная физика. Перевод М. Н. Флеровой, под ред. Л. А. Арцимовича. Гостехиздат, 332 стр., ц. 14 руб.
- Попов В. К. Элементы электроавтоматики. Машгиз, 288 стр., ц. 26 руб.
- Попов Л. Г., Реутт Е. К. Линейные сооружения городских телефонных сетей. Одобрено в качестве учебника для ремесленных училищ связи. Связьиздат, 230 стр., ц. 8 руб.
- Правила обслуживания судового электрооборудования и ухода за ним (Мин. морского флота СССР). Изд-во «Морской транспорт», 116 стр., ц. 8 руб.
- Производственно-техническая инструкция по технике безопасности машиниста пульта управления электропечи литейного цеха. Изд. завода «Азовсталь», 8 стр., цена не указана.
- Пылдрус А. Электромонтаж. Ч. 2. Распределительные сети, электропроводка и силовые станции. Изд-во «Педагогическая литература», 316 стр., ц. 12 руб. (на эстонском языке).
- Рабинович Р. И. Электрифицированный колхоз. Свердловгиз, 72 стр., ц. 1 руб. 35 коп.
- Раков В. И. Руководство к лабораторным занятиям по курсу электровакуумных приборов. Академия Кораблестроения им. Крылова, 123 стр., цена не указана.
- Резолюция Второго всесоюзного совещания по высоковольтному электроаппаратостроению 12—16 мая 1947 г.

(ВНИТОЭ и МЭП СССР). Изд. ВНИТОЭ, 18 стр., цена не указана.

Резолюция научно-технической сессии по электрическим машинам 25—30 ноября 1946 г. (ВНИТОЭ и МЭП СССР). 14 стр., Изд. ВНИТОЭ, цена не указана.

Родес Т. Д. Производственные контрольно-измерительные приборы. Пер. под ред. С. П. Щепкина. Госхимиздат, 510 стр., ц. 27 руб.

Руководство к лабораторным работам по специальной электротехнике. Изд. Московского института цветных металлов и золота им. Калинина, 38 стр., беспл.

Рытов С. М., Левшин В. Л., Фейнберг Е. Л., Грошев Л. В. Курс физики. Под ред. Н. Д. Папалекси. Допущено в качестве учебного пособия для втузов и физико-математических факультетов университетов. Т. II. Электричество, оптика, физика атомного ядра. Гостехиздат, 695 стр., 19 руб.

Сборник по обмену производственно-техническим опытом (Технология производства). Бюро технической информации МПСС СССР, 68 стр. + вклейка, ц. 9 руб. 80 коп. (ошибочно указано 6 руб.).

Светомаскировка. Под ред. П. Я. Попова. Изд. 2-е, переработанное (МВД СССР. Управление местной противовоздушной обороны). Военное изд-во, 276 стр., ц. 10 руб.

Сводный каталог кабельной продукции. Вып. 5. Кабели связи. Изд. ЦБТИ МЭП СССР, 36 стр., ц. 6 руб. 85 коп.

Семикин Ф. Е. Практические работы по электрическим машинам. Под ред. В. Ю. Горяинова. Изд. Академии кораблестроения им. Крылова, 152 стр., цена не указана.

Сенкевич А. М. Методика расчета магнитных систем с постоянными магнитами. Изд. Военно-воздушной академии им. Жуковского, 25 стр., цена не указана.

Сент-Джонс Э., Айзенбургер Г. Р. Промышленное просвечивание (Просвечивание материалов рентгеновскими лучами и  $\gamma$ -лучами). Пер. Э. П. Шубина с предисловием Г. С. Жданова. Машгиз, 239 стр., ц. 26 руб. 50 коп.

Сиукаев Н. Атомная энергия. Гос. изд-во Сев.-Осет. АССР, 98 стр., ц. 2 руб. (на осетинском языке).

Сифоров В. И. Радиоприемные устройства ультракоротких волн. Изд. 2-е, исправленное и дополненное. Военное изд-во, 48 стр., ц. 1 руб. 25 коп.

