

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

1947

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ



4

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Вопросы автоматизации электропривода   | 3  |
| М. А. Гаврилов — Анализ релейно-контактных схем  | 5  |
| А. А. Булгаков — Структура и характеристики современных схем автоматического управления электроприводами постоянного тока      | 14 |
| В. В. Солодовников — Исследование динамики следящих электроприводов и систем авторегулирования методом частотных характеристик | 22 |
| Ю. А. Сабинин — Ионный электропривод типа таймоторол и мототорол   | 29 |
| Д. П. Морозов — Теория переходных процессов электроприводов с упругой связью   | 37 |
| К. С. Бобов — Переходные процессы электропривода в системе Леонарда с амплидином   | 48 |
| В. К. Попов — К обобщению теории движения автоматизированного электропривода   | 55 |
| Из научно-исследовательских работ. Авторефераты  | 63 |
| Л. П. Подольский — Рациональный выбор нагрузок проводов и кабелей в низковольтных электросетях                                 | 63 |
| Э. А. Меерович — Электрический прибор для решения систем линейных алгебраических уравнений                                     | 65 |
| Е. С. Борисевич — Девятишлейфовый переносный осциллограф   | 67 |
| Е. К. Мезин — Круговые диаграммы электромагнитной асинхронной муфты  | 69 |
| А. П. Беляков — Относительная высота ориентировки молний   | 71 |
| Дискуссии  | 74 |
| Рефераты   | 76 |
| Хроника  | 87 |
| Библиография   | 95 |



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

Ответственный секретарь инж. **Я. А. Климовицкий**

Адрес редакции: Москва, Б. Черкасский пер., д. № 2/10, тел. К 4-24-80.  
Адрес для корреспонденции: Москва. Главный почтамт, почтовый ящик № 648.

# Вопросы автоматизации электропривода

Закон о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг. предусматривает широкую программу по автоматизации производства в таких важнейших отраслях промышленности, как металлургия, машиностроение, нефтепереработка и др. Основой автоматизации производства является, как известно, автоматизированный электродвигательный привод. Пятилетний план содержит специальные директивы по развитию автоматизации электропривода. В Законе сказано: «Обеспечить широкое внедрение в промышленности индивидуального автоматизированного электрического привода и осуществить постепенный переход к электроприводу, органически связанному с исполнительными механизмами рабочих машин».

Автоматизированный электропривод применяется уже сейчас в нашей промышленности в достаточно широких масштабах. Советская школа специалистов по электроприводу успешно разрешила ряд сложных задач по созданию систем автоматизированного электропривода для блюмингов, крупных прокатных станов, доменного подъема, бумагоделательных машин и т. п. Существенные результаты достигнуты в СССР в развитии теории электропривода.

Поточные методы в производстве с автоматическими станочными линиями, агрегатные и многооперационные станки, доказавшие высокую эффективность в смысле повышения производительности оборудования и снижения себестоимости промышленной продукции, требуют дальнейшего глубокого и всестороннего применения автоматизации как в управлении электродвигательными приводами, так и в измерении, регистрации и контроле производственного процесса.

Характерной особенностью современного этапа автоматизации производственных процессов является, наряду с автоматизацией отдельных рабочих машин, комплексная автоматизация целых групп их, т. е. автоматизация производственных процессов в целом.

Большое значение в современном производстве, наряду с его автоматизацией, имеет также и централизация управления.

Электропривод представляет в настоящее время сложное устройство. Выполняемые им разнообразные функции соответствуют разносторонним требованиям исполнительных механизмов. В ряде случаев электропривод является агрегатом, в котором десятки электрических машин, управляемых автоматически, работают в согласованном действии или в определенной последо-

вательности (доменные подъемники, прокатные станы, исполнительные механизмы бумажной и нефтяной промышленности, автоматические станочные линии).

Главнейшей составной частью электропривода является электрическая машина во всех ее видах, многочисленных по принципу действия и форме исполнения.

Особенно характерным является то обстоятельство, что электрическая машина в современном автоматизированном электроприводе используется не только как двигатель, генератор или преобразователь, т. е. по прямому своему назначению. Электрическая машина малой мощности и со своеобразными принципами действия успешно применяется также и в качестве регулятора, контактора и реле. В связи с этим упрощается схема автоматического управления, цепи управления обслуживаются током и мощностью малых величин, а значит, и вспомогательной аппаратурой малого габарита, увеличивается надежность и гибкость управления, обеспечивается расширение или совмещение функций, выполняемых отдельными узлами схемы управления. Таким образом возрастает возможность более совершенного и более широкого применения автоматизированного электропривода.

Использование вспомогательных электрических машин в качестве элементов схемы автоматического управления, а в том числе и в качестве регуляторов того или иного назначения, объединено общим понятием «электромашинное непрерывное управление», называемое «электромашинной автоматикой».

Помимо схем с электромашинной автоматикой для целей управления и регулирования, а также взамен преобразовательных машинных агрегатов в настоящее время усиленно разрабатываются схемы и системы с ионной и электронной аппаратурой. В ряде случаев ее применение оправдывается по условиям экономичности, веса, удобства и быстродействия регулирования.

Из изложенного выше, как следствие, вытекает, что в настоящее время вопросы теории и практики электрического привода тесно соприкасаются с вопросами теории регулирования электрических и механических процессов.

Выбор параметров главных и вспомогательных электрических машин и цепей управления автоматизированным электроприводом неотделим от учета условий регулирования переходных процессов.

При разрешении задач автоматизации и цен-

трализованного управления широкое применение имеют релейно-контактные схемы. В частности, на их применении в сильной степени основана вся современная техника централизованного управления в промышленности, на железнодорожном транспорте, в связи, в установках специального назначения и т. д. До последнего времени разработка и проектирование релейно-контактных схем производились почти исключительно на основе практического опыта и интуиции. В настоящее время советскими электротехниками разработаны научно обоснованные методы проектирования релейно-контактных схем.

Создание обоснованной теории и инженерных методов расчета, усовершенствование существующих систем, разработка и внедрение новых отечественных схем автоматизированного электропривода является важнейшим делом советских электротехников, работающих в этой отрасли науки и техники.

В настоящем номере журнала ряд статей посвящен рассмотрению упомянутых вопросов.

Рассмотрению одного из основных вопросов теории построения релейно-контактных схем посвящена статья канд. техн. наук М. А. Гаврилова «Анализ релейно-контактных схем». Автор на основе применения математического аппарата алгебры логики описывает методы разложения сложной схемы на отдельные цепи. Это позволяет выяснить условия работы исполнительных и промежуточных элементов схемы и при помощи научно обоснованной методики проверить соответствие схемы заданным для нее условиям.

Основные принципы и свойства новейших схем электромашинной, ионной и электронной автоматики с замкнутой цепью управления рассмотрены в статье кандидата техн. наук А. А. Булгакова «Структура и характеристики современных схем автоматического управления электроприводами постоянного тока».

Инж. Ю. А. Сабинин в своей статье «Ионный электропривод типа «таймотор» и «мототор» исследовал целесообразность внедрения ионного привода в конкретных объектах и областях. В статье содержатся основные вопросы, связанные с применением ионного привода: схемы включения тиатронов, регулирование скорости и тока, компаундирование, переходные режимы, сглаживание пульсаций и условия стабилизации.

Ввиду сложности современных систем электропривода и высокого порядка дифференциаль-

ных уравнений, которыми описываются в этих системах переходные процессы, существенный интерес представляют методы, позволяющие исследовать переходные процессы и определить их основные характеристики без окончательного решения дифференциальных уравнений. Рассмотрению этого вопроса посвящена статья кандидата техн. наук В. В. Соловникова «Исследование динамики следящих электроприводов и систем авторегулирования методом частотных характеристик», в которой на основе использования амплитудно-фазовых характеристик системы предложен метод определения характера переходных процессов без вычисления корней дифференциальных уравнений.

Кандидат техн. наук К. С. Бобов в своей статье «Переходные процессы электропривода в системе Леонарда» исследовал электропривод реверсивных исполнительных механизмов малой мощности. Основной особенностью таких установок является применение амплидина в качестве генератора преобразовательного агрегата. Автор исследовал переходные процессы и на основе математического анализа и экспериментальной проверки установил основные условия устойчивой работы, системы электропривода.

Статья доктора техн. наук, проф. Д. П. Морозова «Обобщенная теория переходных процессов в электроприводах с упругой связью» дает анализ электромеханических процессов применительно к электроприводу станов холодной прокатки листов. Разработка теории переходных процессов с учетом упругого удлинения относится к новым вопросам теории электропривода и важность этой темы определяется необходимостью достижения высоких скоростей прокатки и повышения производительности прокатных станов.

Доктор техн. наук, проф. В. К. Попов в своей статье «К обобщению теории автоматизированного электропривода» ставит на обсуждение возможность обобщения и классификации (с точки зрения переходных процессов) основных систем электропривода. Положения, высказанные в статье, подверглись дискуссии, изложение которой также напечатано в настоящем номере журнала.

Опубликование этих статей должно содействовать правильному разрешению теоретических и конструктивных вопросов при проектировании автоматизированного электропривода для различных отраслей народного хозяйства.



# Анализ релейно-контактных схем

Кандидат техн. наук М. А. ГАВРИЛОВ

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

**Общие задачи анализа релейно-контактных схем.** При проектировании релейно-контактных схем обычно возникает необходимость проверки правильности работы полученной схемы и определения соответствия ее заданным для проектирования условиям. Эта проверка составляет одну из задач анализа релейно-контактных схем, сводящейся в основном к определению для уже готовой схемы условий работы входящих в нее исполнительных элементов.

Задача анализа возникает, кроме того, при проверке работы схемы при проверке (что обычно также производится при проектировании схем) и при изучении и расшифровке действия новых схем, условия работы которых неизвестны.

До настоящего времени анализ релейно-контактных схем производился путем рассмотрения всей схемы в целом и отыскания в ней чисто умозрительным путем цепей для каждого из исполнительных элементов. Эта работа требует большого опыта и внимательности, так как в сложных схемах одновременный учет влияния всех ее составных частей при выделении цепей какого-либо одного исполнительного элемента представляет значительные трудности.

В больших проектных организациях и на заводах, занимающихся проектированием и изготовлением сложных устройств, включающих релейно-контактные схемы, для этой работы выделяются обычно специальные опытные контролеры. Тем не менее, нередки случаи, когда неисправная работа схемы обнаруживается после изготовления устройства, во время испытаний или эксплуатационной работы его.

Отыскание объективных методов анализа релейно-контактных схем, которые давали бы возможность определять условия работы ее при помощи определенных обоснованных правил, является поэтому весьма актуальным.

Любая релейно-контактная схема может быть представлена в виде некоторого контактного многополюсника, воздействующего на исполнительные элементы (рис. 1). Этот многополюсник

анализ релейно-контактных схем в настоящее время производится путем рассмотрения всей схемы в целом и отыскания в ней, чисто умозрительно, цепей для каждого исполнительного механизма. Существующий метод требует от проектанта большого опыта и внимания и к тому же не дает полной гарантии от ошибок. Автор рассматривает объективный, структурный метод анализа релейно-контактных схем. Описываются основанные на применении аппарата алгебры логики методы разложения схем на элементарные цепи, способы выделения цепей, воздействующих в схеме на отдельные реле и исполнительные механизмы, и методы определения взаимодействия последних.

может содержать как контакты элементов, воспринимающих воздействие на схему извне (будем называть их приемными и элементами и обозначать первыми буквами алфавита), так и контакты исполнительных элементов.

В общем виде задача анализа схем сводится к тому, чтобы: 1) выделить в контактном многополюснике рис. 1 цепи, относящиеся к каждому из исполнительных элементов, т. е. разделить его так, как это показано на рис. 2, на контактные двухполюсники, каждый из которых содержит цепи только одного из исполнительных элементов; 2) представить эти цепи в виде, наиболее наглядном для выяснения их воздействия на исполнительный элемент.

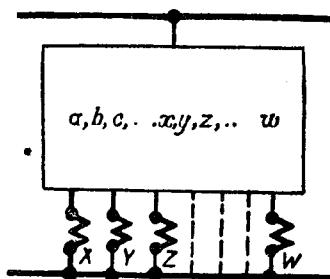


Рис. 1.

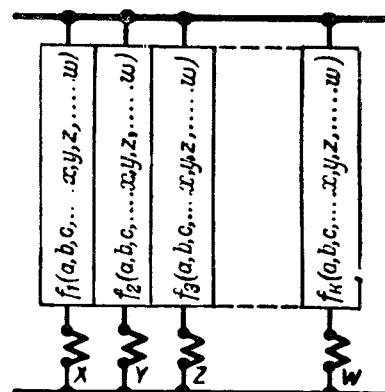


Рис. 2.

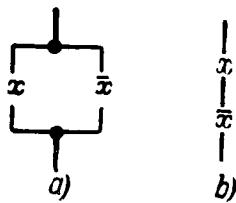


Рис. 3.