Скиллин Г. Г. Введение в теорию электромагнитных волн. Пер. с англ. А. А. Колосова и А. А. Мееровича. Связьиздат, 200 стр., ц. 10 руб.

Стендер В. В. Диафрагмы для электролиза водных растворов. Госхимиздат, 144 стр., ц. 8 руб. 50 коп.

Стыблик А. В. Измерения в проводной связи. Допущено в качестве учебника для электротехникумов связи. Связьиздат, 315 стр., ц. 11 руб.

Суслов М. П. Телеграфные аппараты Морзе и СТ-35. Утверждено в качестве учебника для ремесленных училищ и школ ФЗО. Связьиздат, 144 стр., ц. 5 руб.

Темпер И. Ю. Радиовещательные станции СССР. Гостехиздат Украины, 16 стр., ц. 1 руб.

Типовые положения о производственно-техническом отделе, производственных службах и др. (МЭС СССР, Технический отдел). Госэнергоиздат, 56 стр., беспл.

Томушев М. М. Стартерные аккумуляторные батареи. Руководство по уходу и обслуживанию. Гостехиздат Украины, 60 стр., ц. 2 руб. 75 коп.

Трапезников В. А., Городецкий И. Е., Петров Г. Н., Фельдбаум А. А. Автоматический контроль линейных размеров изделий. Под ред. В. А. Трапезникова. Оборонгиз, 432 стр., ц. 25 руб.

Фарадей М. История свечи. Пер. с англ. Детгиз, 80 стр., ц. 2 руб. 75 коп.

Файбисович И. Л., Каганович Я. М., Шушковская Е. Л. Новые шахтные светильники (Мин. угольной промышленности восточных районов, Бюро технической информации). Углетехиздат, 23 стр., ц. 3 руб.

Финкельштейн Л. Р. Передающие устройства. Руководство к лабораторным занятиям. Под ред. Н. Ю. Поляк. Ч. I. Изд. Академии кораблестроения им. Крылова, 162 стр., цена не указана.

Фишер А. Я. Электролитическое производство магния на заводах в США. Изд. БТИ Мин. цветной металлургии СССР, 46 стр., беспл.

Харин А. М., Гурий Я. С. Электрические машины постоянного тока мощностью до 200 квт (Свободный каталог

электрооборудования, раздел, вып. 4). Изд. ЦБТИ МЭП СССР, 72 стр., ц. 10 руб.

Хейфиц С. Я. Работник рудничной ламповой. Изд. 4-е переработанное. Углетехиздат Западугля, 128 стр., ц. 5 руб.

Чаромский А. Д. О комплексных схемах авиационных силовых установок. Моск. авиационный институт им. Жуковского, 24 стр., ц. 8 руб.

Честнов Ф. Рождение радио. Детгиз, 64 стр., ц. 1 руб. 60 коп.

Шамрай П. А. Эксплуатация колхозных гидроэлектростанций и электросетей. Гостехиздат Украины, 72 стр., цена не указана (на украинском языке).

### Издания 1948 г.

Аронов Р. Л. Магнитное реле времени. Госэнергоиздат, 63 стр., ц. 3 руб.

Атабеков Г. И., Федосеев А. М. Современная релейная защита (Министерство высшего образования СССР. Всесоюзный заочный энергетический институт). Госэнергоиздат, 259 стр., подписное издание. Второй тираж того же издания. Госэнергоиздат, ц. 10 руб.

Бажанов С. А. Что такое радиолокация. Военное изд-во, 187 стр., ц. 5 руб. 25 коп.

Белькинд Л. Д. Александр Николаевич Лодыгин. Очерк жизни и деятельности. Госэнергоиздат, 63 стр., ц. 1 руб. 50 коп.

Богомолов А. Ф. Основы радиолокации. Конспект (Министерство высшего образования СССР. Всесоюзный заочный энергетический институт). Изд-во «Советское радио», 72 стр., беспл.

Бухман Е. Н., Подгорецкий И. А. Статистика связи. Допущено в качестве учебника для втузов связи. Связьиздат, 302 стр., ц. 9 руб.

Гинкин Г. Г. Справочник по радиотехнике. Изд. 4-е переработанное. Госэнергоиздат, 817 стр., ц. 48 руб.

Глаголева-Аркадьева А. А. Собрание трудов. Изд. Академии наук СССР, 184 стр., ц. 18 руб.

П. Г. Грудинский. Схемы коммутации электрических станций и подстанций (Министерство высшего образования СССР. Всесоюзный заочный энергетический институт). Госэнергоиздат, 168 стр., подписное издание. Второй тираж того же издания, Госэнергоиздат, ц. 6 руб. 50 коп.

Гуревич Б. М. Инструкция по монтажу и эксплуатации селеновых выпрямителей. Углетехиздат, 15 стр., ц. 1 руб. 50 коп.

Доливо-Добровольский М. О. Избранные труды (в трехфазном токе). С приложением статей Г. М. Кржижковского и Л. Д. Белькинда (Серия «Классики русской энергетики»). Под общей ред. С. И. Вавилова. Госэнергоиздат, 215 стр., цена не указана.

Дрейер Н. Л. Каталог радиоаппаратуры гражданской связи. Бюро технической информации. МПСС СССР, 40 стр. + вклейка, ц. 5 руб. 25 коп.

Жданов Г. Б. Лучи из мировых глубин. Гостехиздат, 107 стр., ц. 2 руб.

Информационные материалы Энергосбыта Мосэнерго К социалистическому соревнованию по экономии электроэнергии. Госэнергоиздат, 55 стр., беспл.

Калантаров П. Л. Единицы измерения электрических и магнитных величин. Изд. Ленинградского политехнического института им. Калинина, 26 стр., беспл.

Калиятинский В. И. Сушка и пропитка обмоток. Центральное бюро технической информации МЭП СССР, 92 стр., ц. 7 руб.

Клементьев С. Модель линкора, управляемая по радио. Детгиз, 48 стр., ц. 1 руб. 10 коп.

Клементьев С. Школьная ветроэлектростанция. Детгиз, 48 стр., ц. 1 руб. 10 коп.

Коваленков В. И., Храмой А. В. Автоматика и телемеханика в народном хозяйстве СССР. Госпланиздат, 63 стр., ц. 2 руб. 50 коп.

Круг К. А. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Госэнергоиздат, 344 стр., ц. 19 руб.

Кубаркин Л. В., Енютин В. В. Как построить детекторный радиоприемник (Массовая радиобиблиотека под общей ред. А. И. Берга, вып. 4). Госэнергоиздат, 34 стр., ц. 1 руб.

Кунц И. С. Скользящий контакт электрических машин. (МЭП СССР, ЦБТИ). Госэнергоиздат, 56 стр., ц. 3 руб. 50 коп.

Лашев Е. К. Слюда, Ч. I. Свойства слюд. Промстройиздат, 296 стр., ц. 16 руб. 50 коп.

Лукинский В. В., Сильвестров В. В. Паровые электростанции небольшой и средней мощности. Под ред. В. В. Лукинского. Госэнергоиздат, 324 стр., ц. 29 руб.

Лукьянов С. Ю. Фотоэлементы (Академия наук СССР. Ленинградский физико-технический институт). Изд-во Академии наук СССР, 371 стр., ц. 24 руб.

Масанов В. Ф., Хитров Б. Н. Радиостанция коротковолновых (Массовая радиобиблиотека под общей ред. А. И. Берга). Госэнергоиздат, 26 стр., ц. 75 коп.

Материалы и радиодетали. Сборник материалов по опыту производственно-техническому опыту (МПС СССР, ЦБТИ). Госэнергоиздат, 84 стр., ц. 8 руб. 50 коп.

Ниландер Р. А. Люминесцентные лампы и их применение. Госэнергоиздат, 60 стр., ц. 2 руб. 50 коп.

Нормы и расценки на строительные и монтажные работы. Отдел 14. Электромонтажные работы (части I, II и III) (Мин. строительства предприятий тяжелой индустрии). Стройиздат, 230 стр., ц. 8 руб. 40 коп.