Очевидно, что второе проще всего сделать, если каждый из двухполюсников схемы рис. 2 представить в виде параллельных цепей, состоящих только из последовательно соединенных контактов. Каждая из таких цепей будет в этом случае представлять собой отдельное обособленное условие работы исполнительного элемента, а состав контактов в ней будет определять характер его.

Как известно [Л. 1—4], релейно-контактные схемы подчиняются законам алгебры логики. В соответствии с символикой этой алгебры будем обозначать исполнительные и приемные элементы схемы большими, а принадлежащие им контакты соответствующими маленькими буквами, операцию последовательного соединения — знаком умножения, а параллельного соединения знаком сложения. Замыкающие контакты будем обозначать буквой без черточки, а размыкающие буквой с черточкой наверху<sup>1</sup>.

При этом любая схема сможет быть представлена в виде аналитической функции, которую будем называть структурной формулой схемы.

Структурная формула для схемы рис. 1 в общем ее виде напишется, например, следующим образом:

$$F_{(x, y, \dots, w)} = f(a, b, \dots, x, y, \dots, w, X, Y, \dots, W). \quad (1)$$

Структурная формула схемы рис. 2 в соответствии с тем, что в ней цепи отдельных исполнительных элементов выделены, будет представлять собой сумму функций, каждая из которых будет выражать собой структурную формулу цепей одного из исполнительных элементов:

$$\begin{aligned} F_{(x, y, \dots, w)} = & Xf_1(a, b, c, \dots, x, y, z, \dots) + \\ & + Yf_2(a, b, c, \dots, x, y, z, \dots) + \dots + \\ & + Wf_n(a, b, c, \dots, x, y, z, \dots). \end{aligned} \quad (2)$$

Задача анализа релейно-контактных схем при представлении их в виде аналитических выражений сводится, очевидно, к тому, чтобы разложить общую структурную формулу схемы на структурные формулы для отдельных исполнительных элементов [т. е. привести ее к виду выражения (2)] и затем представить каждую из этих структурных формул в виде суммы произведений входящих в нее элементов.

Используя законы алгебры логики, можно получить вполне определенные правила для про-

ведения этих операций, дающие однозначное и строгое решение задачи анализа. Этим аналитические методы выгодно отличаются от обычно применяемых графических.

**Разложение схем на элементарные цепи.** Как отдельные члены функций, представляющих собой структурные формулы схем, так и сами эти функции в целом могут иметь только два значения: одно, соответствующее замкнутому состоянию цепи, и другое — разомкнутому состоянию ее. Будем говорить, что в первом случае соответствующий член функции или сама функция равны единице и во втором случае — нулю.

Так как параллельно соединенные замыкающий и размыкающий контакты одного и того же элемента схемы образуют всегда замкнутую цепь (рис. 3, a), то

$$1 = x + \bar{x}. \quad (3)$$

Напротив, последовательно соединенные замыкающий и размыкающий контакты одного и того же элемента образуют всегда разомкнутую цепь (рис. 3, b). Поэтому

$$0 = x \bar{x}. \quad (4)$$

Нуль и единица могут быть выражены также и в виде более сложных функций. Так, например всегда разомкнутой цепью будет схема, состоящая из параллельных цепей, представляющих собой все комбинации замыкающих и размыкающих контактов элементов, входящих в нее (например, схема рис. 4, a). Аналогично всегда разомкнутой цепью будет схема, состоящая из последовательно соединенных групп, представляющих собой все комбинации параллельно соединенных замыкающих и размыкающих контактов (например, схема рис. 4, b). Поэтому в общем случае структурные формулы всегда замкнутой (единицы) и всегда разомкнутой (нуля) схем записываются в виде следующих выражений:

$$\begin{aligned} 1 = & x_1 x_2 \dots x_n + \bar{x}_1 x_2 \dots x_n + x_1 \bar{x}_2 \dots x_n + \dots + x_1 x_2 \dots \bar{x}_n + \\ & + \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots x_n + \dots + \bar{x}_1 \bar{x}_2 \dots \bar{x}_n; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} 0 = & (x_1 + x_2 + \dots + x_n) (\bar{x}_1 + x_2 + \dots + x_n) (x_1 + \bar{x}_2 + \dots + \\ & + x_n) \dots (x_1 + x_2 + \dots + \bar{x}_n) (\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + x_n) \dots (\bar{x}_1 + \\ & + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_n). \end{aligned} \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) могут быть получены из формул (3) и (4) также и аналитическим путем (приложение 1).

Члены выражений (5) и (6) называются „конституентами” разложения нуля и единицы.

Можно показать, что любая структурная формула может быть разложена на конституенты единицы и нуля, т. е. любая схема представлена в виде некоторого количества параллельных цепей, содержащих каждая определенные комбинации замыкающих и размыкающих контактов всех элементов, входящих в схему, или же в виде последовательно соединенных групп контактов, представляющих собой определенные комбинации параллельно соединенных замыкающих и размыкающих контактов. Естественно, что в этом случае в структурные формулы, представленные в разложенном виде, будут входить не все конституенты единицы или нуля, а только некоторые из них.

Выражения, при помощи которых можно определить, какие из конституентов единицы или нуля входят в структурную формулу данной схемы, следующие<sup>2</sup>:

<sup>1</sup> Чертка над символом означает в алгебре логики так называемую операцию отрицания [Л. 4], т. е. действие, противоположное первоначальному. Размыкающий контакт как раз осуществляет такое действие по отношению к замыкающему контакту.

<sup>2</sup> Вывод формул (7) и (8) и доказательство того, что любая структурная формула может быть разложена на конституенты нуля или единицы, приведены в приложении 2.

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = f(1, 1, 1, \dots, 1) x_1 x_2 x_3 \dots x_n + f(0, 1, 1, \dots, 1) \bar{x}_1 x_2 x_3 \dots x_n + f(1, 0, 1, \dots, 1) x_1 \bar{x}_2 x_3 \dots x_n + \dots + f(0, 0, 1, \dots, 1) \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 \dots x_n + \dots + f(0, 0, 0, \dots, 0) \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \dots \bar{x}_n; \quad (7)$$

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = [f(0, 0, 0, \dots, 0) + x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n] [f(1, 0, 0, \dots, 0) + \bar{x}_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n] [f(0, 1, 0, \dots, 0) + x_1 + \bar{x}_2 + x_3 + \dots + x_n] \dots [f(1, 1, 0, \dots, 0) + \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + x_3 + \dots + x_n] \dots [f(1, 1, 1, \dots, 1) + \bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3 + \dots + \bar{x}_n]. \quad (8)$$

Каждый из членов в первом выражении представляет собой конституэнт разложения единицы, помноженный на коэффициент, равный значению рассматриваемой функции, которое она принимает, если положить в ней равным единице каждый простой сомножитель данного конституэнта и нулю каждый сомножитель, который входит в конституэнт в виде отрицания. Значение коэффициента, равное единице или нулю, определяет наличие или отсутствие соответствующего конституэнта в разложении анализируемой структурной формулы.

Каждый из сомножителей во втором выражении представляет собой сумму конституэнта разложения нуля и некоторого коэффициента, равного значению рассматриваемой функции, которое она принимает, если положить в ней нулю каждый простой член данного конституэнта и единице каждый член, входящий в него в виде отрицания. При значении коэффициента, равном единице, соответствующий сомножитель выражения (8) превращается также в единицу<sup>8</sup>. Это свидетельствует о том, что конституэнт, входящий в него, не содержится в рассматриваемой структурной формуле. При значении конституэнта, равном нулю, конституэнт, входящий в соответствующий сомножитель, остается в структурной формуле схемы.

Разложение функции на конституэнты нуля или единицы, по существу, полностью решает задачу анализа схемы, так как в результате его схема разлагается на указанные выше элементарные цепи, необходимые для определения условий работы исполнительных элементов. При этом удобнее пользоваться разложением структурной формулы схемы на конституэнты единицы, так как в результате этого разложения получается схема, состоящая из ряда параллельных цепей, каждая из которых состоит в свою очередь из последовательно соединенных контактов, т. е. схема получается в таком виде, который соответствует обычной формулировке условий срабатывания исполнительных элементов.

При анализе разложения схемы на конституэнты нуля легче сформулировать условия несрабатывания исполнительных элементов ее.

Рассмотрим в качестве примера разложение схемы, изображенной на рис. 5. Структурная формула ее будет выглядеть следующим образом:

$$F(X) = a(\bar{b} + \bar{c}) + \bar{a}(b + c).$$

Разложим эту формулу на конституэнты единицы, воспользовавшись выражением (7). Коэффициент при первом конституэнте получим, подставив в написанную выше структурную формулу нули вместо  $a$ ,  $b$  и  $c$  и единицы вместо  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$  и  $\bar{c}$ . В соответствии с этим будем иметь:

$$a(\bar{b} + \bar{c}) + \bar{a}(b + c) = 0(1 + 1) + 1(0 + 0) = 0.$$

Определение значений остальных коэффициентов приведено в таблице. Как можно видеть из таблицы, в рассматриваемом случае равны единице коэффициенты при конституэнтах 2–6. Поэтому структурная формула схемы рис. 5 при разложении ее на конституэнты единицы примет вид:

$$F(X) = \bar{a}\bar{b}c + \bar{a}\bar{b}\bar{c} + \bar{a}bc + \bar{a}\bar{b}\bar{c} + a\bar{b}c + ab\bar{c}.$$

<sup>8</sup> Сумма любого члена и единицы всегда равна единице ( $x+1=1$ ), так как параллельное соединение любой цепи со всегда замкнутой цепью представляет собой замкнутую цепь.

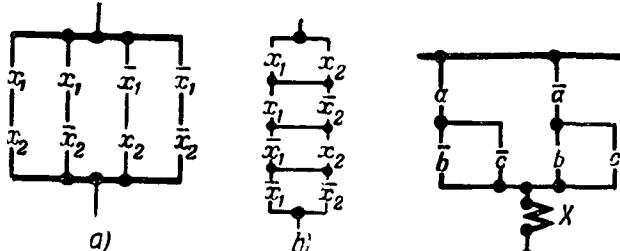


Рис. 4.

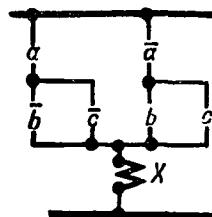


Рис. 5.

Таблица

| Конституэнт             | $a(\bar{b} + \bar{c}) + \bar{a}(b + c)$ | $F_x$ |
|-------------------------|---|-------|
| $\bar{a}\bar{b}\bar{c}$ | $0(1+1) + 1(0+0)$                       | 0     |
| $\bar{a}\bar{b}c$       | $0(1+0) + 1(0+1)$                       | 1     |
| $\bar{a}b\bar{c}$       | $0(0+1) + 1(1+0)$                       | 1     |
| $\bar{a}bc$             | $0(0+0) + 1(1+1)$                       | 1     |
| $a\bar{b}\bar{c}$       | $1(1+1) + 0(0+0)$                       | 1     |
| $a\bar{b}c$             | $1(1+0) + 0(0+1)$                       | 1     |
| $ab\bar{c}$             | $1(0+1) + 0(1+0)$                       | 1     |
| $abc$                   | $1(0+0) + 0(1+1)$                       | 0     |

Переписывая конституэнты несколько в другом порядке, получим:

$$F(X) = \bar{a}bc + \bar{a}\bar{b}c + ab\bar{c} + \bar{a}\bar{b}\bar{c} + \bar{a}b\bar{c} + a\bar{b}\bar{c}.$$

Формулируя по этому выражению условия работы схемы, получим, что исполнительный элемент  $X$  должен срабатывать при работе любого одного или двух приемных элементов  $A$ ,  $B$  и  $C$ .

**Выделение цепей исполнительных элементов.** Разложение структурных формул схем на конституэнты нуля и единицы в том виде, как это было произведено выше, целесообразно применять только в тех случаях, когда количество элементов схемы сравнительно невелико, и кроме того, когда в отдельных цепях схемы участвуют все элементы ее в целом. Так как число конституэнтов составляет  $N = 2^n$ , где  $n$  – число элементов схемы, то уже для сравнительно простых схем рассмотренный выше метод становится достаточно громоздким.

При отсутствии каких-либо элементов в цепи, при разложении схемы на конституэнты появляется ряд цепей, содержащих конституэнты разложения нуля или единицы по отношению ко всем элементам, не содержащимся в данной цепи, но имеющимся в других цепях. Например, если цепь имеет только контакты элемента  $A$ , а

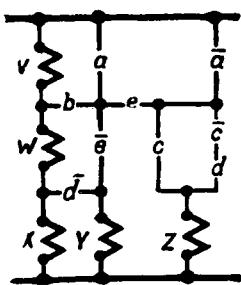


Рис. 6.

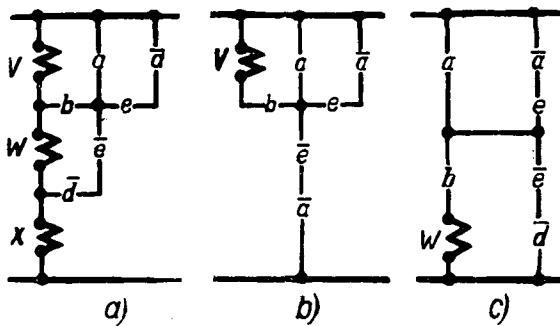


Рис. 7.

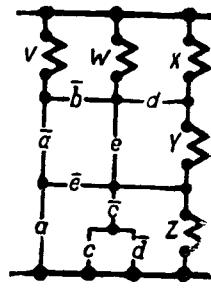


Рис. 8.

другие цепи содержат, кроме того, контакты элементов  $B$ ,  $C$  и  $D$ , то в случае разложения на конституэнты единицы появляются цепи:

$$\begin{aligned} & \bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{d} + \\ & + \bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{a} + \bar{a}\bar{b}\bar{c}\bar{d} = \bar{a}(\bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{b}\bar{c}\bar{d} + \\ & + \bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{b}\bar{c}\bar{d} + \bar{b}\bar{c}\bar{d}). \quad (9) \end{aligned}$$

Эти цепи в совокупности дают условия, равносильные действию одного контакта  $a$ , так как члены, стоящие в скобках, равны в сумме единице. Однако, наличие их в разложении заставит при формулировке условий работы схемы выписывать ряд лишних условий, по существу исключающих друг друга, и этим затемнять действие схемы. При разложении схем приходится поэтому прибегать в этих случаях к дополнительным преобразованиям для того, чтобы исключить противоречия друг другу условия. Изложенный выше метод позволяет, однако, развить приемы, при помощи которых можно получить разложение схемы и не прибегая к определению всех конституентов.

Рассмотрим первоначально способы, позволяющие в сложной схеме выделить цепи, относящиеся к отдельным исполнительным элементам. Пусть мы имеем многоэлементную схему, структурная формула которой имеет вид:

$$F_{(X, Y, Z, \dots, W)} = f(a, b, \dots, n, x, y, z, \dots, w, X, Y, Z, \dots, W),$$

где члены  $X, Y, Z, \dots, W$  характеризуют реагирующие органы исполнительных элементов. Разлагая структурную формулу схемы на конституэнты и группируя члены с  $X, Y, Z, \dots$  и  $W$  в соответствии с выражением (9), получим:

$$\begin{aligned}
 F(x, y, z, \dots, w) = & X(YZ \dots W + \bar{Y}Z \dots W + Y\bar{Z} \dots W + \dots + \\
 & + \bar{Y}\bar{Z} \dots W) \Sigma K_X + Y(XZ \dots W + \bar{X}Z \dots W + X\bar{Z} \dots W + \\
 & + \bar{X}\bar{Z} \dots W) \Sigma K_Y + \dots + W(XYZ \dots + \dots + \bar{X}YZ \dots + \dots + \\
 & + \bar{X}\bar{Y}Z \dots + \dots + \bar{X}\bar{Y}\bar{Z} \dots) \Sigma K_W,
 \end{aligned}$$

где  $\Sigma K_X$ ,  $\Sigma K_Y$  и т. д. обозначают сумму конституэнтов, содержащих члены, соответствующие исполнительным элементам  $X$ ,  $Y$  и т. д.

Пусть  $X, Y, Z, \dots, W$  включены только параллельно друг другу, т. е. в цепи каждого из них отсутствуют последовательно включенные реагирующие органы других. Тогда каждое из выражений, стоящих в скобках, будет равно единице.

Поэтому

$$F_{(X, Y, Z, \dots, W)} = X \Sigma K_X + Y \Sigma K_Y + \dots + W \Sigma K_W.$$

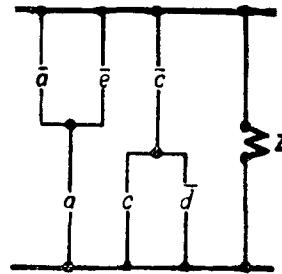


Рис. 9.

Если теперь в этом выражении приравнивать по очереди член, соответствующий одному из исполнительных элементов, единице, а остальные нулю, то получим:

$$\left. \begin{array}{l} F_{(1, 0, 0, \dots, 0)} = \Sigma K_X, \\ F_{(0, 1, 0, \dots, 0)} = \Sigma K_Y, \\ \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots \vdots \\ F_{(0, 0, 0, \dots, 1)} = \Sigma K_W. \end{array} \right\} \quad (10)$$

Каждое из этих выражений представляет собой сумму конституентов единицы, относящихся к какому-нибудь одному исполнительному элементу, т. е., иначе говоря, представляет собой структурную формулу схемы для этого исполнительного элемента, разложенную на конституенты.

исполнительного элемента, разложенную на конституэнты. Так как при разложении на конституэнты получается структурная формула, равносильная первоначальной, то рассмотренную выше операцию по выделению структурных формул для отдельных исполнительных элементов можно производить, и не прибегая к разложению структурной формулы общей схемы на конституэнты.

Приравнивание какого-либо члена нулю равносильно размыканию цепи в месте схемы, где находится элемент, соответствующий этому члену. Поэтому описанная выше операция по выделению схемы какого-либо исполнительного элемента в действительной схеме будет соответствовать разрыву схемы во всех местах, где помещаются реагирующие органы вспомогательных элементов, за исключением места, где помещается реагирующий орган данного исполнительного элемента.

Например, для того, чтобы получить цепи, воздействующие в схеме рис. 6 на исполнительный элемент  $Z$ , нужно разомкнуть<sup>4</sup> схему в пунктах, где присоединены  $X$ ,  $Y$ ,  $V$  и  $W$ , и замкнуть накоротко  $Z$ . Получающаяся при этом схема цепей для  $Z$  приведена на рис. 10, с.

Описанный выше способ дает возможность выделить для любого из исполнительных элементов все элементы схемы, которые образуют с ними последовательные цепи. Разложенные схемы на конституэнты нуля дает возможность аналогичным путем выделить все цепи, соединенные в данной схеме параллельно какому-либо элементу в случае последовательного соединения этого элемента с другими.

\* Размыкание  $W$  и  $V$  можно производить только в том случае, если при последовательном соединении с ними  $Z$  не должен срабатывать.

Действительно, разлагая функцию

$F(x, y, z, \dots, w) = f(a, b, \dots, n, x, y, z, \dots, w, X, Y, Z, \dots, W)$ ,  
на конституенты нуля и группируя члены при  $X, Y, Z, \dots, W$ , получим:

$$F(x, y, z, \dots, w) = [X + (Y + Z + \dots + W)(\bar{Y} + Z + \dots + W) \dots (\bar{Y} + \bar{Z} + \dots + \bar{W}) + \Pi K_X] [Y + (X + Z + \dots + W)(\bar{X} + Z + \dots + W) \dots (\bar{X} + \bar{Z} + \dots + \bar{W}) + \Pi K_Y] [Z + (X + Y + \dots + W)(\bar{X} + Y + \dots + W) \dots (\bar{X} + \bar{Y} + \dots + \bar{W}) + \Pi K_Z] \dots [W + (X + Y + Z + \dots + W)(\bar{X} + \bar{Y} + \dots + \bar{W}) + \Pi K_W],$$

где  $\Pi K_X, \Pi K_Y$  и т. д. — произведения конституентов, содержащих члены, соответствующие исполнительным элементам  $X, Y$  и т. д.

Так как при отсутствии параллельно соединенных  $X, Y, Z, \dots, W$  произведения выражений, стоящих в круглых скобках, для каждой из квадратных скобок в отдельности равно нулю, то

$$F(x, y, z, \dots, w) = (X + \Pi K_X)(Y + \Pi K_Y) \dots (W + \Pi K_W).$$

Как можно видеть из этого выражения,  $\Pi K_X$  представляет собой цепи, параллельные  $X$ ;  $\Pi K_Y$  — цепи, параллельные  $Y$ , и т. д. Для выделения какой-либо из этих цепей нужно член, характеризующий соответствующий исполнительный элемент, приравнять нулю, а члены, характеризующие остальные элементы, — единице. При этом получим:

$$\left. \begin{array}{l} F_{(0, 1, 1, \dots, 1)} = \Pi K_X, \\ F_{(1, 0, 1, \dots, 1)} = \Pi K_Y, \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ F_{(1, 1, 1, \dots, 0)} = \Pi K_W. \end{array} \right\} \quad (10)$$

В действительной схеме эта операция будет соответствовать замыканию пакоротко реагирующих органов всех исполнительных элементов, за исключением того, для которого производится выделение цепей, и размыканию этого последнего.

Выделение параллельных цепей бывает необходимо при анализе схем так называемого «инверсного» типа, в которых реагирующие органы исполнительных элементов включены последовательно друг с другом. На рис. 8 изображена инверсная схема, действие которой одинаково с действием схемы рис. 6. Каждый из исполнительных элементов в этой схеме срабатывает при размыкании контактных цепей, включенных параллельно его реагирующему органу. Для выделения цепей, воздействующих на реагирующий орган  $Z$ , нужно в соответствии с сформулированным выше правилом закоротить  $X, Y, V$  и  $W$ . Получающиеся при этом цепи изображены на рис. 9. Легко видеть, что условия срабатывания исполнительного элемента  $Z$  получаются при этом одинаковыми с условиями, имеющими место в схеме рис. 6.

Следует отметить, что выделение последовательных и параллельных цепей может быть осуществлено описанным выше путем не только по отношению к реагирующим органам исполнительных элементов, но также и по отношению к любым элементам схемы.

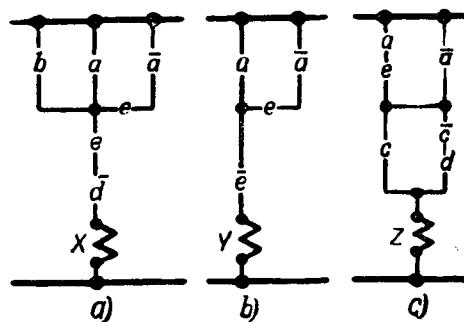


Рис. 10.

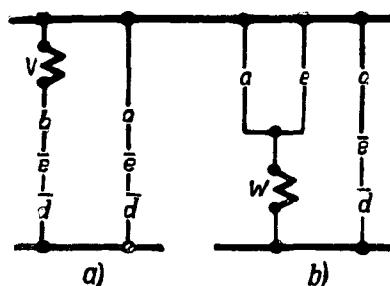


Рис. 11.

**Выделение элементарных цепей.** Разложение схемы на цепи для исполнительных элементов позволяет значительно упростить анализ схемы, уменьшая количество членов, с которыми приходится иметь дело при определении конституентов нуля и единицы. Однако, и при этом выписывание всех конституентов и определение значения коэффициентов в формулах (7) и (8) может в ряде случаев оказаться громоздким. Анализ формул (7) и (8) позволяет внести дальнейшие упрощения в этой операции.

Действительно, нет необходимости выписывать все конституенты разложения нуля или единицы, так как по внешнему виду структурных формул для исполнительных элементов можно заранее определить, для каких конституентов коэффициенты в выражениях (7) и (8) будут обращаться в нуль или будут равны единице.

Рассмотрим для примера цепи исполнительного элемента  $Z$  в схеме рис. 6. Структурная формула этих цепей, как это можно видеть из рис. 10, с, будет выглядеть следующим образом:

$$F_Z = (ae + \bar{a})(c + \bar{cd}).$$

Раскрывая скобки, получим:

$$F_Z = ace + a\bar{c}de + \bar{a}c + \bar{a}\bar{c}d.$$

Это выражение будет равно единице, если

$$a = 1, c = 1 \text{ и } e = 1,$$

или

$$a = 1, c = 0, d = 1 \text{ и } e = 1,$$

или

$$a = 0 \text{ и } c = 1,$$

или

$$a = 0, c = 0 \text{ и } d = 1.$$

Как можно видеть из формулы (7), это свидетельствует о наличии в разложении следующих конституентов единицы:

$$F_Z = acde + ac\bar{d}e + a\bar{c}de + \bar{a}cde + ac\bar{d}e + ac\bar{d}\bar{e} + a\bar{c}d\bar{e} + a\bar{c}\bar{d}e + \bar{a}\bar{c}de + \bar{a}\bar{c}\bar{d}\bar{e} = ace(d + \bar{d}) + a\bar{c}de + \bar{a}\bar{c}(de + \bar{d}e + \bar{d}\bar{e}) + \bar{a}\bar{c}\bar{d}(e + \bar{e}).$$

Члены, стоящие перед скобками, представляют собой как это легко можно заметить, все имеющиеся в схеме различные пути, по которым можно образовать последовательные цепи контактов, проходящих через каждый узел только один раз, а выражения, стоящие в скобках, все равны единице. Это обстоятельство позволяет сформулировать правило, при помощи которого можно получить разложение схемы на элементарные цепи, не прибегая к отысканию конституентов. Для этого после выделения схем для отдельных исполнительных элементов нужно лишь выписать для каждой из них все параллельные цепи, полученные указанным выше путем. Особенно удобно применять этот способ для непараллельно последовательных схем (схем класса II), которые нельзя выразить аналитически при помощи символики алгебры логики<sup>5</sup> и затем получить элементарные цепи простым раскрытием скобок, как это сделано выше.