Паккл О. С. Генераторы развертки. Пер. И. Е. Овсиченко, под ред. А. И. Шестакова. Госэнергоиздат, 224 стр., ц. 13 руб.

Пересыпкин И. Т. Радио — могучее средство обороны страны. Военное изд-во, 164 стр., ц. 1 руб.

Петухин Г. М. Расчет стальных проводов, шин и краевых троллеев. Госэнергоиздат, 108 стр., ц. 5 руб.

Поляк Н. А. Нормальные режимы работы турбогенераторов. Госэнергоиздат, 227 стр., ц. 13 руб.

Пособие для проектирования монтажа и эксплуатации электрической части автосварочных устройств (Академия наук УССР. Институт электросварки им. Патона). Гостехиздат Украины, 57 стр., ц. 2 руб. 75 коп.

Постников С. Гальванические элементы. Гос. изд-во Молдавии, 40 стр., ц. 2 руб. (на молдавском языке).



Правила безопасности при эксплуатации электрических устройств станций и подстанций (МЭС СССР, Технический отдел). Изд. стереотипное. Госэнергоиздат, 79 стр., ц. 5 руб. 25 коп.

Прозоровский Ю. Н. Проволока (для радиоаппаратуры). Изд. Осоавиахима СССР, 8 стр., цена не указана.

Расчет сложных фильтров. Пер. И. Н. Кикнадзе, под ред. В. Ю. Ломоносова. Госэнергоиздат, 163 стр., ц. 9 руб.

Розанов Г. М. Упражнения по электрическим сетям. Утверждено в качестве учебного пособия для студентов. Изд. Московского энергетического института им. Молотова, 30 стр., беспл.

Садовский И. М. Согласованное вращение асинхронных двигателей. Госэнергоиздат, 135 стр., 5 руб. 50 коп.

Справочная книжка энергетика на 1948 г. Госэнергоиздат, 161 стр., цена не указана.

Сыромятников И. А. Вопросы эксплуатации синхронных генераторов. Госэнергоиздат, 191 стр., ц. 8 руб. 50 коп. 50 коп.

Темников Ф. Е., Харченко Р. Р. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, 348 стр., ц. 17 руб. 50 коп.

Тягунов Г. А. Основы расчета вакуумных систем. Госэнергоиздат, 148 стр., ц. 7 руб. 50 коп.

Харахан Л. Т. Производство гальванических элементов и батарей. Госэнергоиздат, 104 стр., ц. 4 руб. 25 коп.

Хитров Б. Н. Всеволновой супергетеродин (Массовая радиобиблиотека под общей ред. А. И. Берга). Госэнергоиздат, 18 стр., ц. 50 коп.

Циглер Н. В. Бытовые электронагревательные приборы. Гизместпром. 113 стр., ц. 7 руб.

Шуруин Г. П. Электроизмерительные и радиоизмерительные приборы. Военное изд-во, 475 стр., ц. 13 руб.

Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. Пер. со вступительной статьей С. Г. Суворова. Гостехиздат, 267 стр., ц. 10 руб. 50 коп.

## Иностранные книги по вопросам электричества и электроэнергетики, изданные в 1946-1947 гг.<sup>1</sup>

Adam M. La lampe de radio. Радиолампа. Париж, 439 стр., 1947.

Aisberg E. La modulation de fréquence et ses applications. Модуляция частоты и ее применение. Париж, 144 стр., 1946.

Appleton E. V. Thermionic Vacuum Tubes and their Applications. Термоионные вакуумные лампы и их применение. Лондон, 124 стр., 1946.

Astuni E. Esercitazioni di elettrotecnica. Упражнения по электротехнике. Ч. I, Рим, 306 стр., 1947.

American Society for Testing Materials (A. S. T. M.). Standard on Electrical Heating and Resistance Alloys. Стандарты Американского общества испытания материалов из сплавов для электронагрева и сплавы высокого сопротивления. Стандарты на сплавы, применяемые для изготовления термостатов, реостатов, всевозможных электроконтактов, электрических и радиоламп, электропечей и пр. Филадельфия, 173 стр., 1946.