Аналогичным путем могут быть получены элементарные цепи и в случае разложения на конституенты нуля.

Рассмотрим для примера цепи исполнительного элемента  $Z$  в схеме рис. 9. Структурная формула цепей, параллельных  $Z$ , будет иметь вид:

$$F_{(Z)} = (\bar{a} + \bar{e})a + \bar{c}(c + \bar{d}).$$

При разложении на конституенты нуля остаются члены, для которых коэффициенты в формуле (8) обращаются в нуль. Написанная выше структурная формула обращается в нуль, если

$$a = 1, e = 1 \text{ и } c = 1,$$

или

$$a = 1, e = 1, c = 0 \text{ и } d = 1,$$

или

$$a = 0 \text{ и } c = 1,$$

$$a = 0, c = 0 \text{ и } d = 1.$$

При разложении на конституенты получим:

$$F_Z = (\bar{a} + \bar{c} + d + \bar{e})(\bar{a} + \bar{c} + \bar{d} + \bar{e})(\bar{a} + c + \bar{d} + \bar{e})(a + \bar{c} + d + e)(a + \bar{c} + \bar{d} + \bar{e})(a + c + \bar{d} + e)(a + c + \bar{d} + \bar{e})(a + c + \bar{d} + e)(a + c + \bar{d} + \bar{e}).$$

Воспользовавшись распределительным законом сложения относительно умножения, по которому  $(x+y)(x+z) = x+yz$  [Л. 4], объединим  $\bar{a} + \bar{c} + \bar{d} + \bar{e}$ , содержащиеся в первом и втором сомножителях полученного выше выражения  $a + \bar{c}$ , содержащиеся в четвертом, пятом, шестом и седьмом сомножителях и наконец  $a + c + \bar{d}$ , содержащиеся в двух последних из них. После этого

$$F_{(Z)} = (\bar{a} + \bar{c} + \bar{d} + \bar{e})(\bar{a} + c + \bar{d} + e)[a + \bar{c} + (d + e)(d + \bar{e})(\bar{d} + e)(\bar{d} + \bar{e})](a + c + \bar{d} + e) = = (\bar{a} + \bar{c} + \bar{e})(a + \bar{c} + \bar{d} + \bar{c})(a + \bar{c})(a + c + \bar{d}).$$

Легко заметить, что выражения в скобках представляют собой все сечения линий схемы, которые полностью

<sup>5</sup> Примером непараллельно последовательной схемы может служить, например, схема контактного мостика Уитстона.

разрывают цепи, параллельные  $Z$ . Таким образом, для разложения схемы на конституенты нуля достаточно привести все возможные сечения контактных цепей и, выписав контакты, которые входят в каждое из этих сечений, в виде суммы, взять затем их произведение.

Для иллюстрации сказанного выше рассмотрим разложение схемы рис. 6. Пусть при последовательном соединении  $W$  или  $V$  с  $Y$  и  $Z$ , а также  $W$  и  $V$  с  $X$  ни один из этих исполнительных элементов не должен срабатывать, при последовательном соединении  $V$  и  $X$  должны срабатывать как  $V$ , так и  $X$  и, наконец, при последовательном соединении  $W$  и  $X$  должен срабатывать первый из них.

Закорачивая  $V$  и размыкая  $W$ ,  $Y$  и  $Z$ , получим при этих условиях цепи для исполнительного элемента  $X$  (рис. 10, a). Выписывая все параллельные пути, получим следующие условия работы его:

$$F_{(X)} = b\bar{e}\bar{d} + a\bar{e}\bar{d} + a\bar{e}d.$$

Последняя цепь, содержащая выражение  $ee$ , всегда разомкнута. Поэтому окончательно

$$F_{(X)} = b\bar{e}\bar{d} + a\bar{e}\bar{d},$$

т. е. исполнительный элемент  $X$  должен срабатывать, если работают приемные элементы  $B$  или  $A$  и не работают  $E$  и  $D$ .

Разорвав  $V$  и  $W$  и размыкая поочередно  $Y$  и  $Z$ , получим цепи и для этих исполнительных элементов (рис. 10, b и c). Условия работы их будут выглядеть следующим образом:

$$F_{(Y)} = a\bar{e} + \bar{a}e\bar{e} = a\bar{e},$$

$$F_{(Z)} = (ae + \bar{a})(c + \bar{c}d).$$

Так как в соответствии с указанным выше распределительным законом сложения относительно умножения

$$ae + \bar{a} = (a + \bar{a})(e + \bar{a}) = e + \bar{a}$$

$$c + \bar{c}d = (c + \bar{c})(c + d) = c + d,$$

то для  $F_{(Z)}$  будем иметь:

$$F_{(Z)} = (\bar{e} + \bar{a})(c + d) = ec + \bar{a}c + ed + \bar{a}d.$$

Исполнительные элементы  $V$  и  $W$  должны, как уже говорилось выше, срабатывать при последовательном соединении каждого из них в отдельности с  $X$ . Закорачивая  $X$  и разрывая поочередно  $V$  и  $W$ , получим схемы их цепей, показанные на рис. 7, b и 7, c.

Выписывая параллельные цепи, будем иметь для рис. 10, b:

$$F = Vb\bar{e}\bar{d} + a\bar{e}\bar{d} + \bar{a}e\bar{e}\bar{d} = Vb\bar{e}\bar{d} + a\bar{e}\bar{d};$$

для рис. 6, c:

$$F = abW + a\bar{e}\bar{d} + \bar{a}ebW + \bar{a}e\bar{e}\bar{d} = = Wb(a + \bar{a}e) + a\bar{e}\bar{d} = Wb(a + e) + a\bar{e}\bar{d}.$$

Соответствующие схемы изображены на рис. 11, a и b. Каждая из них представляет две цепи, в одной из которых контакты соединены последовательно с  $V$  или  $W$ , а в другой—параллельно с ними. Для срабатывания  $V$  и  $W$  нужно, чтобы последовательные цепи были замкнуты, а параллельные разомкнуты. Возьмем для определения усло-

<sup>6</sup> Те же результаты можно получить, записав цепи элемента  $X$  в виде аналитического выражения и раскрыв в последнем все скобки.

вий размыкания параллельных цепей их отрицания. Пользуясь законом инверсии<sup>7</sup>, получим:

$$F_V = b\bar{e}\bar{d}(\bar{a}\bar{e}\bar{d}) = b\bar{e}\bar{d}(\bar{a} + e + d) = \bar{a} + e + d,$$

$$F_W = b(a+e)(\bar{a}\bar{e}\bar{d}) = b(a+e)(\bar{a} + e + \bar{d}) = \\ = bae + bad + \bar{a}be + be + bed.$$

Так как  $bae + \bar{a}be + be + bed = be(a + \bar{a} + 1 + d) = be$ , то для  $F_W$  будем иметь окончательно:

$$F_W = bad + be.$$

**Определение последовательности действия исполнительных элементов.** Выделение цепей исполнительных элементов позволяет определить условия работы каждого из них в отдельности. Однако, при анализе схем часто бывает необходимым определение также и взаимодействия исполнительных элементов для проверки или изучения действия всей схемы в целом.

При проверке действия вновь проектируемых схем последовательность работы ее исполнительных элементов заранее известна, так как она составляет один из элементов задания на проектирование. При проверке же работы схемы при повреждении или при расшифровке действия новых схем последовательность работы исполнительных элементов приходится устанавливать только на основании анализа самой схемы.

Для определения взаимодействия исполнительных элементов полезно выписать цепи их в виде так называемой структурной матрицы. Последняя представляет собой таблицу, в каждой строке которой выписаны символы реагирующего органа исполнительного элемента и действующих на него контактов. Например, для рассмотренного выше примера рис. 6 структурная матрица будет выглядеть следующим образом:

$$F_{(x, y, z, v, w)} = \begin{vmatrix} X & a & b & 0 & \bar{d} & e \\ Y & a & 0 & 0 & 0 & \bar{e} \\ Z & \bar{a} & 0 & c & d & e \\ V & \bar{a} & b & 0 & \bar{d} & e \\ W & a & b & 0 & d & e \end{vmatrix}.$$

По внешнему виду структурной матрицы довольно легко определить тип релейно-контактной схемы, а вместе с этим определить примерно и последовательность работы ее исполнительных элементов, а также действие их друг на друга.

Действительно, если в структурной матрице каждая строка ее будет содержать контакты только приемных элементов, то никакого взаимодействия между ее исполнительными элементами произойти не будет. Схема, определяемая этой матрицей, будет принадлежать к типу так называемых однотактных схем, функции

<sup>7</sup> Закон инверсии, рассматриваемый в алгебре логики и позволяющий по данной функции получить ее отрицание, выражается следующим образом:  $\bar{xy} = \bar{x} + \bar{y}$  или  $x + y = \bar{x} \cdot \bar{y}$  [Л. 4].

которых сводятся к однократному включению (или выключению) одного или одновременно нескольких исполнительных элементов при однократном действии приемных элементов. Примером такой схемы может служить схема рис. 6, структурная матрица которой приведена выше.

Если строки структурной матрицы будут содержать контакты как приемных, так и исполнительных элементов, то это будет свидетельствовать о том, что схема принадлежит к типу так называемых многотактных схем, в которых при однократном действии приемных элементов происходит работа нескольких исполнительных элементов в определенной последовательности друг за другом, т. е. предусматривается взаимодействие их. При этом по расположению контактов исполнительных элементов в строках структурной матрицы можно судить и о характере этого взаимодействия. Если строки матрицы можно расположить таким образом, что в каждой из последующих строк будет содержаться контакт исполнительного элемента предыдущей строки, то это будет означать, что срабатывание исполнительных элементов схемы происходит друг за другом в порядке следования строк матрицы. При этом отсутствие в каждой из строк матрицы контактов исполнительных элементов последующих строк исключает воздействие последующих элементов на предыдущие. Поэтому в течение одного цикла работы схемы (т. е. при однократном действии на приемные элементы) ни один из исполнительных элементов схемы не может возвратиться в свое первоначальное положение, что свидетельствует о принадлежности схемы, характеризуемой данной матрицей, к числу схем с чисто последовательным действием исполнительных элементов.

Если в какой-либо одной или нескольких строках матрицы имеются контакты собственного исполнительного элемента или контакты исполнительных элементов последующих строк, то это указывает на наличие воздействия исполнительного элемента на самого себя или же на воздействие последующих исполнительных элементов на предыдущие. Это воздействие может быть противоположным первоначальному, испытанному этим элементом в начале работы схемы, или же подтверждать его. В первом случае сработавшие исполнительные элементы возвращаются в свое первоначальное положение, и если к этому времени воздействие на приемные элементы не прекратилось, то действие схемы начинается вновь. Если при этом воздействие последнего исполнительного элемента присходит на самый первый из них, то это свидетельствует о том, что схема, характеризуемая данной матрицей, принадлежит к числу схем с возвратным действием исполнительных элементов. Если же это воздействие производится на один из промежуточных элементов, то данная схема принадлежит к схемам с последовательновозвратным действием исполнительных элементов.

Во втором случае, т. е. тогда, когда контакты последующего исполнительного элемента, наход-

дящиеся в цепи предыдущего, подтверждают первоначальное воздействие на него, последний остается в занятом им положении даже после прекращения воздействия на приемные элементы. Это свидетельствует о том, что рассматриваемая схема принадлежит к числу схем блокировкой.

Таким образом, структурная матрица схемы наряду с выражениями элементарных цепей исполнительных элементов позволяет легко определить тип схемы и в месте с этим последовательность действия исполнительных элементов ее.

В некоторых случаях достаточно наглядное представление о последовательности работы исполнительных элементов схемы дают так называемые структурные диаграммы, которые представляют собой условное графическое изображение воздействий различных элементов схемы друг на друга<sup>8</sup>. Если, например, изобразить приемные элементы в виде точек, а исполнительные — в виде квадратиков и обозначить воздействие контактов какого-нибудь элемента на другой, приводящее к включению его, в виде сплошной линии, а приводящее к отключению — в виде пунктирной линии, то полученная диаграмма по своему внешнему виду получается достаточно характерной для различных типов схем и, при наличии некоторого навыка позволяет определить тип, к которому принадлежит рассматриваемая схема.

**Анализ схем с временными зависимостями и переходными контактами.** В ряде случаев в релейно-контактных схемах используются так называемые временные зависимости. Исполнительные элементы выполняются при этом с различными временами включения и отключения, что придает схеме свойства реагировать по-разному на различные продолжительности воздействия извне или же оказывать отличающиеся друг от друга или заранее заданные по продолжительности воздействия на исполнительные элементы. К схемами с временными зависимостями можно также отнести те из них, в которых воздействие на отдельные исполнительные элементы производится не тогда, когда все элементы схемы находятся в полностью включенном или выключенном положениях, а в момент перехода его из одного положения в другое. Соответствующие приемные и исполнительные элементы снабжаются в этом случае контактами, замыкающими или размыкающими только на момент перехода из одного положения в другое. Эти так называемые переходные контакты получаются при помощи специального конструктивного выполнения их или же, что чаще делается, при помощи специальной регулировки нормальных контактов.

Замыкающий переходный контакт по своему действию равносителен последовательному соединению нормальных замыкающего и размыкаю-

щего контактов одного и того же элемента, которые отрегулированы так, что первый из них замыкает цепь раньше, чем ее разомкнет второй. При этом, как это легко сообразить, цепь получается замкнутой только на момент перехода соответствующего исполнительного элемента из одного положения в другое, при полностью же включенном или отключенном положении элемента цепь будет всегда разомкнута.

Размыкающий переходный контакт по своему действию равносителен параллельному соединению нормальных замыкающего и размыкающего контактов одного и того же элемента, которые отрегулированы так, что второй из них размыкает цепь раньше, чем первый успеет ее замкнуть. Цепь исполнительного элемента, на который воздействуют эти контакты, получается при этом разомкнутой только на момент перехода контактов из одного положения в другое, нормально же она всегда замкнута.

Если в схеме имеются замыкающие и размыкающие переходные контакты, то при анализе пренебрегать действием цепей, определяемых выражениями (3) — (6), уже нельзя и при выделении элементарных цепей те из них, в которых содержатся выражения типа (3) — (4), можно рассматривать равными нулю или единице только по отношению к остальным цепям. Сами же эти цепи необходимо сохранять и при определении условий работы исполнительных элементов учитывать их действие в переходные моменты.

При анализе схем учет действия элементов с временными зависимостями и переходными контактами может быть произведен при помощи соответствующей индексации их. Этот вопрос требует, однако, самостоятельного рассмотрения.

#### Приложение 1

Если

$$1 = x + \bar{x},$$

то также

$$1 = (x_1 + \bar{x}_1)(x_2 + \bar{x}_2),$$

так как каждое из выражений, стоящих в скобках, по отдельности равно единице, а  $1 \cdot 1 = 1$ .

Раскрывая скобки, получим:

$$1 = x_1x_2 + \bar{x}_1x_2 + x_1\bar{x}_2 + \bar{x}_1\bar{x}_2.$$

Аналогично этому:

$$1 = (x_1 + \bar{x}_1)(x_2 + \bar{x}_2)(x_3 + \bar{x}_3) = x_1x_2x_3 + x_1\bar{x}_2x_3 + x_1x_2\bar{x}_3 + \\ + x_1\bar{x}_2\bar{x}_3 + \bar{x}_1x_2x_3 + \bar{x}_1\bar{x}_2x_3 + x_1\bar{x}_2\bar{x}_3 + \bar{x}_1x_2\bar{x}_3$$

или в общей форме:

$$1 = x_1x_2 \dots x_n + \bar{x}_1x_2 \dots x_n + x_1\bar{x}_2 \dots x_n + \dots + \\ + x_1x_2 \dots \bar{x}_n + \bar{x}_1\bar{x}_2 \dots x_n + \dots + \bar{x}_1\bar{x}_2 \dots \bar{x}_n. \quad (5)$$

Аналогично, пользуясь выражением (4), можно написать:

$$0 = x_1\bar{x}_1 + x_2\bar{x}_2.$$

<sup>8</sup> Структурные диаграммы были впервые применены автором настоящей статьи при рассмотрении схем автоматического регулирования (Известия ВТИ, стр. 42 — 72, № 3, 1931).

Применяя распределительный закон сложения относительно умножения, будем иметь:

$$0 = (x_1 + x_2 \bar{x}_2)(\bar{x}_1 + x_2 \bar{x}_2) = (x_1 + x_2)(x_1 + \bar{x}_2)(\bar{x}_1 + + x_2)(\bar{x}_1 + \bar{x}_2).$$

Аналогично:

$$0 = x_1 \bar{x}_1 + x_2 \bar{x}_2 + x_3 \bar{x}_3 = (x_1 + x_2 + x_3)(x_1 + x_2 + \bar{x}_3)(x_1 + + \bar{x}_2 + x_3)(\bar{x}_1 + x_2 + x_3)(\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3)(\bar{x}_1 + + \bar{x}_2 + \bar{x}_3)(x_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3),$$

откуда в общей форме получим выражение (6).

## Приложение 2

Пусть имеется функция

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

и ее требуется разложить по отношению к  $x_1$ .

Положим, что задача разрешена и что искомое выражение будет

$$ax_1 + b\bar{x}_1.$$

Так как эта функция должна быть равносильна первоначальной, то

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = ax_1 + b\bar{x}_1$$

при любых значениях  $x_1$ .

Положим  $x_1 = 0$ . Тогда  $\bar{x}_1 = 1$ , и мы будем иметь:

$$f(0, x_2, x_3, \dots, x_n) = b.$$

При  $x_1 = 1(\bar{x}_1 = 0)$  получим:

$$f(1, x_2, x_3, \dots, x_n) = a.$$

Таким образом,

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = f(1, x_2, x_3, \dots, x_n) x_1 + + f(0, x_2, x_3, \dots, x_n) \bar{x}_1.$$

Разлагая каждый из членов правой части полученного выражения по отношению к  $x_2$ , будем иметь:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = f(1, 1, x_3, \dots, x_n) x_1 x_2 + f(1, 0, x_3, \dots, x_n) \bar{x}_1 x_2 + f(0, 1, x_3, \dots, x_n) \bar{x}_1 \bar{x}_2 + f(0, 0, x_3, \dots, x_n) \bar{x}_1 \bar{x}_2.$$

Продолжая поступать таким же образом по отношению ко всем остальным членам функции, в конце концов получим формулу (1).

Подобным же образом можно разложить любую функцию и на конституенты нуля, представив это разложение в виде

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = (a + x_1)(b + \bar{x}_1)$$

и приравнивая, как и выше  $x_1$ , сначала нулю, а потом единице.

## Литература

1. Л. Кутюра. Алгебра логики. Изд. Mathesis, 1909.
2. С. Шанноп. A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits. Тр. А. И. Е. Е., в. 57, 1938.
3. В. Шестаков. Алгебра двухполюсных схем, построенных исключительно из двухполюсников. Автоматика и телемеханика № 1, 1940.
4. М. Гаврилов. Методы синтеза релейно-контактных схем. Электричество, № 2, 1946.



# Структура и характеристики современных схем автоматического управления электроприводами постоянного тока

Кандидат техн. наук А. А. БУЛГАКОВ

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

**Структура и общие свойства.** Современный регулируемый электропривод постоянного тока состоит из двигателя, питаемого от преобразователя переменного тока в постоянный, и устройств автоматического управления. В качестве преобразователей применяются: двигатель-генераторы с синхронными и асинхронными двигателями и управляемые мутаторы — ртутные выпрямители и тиатроны.

Принципиальной особенностью новых схем управления является наличие в них замкнутых цепей обратной связи, обычных для компенсационных авторегуляторов. Поэтому основным аппаратом новых схем управления являются усилители, определяющие их конструктивные формы и технические характеристики. Применяемые усилители можно разделить на три группы: 1) электромагнитные статические усилители постоянно-переменного тока на дросселях насыщения; 2) электромеханические врачающиеся усилители — генераторы постоянного тока; 3) электронные усилители.

Эту классификацию усилителей можно с некоторой условностью положить и в основу классификации схем управления.

Начало развитию новых схем управления положило появление электропривода с управляемыми ртутными выпрямителями. Характерная для последних крутопадающая внешняя характеристика привела к необходимости применения автоматических регуляторов для поддержания постоянства напряжения на клеммах двигателя. Успешные результаты в этой области были перенесены затем и в электропривод с двигатель-генераторами.

В 1936 г. шведской фирмой ASEA было разработано устройство «Авостат» (рис. 1) с электромагнитными усилителями для управления электроприводом нереверсивного прокатного стана с питанием двигателя 3 000 kW от управляемого ртутного выпрямителя. Установка имела характеристики управления, ставшие типичными

Дается краткий обзор современных схем управления регулируемыми электроприводами постоянного тока. На основе сравнения типичных схем показываются их структура и общие свойства. Анализируются статические характеристики электроприводов с замкнутой цепью управления.

для всех схем, рассматриваемых здесь (рис. 2). В том же 1936 г. в СССР Ф. И. Бутаевым и М. В. Мартыновым были разработаны в ВЭИ устройствомеханического усилителя — генератора постоянного тока с двумя обмотками возбуждения, для автоматического регулирования электропривода с ртутными выпрямителями<sup>1</sup>.

После 1940 г. схемы управления с электромеханическими усилителями — амплидин (GEC), рототорол (Westinghouse) и регулекс (Allis Chalmers) — получили восьма широкое применение для электроприводов всех мощностей с двигатель-генераторными преобразователями.

На рис. 3 показана схема управления электропривода с амплидинами.

С 1943 г. получает широкое применение для электроприводов небольшой мощности (до 15, реже 30 kW), в особенности к станкам, система управления с электронными усилителями и питанием двигателя от тиатронов — таймоторол (GEC рис. 4), мототорол (Westinghouse) и другие устройства<sup>2</sup> (Weltronic Co. Reliance Co. Century Electric Co.).

Внешнее разнообразие форм выполнения всех перечисленных схем и решения частных задач управления скрывает некоторые общие им всем основные принципы, поясняемые блок-схемой рис. 5.

Как показывает таблица, сравнивающая типичные схемы, показанные на рис. 1, 3 и 4, можно выделить четыре основных задачи автоматического управления, которые во всех новых схемах имеют принципиально одинаковое решение: 1) управление скоростью; 2) управление

<sup>1</sup> Авторское свидетельство на имя Бутаева и Мартынова от 16 июля 1937 г. за № 9277/53351 и [Л. 7].

<sup>2</sup> Электронные системы управления электроприводами с ртутными выпрямителями большой мощности были разработаны в ВЭИ в 1939—1941 гг. [Л. 9].

## Сравнение типичных схем управления

| Блок-схема (рис. 5)  | Система с электромагнитными усилителями "Авостат" ASEA (рис. 1)  | Система с электромеханическими усилителями, схема GEC с амплидами (рис. 3)  | Система с электронными усилителями таймопрол (рис. 4)   |
|--|--|---|---|
| Преобразователь  | Управляемый ртутный выпрямитель 1 и 2  | Двигатель-генератор 1   | Тиатронный выпрямитель 1  |
| Усилитель преобразователя  | Фазовый мост сеточного управления 4 на дросселях насыщения   | Два каскада — амплидии $AG$ , 3-й каскад возбудитель $VG$   | Два каскада триоды $C$ и $D$ , третий каскад — фазовый мост 12 на дросселях насыщения   |
| Индикатор напряжения преобразователя                                     | Обмотка возбуждения $b$ фазового моста 4 питается током (в точках $P_1-P_2$ ), пропорциональным разности напряжений командоаппарата и преобразователя  | Обмотка возбуждения $B$ амплидина $AG$ питается током, пропорциональным разности напряжений пилотгенератора $PN$ и преобразователя (в точках $+B+H$ потенциометра)  | Сетка триода $C$ управляет разностью командного напряжения потенциометра 4 и напряжения преобразователя (с потенциометра 8)   |
| Командоаппарат<br>а) регулятор скорости — напряжением на якоре двигателя | Потенциометр 8 управляет насыщением дросселя (c, 5) в цепи стабилизатора напряжения (a, 5)   | Контакты 6 управляют возбуждением пилотгенератора $PN$ , замыкая ступени сопротивления в цепи его возбуждения   | Потенциометр 4 (слева) управляет напряжением сеточного смещения триода $C$  |
| б) то же — полем двигателя   |  | Контакты $M$ командоаппарата управляют возбуждением амплидина $AD$ , управляющего возбудителем $VD$ , замыкая ступени сопротивления в цепи его возбуждения  | Потенциометр 4 (справа) управляет напряжением сеточного смещения триода $CC$ , воздействующего на тиатронное возбуждение  |
| Регулятор компандирования характеристики                                 | Переключатель 9 регулирует добавочное напряжение в цепи командного напряжения (промежуточный трансформатор $a, b$ ), снимаемое с трансформатора тока $b$ и пропорциональное току двигателя   |   | Потенциометр 5 регулирует добавочное напряжение в цепи командного напряжения (сетки триода $C$ ), снимаемое с выпрямителя 7 и пропорциональное току двигателя   |
| Регулятор и реле-индикатор предельно тока (РПТ)                          | Обмотка возбуждения $d$ фазового моста 4 питается через выпрямитель $g$ током, пропорциональным превышению напряжения, пропорционального току двигателя (с выпрямителя $gh$ 7), над эталонными (с выпрямителя $c, 7$ ) регулируемым реостатом 10 | Обмотка возбуждения 1 амплидина $AG$ питается через мостовую схему с выпрямителями $HM$ током, пропорциональным превышению напряжения на серийных обмотках генератора и двигателя над эталонным напряжением пилотгенератора $PT$ , регулируемым реостатом $RPT$ | Сетка триода $E$ , воздействующего на второй каскад усилителя $D$ , управляет превышением напряжения, пропорционального току двигателя и снимаемого с выпрямителя 7 и регулируемого реостатом 6 над эталонным напряжением |
| Антиколебательные цепи   |  | Цепи эластичной обратной связи, осуществляемые трансформаторами и сопротивлениями $T_1, T_2, T_3$   | Цепи эластичной обратной связи, осуществляемые конденсаторами и сопротивлениями $II$ .  |

ускорением; 3) обеспечение необходимых статических характеристик; 4) предупреждение колебаний.