Amick Ch. L. Fluorescent Lighting Manual. Руководство по люминесцентному освещению. 2-е изд., Нью-Йорк, 318 стр., 1947.

Bendz W. I. Electronics for Industry. Промышленная электроника. Нью-Йорк, 501 стр., 1947.

Blalock G. C. Direct-Current Machinery. Электрические машины постоянного тока. Лондон, 367 стр., 1947.

Broersma S. Magnetic Measurements on Organic Compounds. Магнитные измерения в органических соединениях. Амстердам, 114 стр., 1947.

Brown G. H., Hoyer C. N., Bierwirth R. A. Theory and Application of Radio-Frequency Heating. Теория и применение высокочастотного нагрева. Нью-Йорк, 370 стр., 1947.

Carr T. C. Sub-Station Practice. Практика работы на подстанциях. Лондон, 404 стр., 1947.

Cocking W. T. Television Receiving Equipment. Аппаратура для телевизионного приема. Лондон, 380 стр., 1947.

Coodman C. (ред.) The Science and Engineering of Nuclear Power. Атомная энергия; теория и техника. Кембридж (США), 500 стр., 1947.

Cook A. L., Carr C. C. Elements of Electrical Engineering. Основы электротехники. 5-е издание, Нью-Йорк — Лондон, 622 стр., 1947.

Culver Ch. A. Theory and Application of Electricity and Magnetism. Теория и приложения электричества и магнетизма. Нью-Йорк, 594 стр., 1947.

Dac s. F. Electricité théorique. Теория электричества. Льеж, 412 стр., 1947.

Dalla Verde A. Le grandi linee di trasmissione d'energia. Calcolazione elettrica. Мощные линии электропередачи. Электрический расчет. Милан, 397 стр., 1947.

Dawes Ch. L. A Course in Electrical Engineering. Курс электротехники. Переменные токи. т. II, Лондон, 729 стр., 1947.

Diemer F. Théorie élémentaire de la radiotechnique. Элементарная теория радиотехники. Цюрих, 289 стр., 1946.

Durrwang J. Radio-Technik Theorie und Praxis. Радиотехника. Теория и практика. Базель, 216 стр., 1947.

Emery E. T. G., Harrabin F., Lee B. C., Nixon T. H. R., Rapson E. T. A. Electric Motors and Generators. Электрические двигатели и генераторы. Лондон, 384 стр., 1946.

Fink D. G. Radar Engineering. Радиолокация. Лондон, 656 стр., 1947.

Fowler W. H. (ред.) Fowlers Electrical Engineer's Pocket Book. Электротехнический справочник. 47-е изд., Манчестер. 586 стр., 1947.

Fouillé A. Electrotechnique à l'usage des ingénieurs. Электротехника для инженеров. Т. I. Основы. 398 стр., т. III. Электрические машины, 408 стр., Париж, 1947.

Golsmith A. N., Van Dyck A. F., Burnap R. S., Dic-

<sup>1</sup> Электричество, № 1, стр. 84—88, 1947; № 9, стр. 94—95, 1947.