Рассмотрим их вкратце (рис. 5).

1. *Управление скоростью*. Командоаппарат  $KA$  может регулировать, ступенями или плавно, командное напряжение (ток), которое сравнивается в индикаторной цепи  $IN$  с напряжением преобразователя  $P$ , питающего двигатель  $D$ . Полученная разность напряжений через усилитель  $UP$  воздействует на возбуждение преобразователя, в результате чего образуется отрицательная обратная связь.

При неизменном положении рукоятки командоаппарата напряжение преобразователя имеет величину, соответствующую командному напряжению, которая поддерживается обратной связью

на достаточно постоянном уровне независимо от режима сети, нагрузки и возбуждения двигателя. При изменении положения командоаппарата напряжение преобразователя, а следовательно, и скорость двигателя следуют за изменениями командного напряжения, в чем и состоит процесс собственно управления.

Аналогичным путем осуществляется управление скоростью и на скоростях выше основной, т. е. в диапазоне регулирования поля двигателя, причем обратная связь берется от напряжения или тока возбуждения.

2. *Управление ускорением*. Управление ускорением двигателя при пуске, реверсе и торможении осуществляется автоматически — по принципу ограничения тока соответствующего переходного режима, вызванного изменением команд-

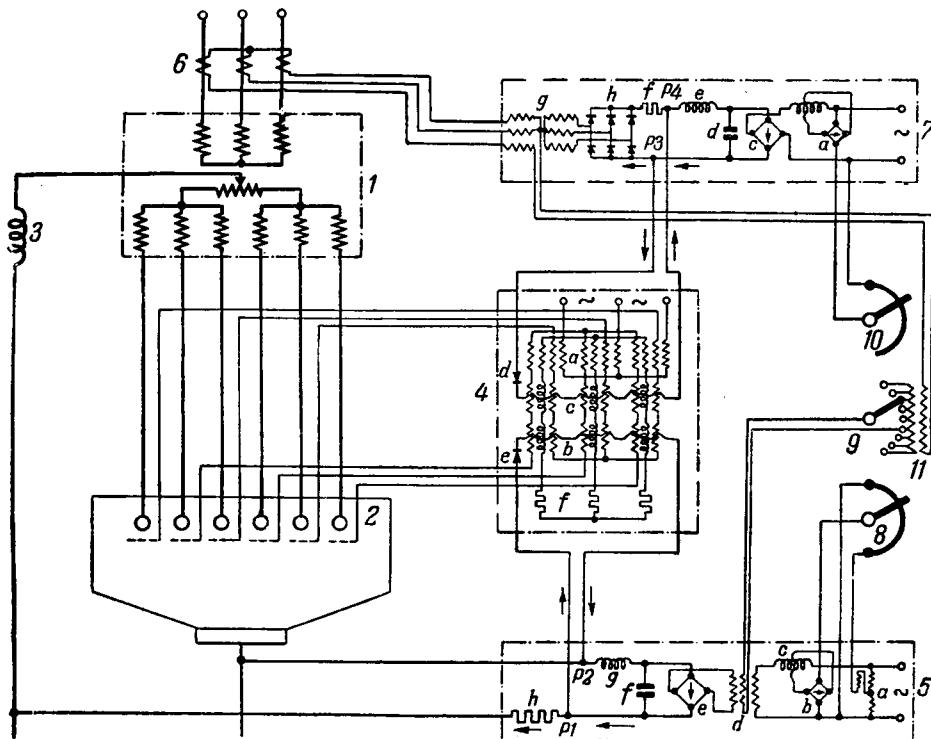


Рис. 1. Принципиальная схема системы „Авостат“.

1—силовой трансформатор; 2—управляемый ртутный выпрямитель; 3—дроссель; 4—фазовое устройство сеточного управления; 5—регулятор напряжения; 6—трансформатор тока; 7—регулятор предельного тока; 8—командоаппарат управления скорости; 9—регулятор компаундирования характеристики; 10—регулятор предельного тока.

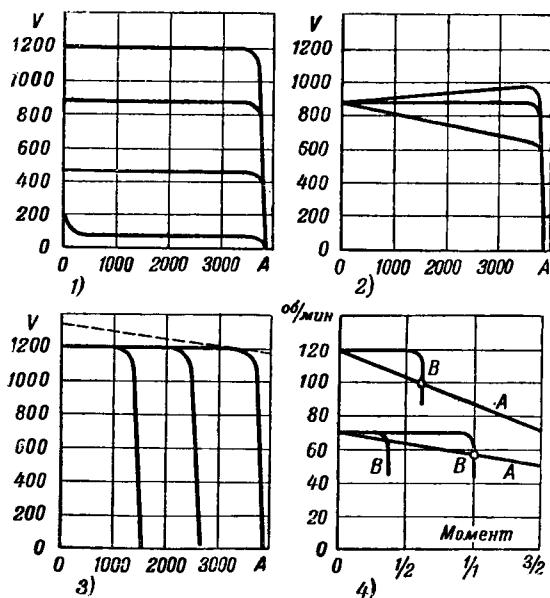


Рис. 2. Характеристики регулирования напряжения и скорости по системе „Авостат“.

1—регулировка напряжения; 2—компаундирования; 3—регулировка предельного тока; 4—механические характеристики привода—без автоматического регулирования (A), с управлением „Авостат“ (B).

ногого напряжения. Напряжение (ток), пропорциональное току преобразователя, сравнивается в индикаторной цепи ИПТ, содержащей нелинейные элементы (твердые или электронные выпрямители) с «эталонным» напряжением (током), заданным установочным регулятором РПТ.

Напряжение на выходе индикатора благодаря его нелинейной характеристике равно нулю, пока ток преобразователя не превышает заданного предельного значения. Когда ток пре- восходит предельное значение, индикатор дает

напряжение, пропорциональное превышению тока преобразователя над предельным значением. Таким образом, этот индикатор предельного тока выполняет функции бесконтактного реле максимального тока.

При перегрузках на скоростях, выше основной, т. е. при ослабленном поле двигателя, индикатор предельного тока воздействует сначала на усилитель двигателя УД, усиливая его поле, после чего уже воздействует на напряжение преобразователя.

3. Изменение статических характеристик. Для получения требуемого наклона механической характеристики двигателя, в частности, для поддержания постоянства скорости, в индикатор напряжения преобразователя вводится напряжение (ток), пропорциональное току преобразователя. Это напряжение, суммируясь с командным напряжением, обеспечивает требуемую зависимость напряжения от тока преобразователя, которая задается установочным регулятором компаундирования РК.

Рассмотренная выше схема ограничения тока также может быть использована для получения механических характеристик «экскаваторного» типа.

4. Предупреждение колебаний. Наличие в новых схемах обратной связи, осуществляющих управление, и усилителей с относительно большим числом инерционных постоянных создает условия для самовозбуждения колебаний. Для устранения колебаний и получения требуемого характера переходных режимов применяются специальные антиколебательные цепи «эластичной» обратной связи с конденсаторами или трансформаторами, напряжение на выходе которых примерно пропорционально производной входного воздействия.

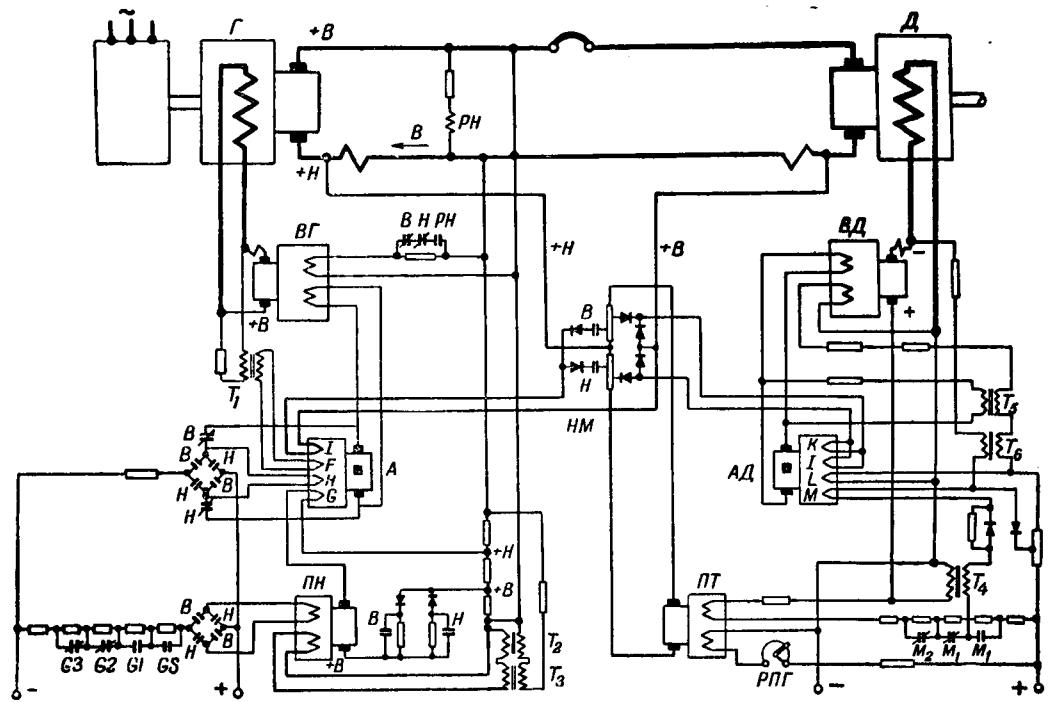


Рис. 3. Принципиальная схема управления электроприводом бломинга с амплидинами (GE).  $G$ —генератор;  $D$ —двигатель;  $VG$  и  $VD$ —возбудители генератора и двигателя;  $AG$  и  $AD$ —амплидны генератора и двигателя;  $PN$ —пилотгенератор напряжения;  $PT$ —пилотгенератор предельного тока;  $NM$ —нелинейный мост в цепи предельного тока;  $PT$ —регулятор предельного тока.

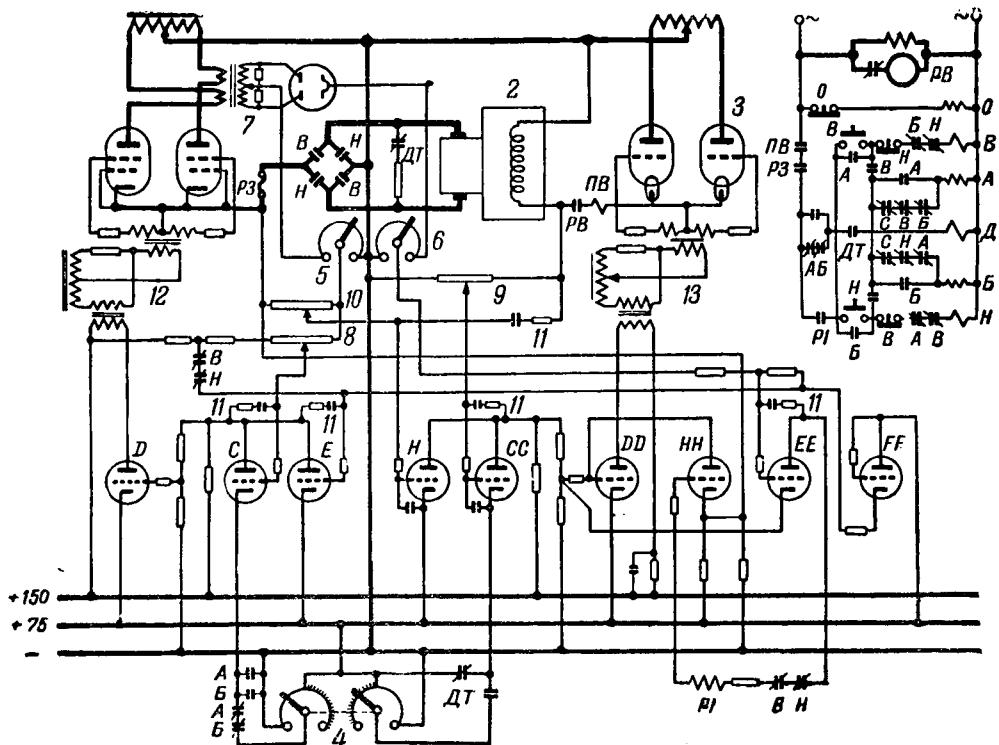


Рис. 4. Принципиальная схема электронного управления таймотором (GE).  
 1—тиратроны якоря двигателя; 2—двигатель; 3—тиратроны возбуждения двигателя; 4—командоаппарат регулировки напряжения (слева) и поля (справа); 5—регулятор компаундирования; 6—регулятор предельного тока; 7—выпрямитель напряжения, пропорционального току якоря.

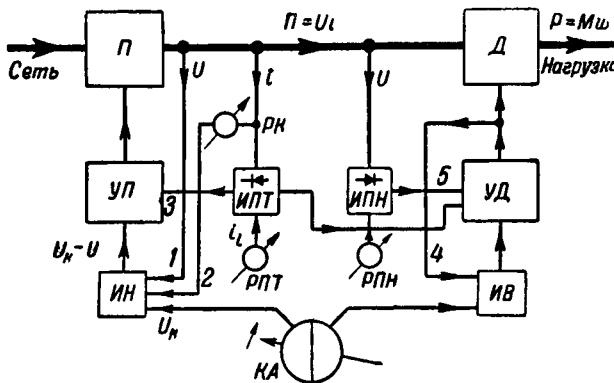


Рис. 5. Блок-схема аппаратов управления и цепей обратной связи.

П—преобразователь (двигатель-генератор, ионный мутатор); Д—двигатель; КА—командоаппарат; ИН—индикатор напряжения; ИВ—индикатор возбуждения двигателя; УП и УД—усилители преобразователя и двигателя; ИПТ—индикатор предельного тока; РПТ—регулятор предельного тока; ИПН—индикатор предельного напряжения; РПН—регулятор предельного напряжения. Обратные связи: 1—от напряжения преобразователя; 2 и 3—от тока; 4—от напряжения возбуждения; 5—от напряжения на якоре двигателя.

В ряде новых схем способами, аналогичными рассмотренным, решаются и другие частные задачи управления. Например, в схеме таймогрол регулирование замедления при торможении в диапазоне ослабленного поля осуществляется ограничением напряжения на якоре ИПН, подготовка к инвертированию обеспечивается индикатором, сравнивающим напряжение тиристронов с э. д. с. якоря двигателя, и т. д.

Таким образом, общая характеристика рассмотренных схем управления сводится к следующему.

Наиболее существенным элементом новых схем управления являются цепи обратной связи, т. е. такие цепи управления, которые передают воздействие от управляемой величины на управляющую, благодаря чему получается замкнутая цепь. Воздействие передается цепью обратной связи только в одном направлении, обратном управляющему воздействию, и приложено к входу усилителя. Основные цепи отрицательной обратной связи вместе с индикаторными цепями и усилителями образуют в новых схемах статические или компенсационные авторегуляторы напряжения и тока преобразователя, напряжения или тока возбуждения двигателя и другие. Отдельные цепи обратной связи в процессе управления не являются непрерывно действующими, а включаются и выключаются в определенных фазах процесса, посредством реле—электромагнитных контактных и нелинейных бесконтактных.

На каждой фазе процесса управления параметры всех звеньев замкнутых цепей остаются постоянными (пренебрегая насыщением и другими аналогичными нелинейностями) и управление осуществляется только изменением командного воздействия, играющего роль внешней силы, приложенной к замкнутой системе. В этом смысле процессы в системе можно рас-

сматривать как непрерывные, но только на каждой фазе управления, а не в целом.

Изменение командного воздействия практически осуществляется изменением параметров цепи командоаппарата, плавным или ступенчатым.

Роль контактных реле и контакторов является не принципиальной и ограничивается переключением цепей схемы при переходе с одной фазы управления на другую и регулированием командного воздействия.

Рассмотренные схемы вместе со «следящими» электроприводами, управляемыми аналогичным образом, но по углу, а не по скорости, относятся к одному классу систем. Эти системы называют «сервомеханизмами» (в американской литературе) и «следящими системами» и определяют как системы, регулируемые по замкнутому циклу и управляемые посредством разности количеств [Л. 10].

Метод управления указанными системами логично назвать «компенсационным методом автоматического управления», достаточно точно отражающим специфику объекта и получившим применение в измерительной технике и в технике регулирования [Л. 7].

**Статические характеристики.** Для пояснения принципиальных свойств новых схем управления рассмотрим статические характеристики преобразователя тока с обратной связью, представив его эквивалентным генератором постоянного тока [Л. 11].

В случае отрицательной обратной связи от напряжения или шунтовой обратной связи э. д. с. преобразователя будет (рис. 6):

$$E = K_y (U_k - U), \quad (1)$$

а напряжение на выходе

$$U = E - iR, \quad (2)$$

откуда

$$U = \frac{K_y U_k - iR}{1 + K_y} = E_0 - \frac{E_0}{1 + K_y} i. \quad (3)$$

Здесь  $U_k$ — „командное“ напряжение, подведенное к преобразователю извне;  $K_y$ — коэффициент усиления преобразователя без обратной связи, т. е. коэффициент пропорциональности между э. д. с. преобразователя и результирующим напряжением его возбуждения  $e$  на входе преобразователя или первого каскада его усилителя (рис. 6):

$$E = \frac{K_y}{1 + K_y} U_k; \quad (4)$$

и

$$I_k = \frac{K_y}{R} U_k; \quad (5)$$

$E_0$ — э. д. с. холостого хода и  $I_k$ — ток короткого замыкания преобразователя с обратной связью.

Легко видеть, что при неизменном  $K_y$  обратная связь уменьшает э. д. с. холостого хода в  $1 + K_y$  раз, не меняя тока короткого замыкания.

Согласно (3) напряжение преобразователя с отрицательной обратной связью является функцией командного напряжения  $U_k$ , тока нагрузки  $i$  и коэффициента усиления  $K_y$ . Величина коэффициента  $K_y$  зависит от режима сети, питающей преобразователь (частоты в случае синхронного двигателя-генератора, частоты и напряжения в случае асинхронного и напряжения в случае ионного мутатора).

Зависимость напряжения преобразователя от трех указанных факторов  $U_k$ ,  $K_y$  и  $i$  формально может быть выяснена из выражения полного дифференциала:

$$dU = \frac{\partial U}{\partial U_k} dU_k + \frac{\partial U}{\partial K_y} dK_y + \frac{\partial U}{\partial i} di \quad (6)$$

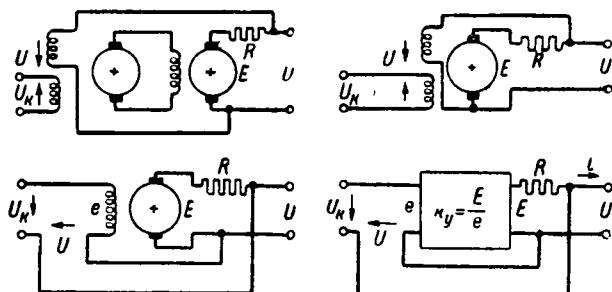


Рис. 6. Принципиальные схемы шунгэвой обратной связи.

или, учитывая (3),

$$dU = \frac{K_y}{1+K_y} dU_k + \frac{U_k + iR}{(1+K_y)^2} dK_y - \frac{R}{1+K_y} di, \quad (7)$$

откуда следует, что с увеличением  $K_y$  напряжение преобразователя стремится к пределу, равному командному напряжению:

$$\lim_{K_y \rightarrow \infty} U = U_k. \quad (8)$$

При конечных значениях коэффициента усиления  $K_y$  влияние его изменений уменьшается прямо пропорционально квадрату „коэффициента регулирования“  $\frac{1}{1+K_y}$ , а влияние тока нагрузки — прямо пропорционально первой степени коэффициента регулирования  $\frac{1}{1+K_y}$  (рис. 7).

Так как по указанным соображениям значения  $K_y$  бывают практически достаточно большими — порядка десятков и сотен, то  $K_y$  обычно считают постоянным, исключая этим влияние изменений режима сети, питающей все каскады усилители и преобразователя.

Физический смысл влияния  $K_y$  и  $i$  может быть показан (рис. 8), если рассматривать э. д. с. преобразователя  $E$  как разность двух составляющих командной

$$E_k = K_y U_k = E_0 (1 + K_y) \quad (9)$$

и составляющей обратной связи

$$E_r = K_y U = \frac{K_y}{1+K_y} (K_y U_k - iR). \quad (10)$$

При холостом ходе преобразователя

$$E_{r0} = \frac{K_y^2}{1+K_y} U_k = K_y F_0. \quad (11)$$

По отношению к э. д. с. преобразователя  $E_0 = E_k - E_{r0}$  влияние изменений  $K_y$  на командную составляющую  $E_k$  компенсируется изменением направленной ей навстречу составляющей обратной связи  $E_r$ .

Однако, эта компенсация не может быть полной, так как коэффициенты, определяющие зависимость обеих составляющих  $E_k$  и  $F_0$  от  $K_y$ , т. е.  $K_y$  и  $\frac{K_y^2}{1+K_y}$  равны только в пределе, при  $K_y \rightarrow \infty$ , причем относительная „недокомпенсация“ определяется выражением

$$\frac{dE_k - dE_{r0}}{dE_k} = \frac{1}{(1+K_y)}.$$

При нагрузке напряжение преобразователя уменьшается на величину  $Ri$ , а составляющая обратной связи на величину  $\frac{K_y}{1+K_y} Ri$  (рис. 8). Следовательно, э. д. с. преобразователя возрастает на ту же величину, компенсируя падение напряжения  $Ri$  в преобразователе. Эта компенсация также не может быть полной, так как приращение э. д. с. меньше падения напряжения  $Ri$  в отноше-

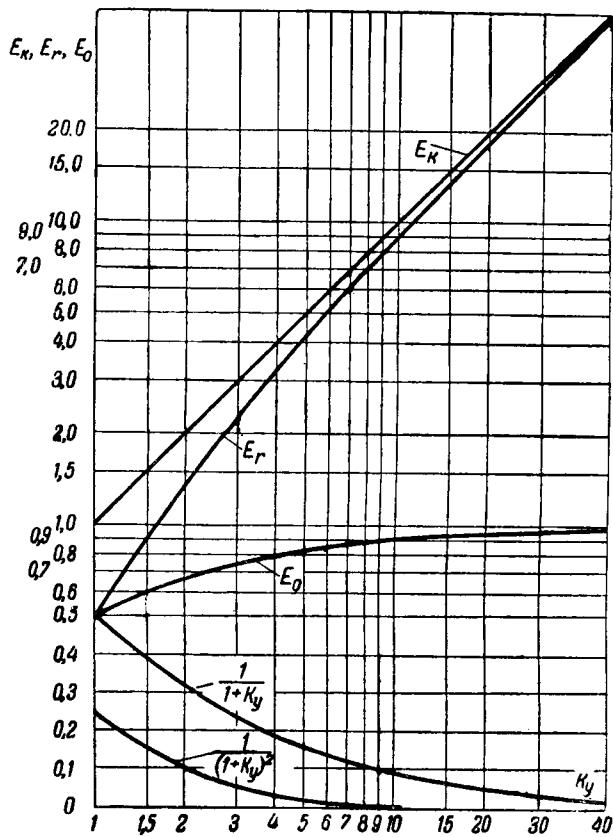
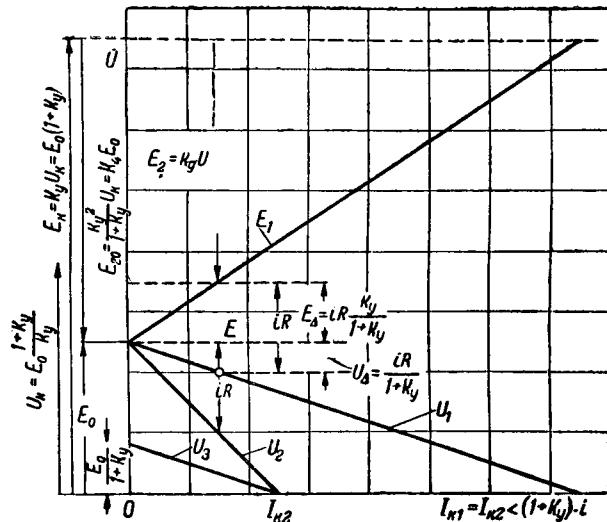


Рис. 7. Влияние коэффициента усиления на статические характеристики преобразователя с отрицательной обратной связью.

Кривые  $E = E_k$ ,  $E_r$  и  $E_0 = f(K_y)$  при  $U_k = 1$ , в логарифмических координатах; кривые  $\frac{1}{1+K_y}$  и  $\frac{1}{(1+K_y)^2}$  в полулогарифмических координатах.