- key E. T., Baker G. M. K. Television. Телевидение. Т. III и IV. Принстон, 498 и 524 стр., 1947.
- Gorden L. O., Dunlap C. H., Haan E. K. Electrical and Radio Dictionary. Словарь терминов в области радиотехники. 3-е изд., Чикаго, 118 стр., 1946.
- Harang L. Experimental Studies on the Reflection of Radio Waves from the Ionized Regions. Экспериментальное исследование отражения радиоволн от ионизированных сфер. Осло, 20 стр., 1947.
- Harrison A. E. Klystron Tubes. Клистроны. Нью-Йорк — Лондон, 271 стр., 1947.
- Hazarb D. L. Directions for Magnetic Measurements. Инструкции по магнитным измерениям. Вашингтон, 131 стр., 1947.
- Huxley L. G. H. A Survey of the Principles and Practice of Wave Guides. Основы и практика волноводов. Кембридж (Англия), 389 стр., 1947.
- IES' Lighting Handbook. Справочник по светотехнике Американского общества светотехников под ред. Kinley R. W. Нью-Йорк, 856 стр., 1947.
- Jacquet P. A. Le polissage électrolytique des surfaces métalliques et ses applications. Электрическая полировка металлических поверхностей и ее применение, т. I. Алюминий, магний и легкие сплавы. Париж, 340 стр., 1946.
- Jordan L. C. и др. Fundamentals of Radio. Основы радиотехники. Лондон, 400 стр., 1947.
- Keen R. Wireless Direction Finding. Радиопеленгация. 4-е изд., Лондон, 1071 стр., 1947.
- Kemp P. Alternating Current Electrical Engineering. Техника переменных токов. 7-е изд., Лондон, 668 стр., 1947.
- Kiver M. S. Television Simplified. Телевидение. Нью-Йорк, 382 стр., 1946.
- Kraehenbuehl J. O. Electrical Illumination. Электрическое освещение. Лондон, 441 стр., 1947.
- Lambrey M. Radiotechnique générale. Общая радиотехника, т. II, Париж, 368 стр., 1947.
- Lanoy H. Les machines électriques d'automobiles et d'aviation. Электрические машины автомобилей и самолетов. Париж, 240 стр., 1947.
- Lauer H. и др. Servomechanism fundamentals. Основные сведения о сервомеханизмах. Лондон, 200 стр., 1947.
- Levasseur A. L'électrochimie et l'électrometallurgie. (Electrolyse. Fours électriques). Электрохимия и электрометаллургия, т. I. Электролиз; т. II. Электрические печи, Париж, т. I, 176 стр., т. II, 204 стр., 1947. Le véhicule électrique utilitaire à accumulateurs. Аккумуляторные электротранспортные устройства. Париж, 196 стр., 1947.
- Liwschitz-Garik M.; Whipple C. C. Electric Machinery. Электрические машины. Нью-Йорк, два тома 576 стр., 1946.
- Lovell B. (ред.). Electronics and their Application in Industry and Research. Электроника и ее приложения в промышленности и в лабораторной технике, Лондон, 676 стр., 1947.
- Lythall R. T. The J. and P. Switchgear Book. Справочник по выключающим устройствам. 4-е изд., Лондон, 653 стр., 1947.
- Mallet L., Le Camus H. Bombardement atomique et radioactivité artificielle. Атомная бомбардировка и искусственная радиоактивность. Париж, 184 стр., 1947.
- Mantner L. Mathematics for Radio Engineers. Математика для радиоинженеров: Нью-Йорк, Лондон, 327 стр., 1947.
- Montu E. Radiotecnica. Tubi elettronici. Pratica di radiotrasmissione e ricezione. Радиотехника, т. II. Электронные лампы; т. III. Практическое руководство по радиопередаче и радиоприему, Милан, т. II, 622 стр., т. III, 1016 стр., 1946.
- Norris R. C. (ред.). The Practical Radio Reference Book. Практический справочник по радиотехнике. Лондон, 287 стр., 1947.
- Pokorny J. Transformator v prmysly. Трансформатор в промышленности. 2-е изд. Прага, 338 стр., 1947.
- Reyner J. H. Short-Wave Radio. Коротковолновая радиотехника. 4-е изд., Лондон, 222 стр., 1946.
- Rinaldi E. Saldatura dei metalli ossiacetilena ed elettroconparticolare riguardo alla saldatura dell'alluminio e tag dei metalli. Кислородно-ацетиленовая и электродуговая сварка металлов с особым рассмотрением сварки алюминия и резки металлов. Милан, 230 стр., 1947.
- Ryder J. D. Electronics Engineering Principles. Принципы электроники. Нью-Йорк, 397 стр., 1947.
- Sandeman E. K. Radio Engineering. Радиотехника, т. I. Лондон, 799 стр., 1947.
- Sas R. K., Pidduck F. B. The Metre — Kilogram — Second System of Electrical Units. Система электрических единиц MKS'. Лондон, 60 стр., 1947.
- Siskind Ch. S. Electricity. Электричество: основы, практика, опыты. Нью-Йорк — Лондон, 448 стр., 1947.
- Slater J. C., Frank N. H. Electromagnetism. Электромagnetизм. Нью-Йорк, 240 стр., 1947.
- Spreadbury F. G. Electric Discharge Lighting. Освещение газоразрядными лампами. Лондон, 144 стр., 1946.
- Stieger A. Electrochimie. Электрохимия, т. I (Теоретические основы) Цюрих, 138 стр., 1947.
- Stigant S. A. Modern Electrical Engineering Mathematics. Математика в современной электротехнике. Лондон, 372 стр., 1947.
- Stoner E. C. Magnetism. Магнетизм. 3-е изд., Лондон, 143 стр., 1946.
- Strnad J. Základy slaboproudé elektrotechniky. Основы слаботочной электротехники, т. I. 3-е изд. Прага, 263 стр., 1947.
- Strnad J. Telefonie, theorie a praxe. Теория и практика телефонии. Прага, 648 стр., 1947.
- Stubbings G. W. Electrical Testing for Practical Engineers. Электротехнические измерения и испытания в практике. 2-е изд., Лондон, 273 стр., 1947.
- Tarboux J. G. Electric Power Equipment, Электроснабжение оборудование. 3-е изд., Лондон, 506 стр., 1946.
- Tibbs Ch. E. Frequency Modulation Engineering. Техника частотной модуляции. Лондон, 310 стр., 1947.
- Thali H. Technical Dictionary of the Terms Used in Electrical Engineering, Radio, Television, Electrical Communication. Технический словарь по электротехнике, радиотехнике, телевидению, технике электросвязи, т. I (английско-немецкий-французский). Нью-Йорк, 277 стр., 1946.
- Jolley E. H. Telegraph Transmission Theory. Теория телеграфной передачи. Лондон, 136 стр., 1947.
- Tucker W. J., Roberts R. S. Plastics for Electrical and Radio Engineers. Пластические массы для электротехники и радиотехники. 2-е изд., Кингстон (Англия), 167 стр., 1947.
- Underdown G. W. Electrical Fire Alarm System. Электрические системы пожарной сигнализации, Лондон, 86 стр., 1947.
- Van Mieghem J. Propagation des ondes électromagnétiques en milieu homogène. Распространение электромагнитных волн в однофазной среде. Париж, 172 стр., 1946.
- Wall T. F. Electrical Engineering Problems and their Solutions. Задачи электротехники и их решение. Нью-Йорк, 312 стр., 1947.
- Wall T. F. Principles of Electrical Engineering. Основы электротехники. Нью-Йорк, 563 стр., 1947.
- Watson W. H. The Physical Principles of Wave Guide Transmission and Antennal Systems. Физические основы теории волноводов и антенных систем. Лондон, 222 стр., 1947.
- Watton E. B. The A. B. C. of Electronics. Азбука электроники. Лондон, 132 стр., 1947.
- Werthen H., Nilson B. An Automatic Impedance Meter. Прибор для автоматического измерения полного сопротивления. Стокгольм, 95 стр., 1947.
- Rosenberg R. Electric Motor Repair. Ремонт электродвигателей. Нью-Йорк — Торонто, 551 стр., 1946.
- Wilson W. The Cathode Ray Oscillograph in Industry. Катодный осциллограф в промышленности. Лондон, 256 стр., 1946.



# ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Шлюзовая набережная, 10.

## ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ

- \* **АЛЕКСЕЕВ С. В.**, Руководство для дежурного электромонтера подстанции высокого напряжения. Утверждено Отделом рабочих кадров, труда и зарплаты в качестве учебника для курсов по подготовке рабочих кадров. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 304, тир. 10 000, ц. 8 р. 50 к.
- \* **АРТАМОНОВ И. Д.**, Владимир Николаевич Чиколев. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 78, тир. 5 000, ц. 2 руб.
- БЕЛОУС Б. П.**, Связь энергосистем. Утверждено Отделом рабочих кадров, труда и зарплаты МЭС СССР в качестве учебного пособия для курсов мастеров. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 277, тир. 4 000, ц. 15 руб.
- \* **БРУСКИН Д. Э.**, Электрооборудование самолетов. Допущено МВО СССР в качестве учебника для энергетических и электротехнических вузов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 462, тир. 5 000, ц. 15 р. 60 к.
- \* **ВИНОГРАДОВ Н. В.**, Электрослесарь по ремонту и сборке промышленного электрооборудования. Одобрено Учебным советом профтехнического образования МТР СССР в качестве учебника для ремесленных училищ энергетической промышленности. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 240, тир. 15 000, ц. 7 р. 30 к.
- \* **ВИНОГРАДОВ Н. В.**, Технология производства электрических машин. Допущено Управлением учебными заведениями МЭП СССР в качестве учебника для электромеханических техникумов. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 318, тир. 4 000, ц. 13 р. 60 к.
- ВСЕСОЮЗНЫЙ КОНКУРС 1948 г.** на лучшее предложение по экономии электрической и тепловой энергии. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 7, тир. 30 000, бесплатно.
- ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ** и их применение в условиях тепловых электростанций (ОргрЭС). М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 37, тираж 2 000, ц. 2 р. 25 к.
- \* **ГУБИН Ф. Ф.**, Атлас гидротехнических станций. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., 60 таблиц, тир. 3 000, ц. 35 руб.
- ДОПУСТИМЫЕ ЗАСОРЫ** при ремонте паровых турбин (ОргрЭС). М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 15, тир. 2 000, ц. 1 руб.
- ИНСТРУКЦИЯ ПО УЧЕТУ ОТПУСКА ТЕПЛА** абонентам водяных тепловых сетей (Технический отдел). М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 15, тир. 1 500, ц. 90 к.
- \* **КРЕЙН С. Э.**, Стабилизация турбинных и трансформаторных масел. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 165, тир. 2 500, ц. 7 р. 50 к.
- РЕМОНТ ТОРФЯНЫХ МАШИН**, выпуск VIII. Дренажно-дисковая машина (Главторф). М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 80, тир. 1 000, бесплатно.
- СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ** Всесоюзной научно-технической сессии по светотехнике (ВНИТОЭ). М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 191, тир. 1 650, ц. 11 руб.
- \* **СОКОЛОВ Д. В.**, Монтаж и эксплуатация электрооборудования распределительных устройств электрических станций и подстанций. Одобрено Ученым советом профтехнического образования МТР СССР в качестве учебного пособия для ремесленных училищ. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 359, тир. 10 000, ц. 10 р. 45 к.
- \* **СОЛОВЬЕВ П. Ф.**, Монтаж и эксплуатация осветительного и силового электрооборудования кабельных и воздушных линий электропередач. Одобрено Ученым советом профтехнического образования МТР СССР в качестве учебника для ремесленных училищ энергетической промышленности. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 323, тир. 15 000, ц. 9 р. 55 к.
- \* **СОЛОПОВ С. Г.**, Расчеты и конструкции торфяных машин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 197, тир. 2 500, ц. 12 руб.
- ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ** и нормы по строительству. Производство работ по возведению кирпичных гидротехнических сооружений (ВНИИГ). М.—Л., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 14, тир. 1 200, ц. 1 руб.
- \* **ТЯГУНОВ Г. В. и ЖИГАРЕВ А. А.**, Электронные лампы. Учебные таблицы. Л.—М., Госэнергоиздат, 1948 г., тир. 7 000, ц. 32 руб. в папке.
- \* **ШУЛЬЦ Е. Г. и АНДЕРСОН Л. Т.**, Руководство к лабораторным работам по радиотехнике. Л.—М., Госэнергоиздат, 1948 г., стр. 339, тир. 5 000, ц. 18 р. 50 к.

Издания, отмеченные звездочкой, продаются во всех книжных магазинах Книгиза.