Рис. 8. Характеристики преобразователя  $U$ ,  $E = f(i)$ . Кривые с индексами: 1 — с шунговой отрицательной обратной связью ( $K_y = 2$ ); 2 — без обратной связи при том же значении  $E_0$ , что и для кривой 1; 3 — с обратной связью при том же значении  $U_k$ , что и для 2 ( $K_y = 2$ ).

ни  $\frac{K_y}{1+K_y}$ , но относительная недокомпенсация равна коэффициенту регулирования

$$\frac{U_\Delta}{iR} = \frac{1}{1+K_y} \quad (12)$$

и может быть уменьшена за счет увеличения  $K_y$ .

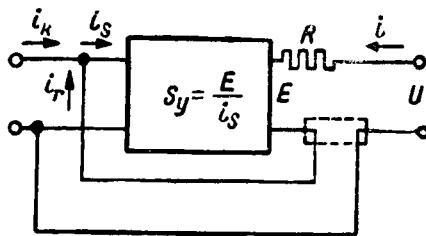


Рис. 9. Принципиальная схема серийной обратной связи.

Обратная связь от тока или серийная обратная связь (рис. 9) в новых схемах применяется—положительная для компаундирования характеристик и отрицательная—для ограничения тока.

Для преобразователя с положительной обратной связью

$$E = S_y (i_k + \alpha i), \quad (13)$$

$$U = S_y i_k - (R - \alpha S_y) i; \quad (14)$$

здесь  $\alpha$ —безразмерный коэффициент компаундирования, например отношение витков серийной и командной обмоток возбуждения.

При относительно небольших значениях коэффициента  $\alpha$  имеет место сбычное компаундирование ( $\alpha > 0$ ), или противокомпаундирование ( $\alpha < 0$ ), которое эквивалентно изменению омического сопротивления преобразователя.

В новых схемах применяется комбинация положительной серийной обратной связи с отрицательной шунтовой, для которой

$$E = K_y (U_k + \beta i - U) \quad (15)$$

и

$$U = \frac{K_y U_k + (K_y \beta - R) i}{1 + K_y}, \quad (16)$$

где

$$\beta = \alpha \frac{S_y}{K_y}. \quad (17)$$

Поступая аналогично предыдущему, можно показать, что с возрастанием  $K_y$  напряжение преобразователя стремится к пределу:

$$\lim_{K_y \rightarrow \infty} U = U_k + \beta i, \quad (18)$$

при котором уже не оказывается влияние на характеристику всех побочных факторов, в том числе и изменений сопротивления преобразователя. Такую характеристику можно назвать «пределной» или «идеальной».

Для преобразователя с отрицательной серийной обратной связью, полагая  $\alpha = -1$ , получим:

$$E = S_y (i_k - i), \quad (19)$$

откуда, учитывая (2), ток преобразователя будет:

$$i = \frac{S_y i_k - U}{S_y + R} = I_k - \frac{I_k}{E_0} U, \quad (20)$$

где

$$E_0 = S_y i_k, \quad \text{а} \quad I_k = \frac{S_y}{S_y + R} i_k.$$

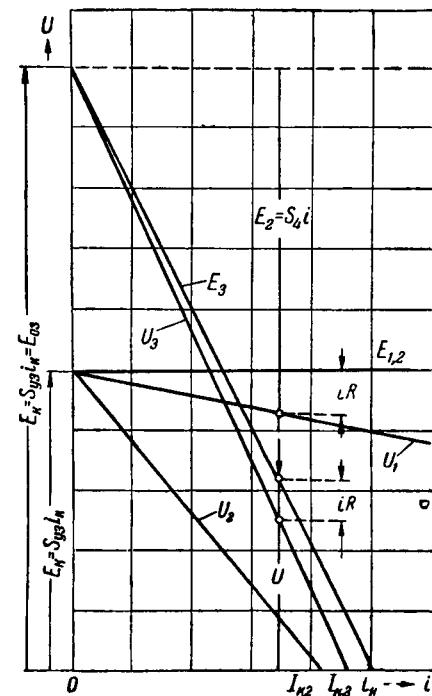
В данном случае, при неизменном  $S_y$  обратная связь уменьшает ток короткого замыкания в  $\frac{R}{S_y + R}$  раз, не меняя  $E_0$ .

Влияние на ток факторов  $S_y$ ,  $i_k$  и  $U$  выразится дифференциалом

$$di = \frac{\partial i}{\partial i_k} di_k + \frac{\partial i}{\partial S_y} dS_y + \frac{\partial i}{\partial U} dU$$

или

$$di = \frac{S_y}{S_y + R} di_k + \frac{U + R i_k}{(S_y + R)^2} dS_y - \frac{1}{(S_y + R)} dU, \quad (22)$$

Рис. 10. Характеристики преобразователя  $U = f(i)$ .

Кривые с индексами: 1—без обратной связи ( $S_y = 1$ ); 2—с серийной отрицательной обратной связью ( $S_y = 1$ ); 3—о же при  $S_y = 2$ .

откуда следует, что, в отличие от случая шунтовой отрицательной обратной связи, с увеличением коэффициента усиления  $S_y$  ток преобразователя стремится к пределу, равному командному току.

$$\lim_{S_y \rightarrow \infty} i = i_k = I_k. \quad (23)$$

Влияние же изменений коэффициента  $S_y$  и напряжения на клеммах нагрузки (11) уменьшается с увеличением  $S_y$  по тем же законам (рис. 7). Электродвижущую силу преобразователя можно в данном случае рассматривать как разность двух составляющих—командной, которая равна э. д. с. холостого хода (рис. 10),

$$E_k = S_y i_k = E_0, \quad (24)$$

и обратной связи, которая зависит от «нагрузки»—напряжения  $U$ :

$$E_r = S_y i = \frac{S_y}{S_y + R} (S_y i_k - U). \quad (25)$$

Компенсирующее действие последней аналогично случаю шунтовой отрицательной обратной связи. Здесь имеет также место аналогия и с трансформатором тока.

С увеличением коэффициента усиления в случае серийной обратной связи увеличивается напряжение холостого хода, а в случае шунтовой обратной связи—ток короткого замыкания, благодаря чему в первом случае уменьшается наклон характеристики  $i = f(U)$ , т. е. стабилизируется ток, а во втором наклон характеристики  $U = \varphi(i)$ ,—стабилизируется напряжение.

Серийная отрицательная обратная связь применяется во всех новых схемах для ограничения тока в комбинации с нелинейным индикатором (схема с твердым или электронным выпрямителями), который передает воздействия обратной связи  $h$  только при превышении током преобразователя предельного значения,

$$h = q (i - i_{lim}); \quad q = 0 \text{ при } i < i_{lim}. \quad (26)$$

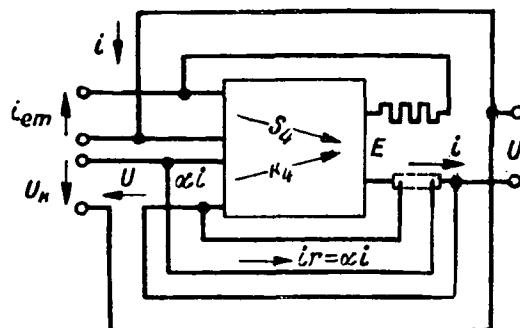


Рис. 11. Принципиальная схема преобразователя с комбинированной обратной связью.

Из уравнений (15) и (19) может быть получено уравнение внешней характеристики преобразователя с типичной комбинацией трех основных обратных связей (рис. 11):

$$U = \frac{[k_y \left( U_k + \gamma i_{lim} - \left( \gamma - \beta + \frac{R}{k_y} \right) i \right)]}{1 + K_y}, \quad (27)$$

где  $\gamma = \frac{S_y}{k_y}$ , причем  $\gamma = 0$  при  $i < i_{lim}$ ; или, при достаточно больших значениях  $K_y \rightarrow \infty$ , получим выражение «идеальной» характеристики:

$$U \approx U_k + \gamma i_{lim} - (\gamma - \beta) i. \quad (28)$$

Пока ток преобразователя не превышает предельного значения ( $i < i_{lim}$ ), действует авторегулятор напряжения и характеристика (рис. 12 и 2) выражается уравнением

$$U \approx U_k + \beta i. \quad (29)$$

Когда ток превысит предельное значение ( $i > i_{lim}$ ), цепь предельного тока подавит действие регулятора напряжения и характеристика определится уравнением

$$i = \frac{\gamma i_{lim} + U_k - U}{\frac{K_y}{1 + K_y}} \approx i_{lim} \frac{\gamma}{\gamma - \beta} + \frac{U_k - U}{\gamma - \beta}, \quad (30)$$

которое показывает, что ток тем меньше превышает предельное значение, чем больше разность коэффициентов  $\gamma$  — цепи предельного тока и  $\beta$  — цепи компаундирования (в случае преобразователя с электромагнитным возбуждением, коэффициенты  $\gamma$  и  $\beta$  выражают сопротивления соответствующих обмоток возбуждения).

**Заключение.** Современные схемы автоматического управления регулируемыми электроприводами постоянного тока по существу являются определенными комбинациями компенсационных или статических авторегуляторов, состоящих из усилителей, цепей отрицательной обратной связи и индикаторных цепей.

Операция управления скоростью двигателя заключается в произвольном изменении «командного» напряжения или тока на входе усилителя основного авторегулятора, определяющего скорость двигателя.

Ускорение двигателя при переходных режимах пуска, реверса и торможения управляет автоматически — посредством авторегулятора предельного тока, ограничивающего переходный ток заданной величиной.

Применение положительной и отрицательной обратных связей от тока двигателя представляет широкие возможности в получении искусственных статических характеристик.

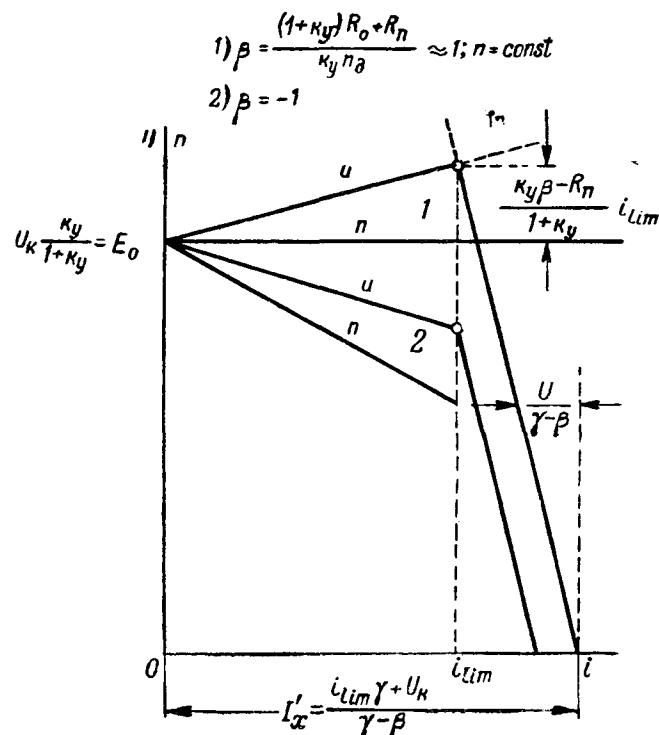


Рис. 12. Характеристики преобразователя с комбинированной обратной связью.

По типу усилителей схемы управления можно разделить на три вида — электромеханические, электромагнитные и электронные.

Отрицательная обратная связь благодаря своим компенсационным свойствам исключает влияние на статические характеристики режима сети, температуры, а в необходимых случаях нагрузки с точностью, зависящей от величины коэффициента усиления.

Метод управления регулируемыми электроприводами, обладающий вышеуказанными типичными признаками, может быть назван компенсационным методом автоматического управления.

#### Литература

1. U. Lamm, G. Lindahl. A Rolling Mill Installation Using Grid Controlled Rectifiers. ASEA Journal, № 8, 1937.
2. М. В. Меров, Е. Л. Эттингер. Электропривод реверсивного прокатного стана с амплидным управлением. Вестник электропромышленности, № 4, 1946.
3. А. Челюсткин. Схемы управления главными приводами реверсивных прокатных станов. Амер. техн. и пром., № 2, 9, 1944.
4. W. R. Naggs. Industrial Application of Rototrol Regulators. El. Eng., № 3, 1946.
5. E. E. Moger, H. L. Palmer. Thyatron Motor Control. El. Eng., № 11, 1943, № 5, 1944.
6. K. P. Puchlowski. Electronic Control of D. C. Motors. Transactions of the AIEE, 1943.
7. А. В. Михайлов. Теория устойчивости линейных цепей обратной связи. Журнал Технической физики, т. IX, вып. 1, 1939.
8. Ф. И. Бутаев и Е. Л. Эттингер. Регулируемый электропривод постоянного тока ВЭП, № 9, 1937.
9. А. А. Булгаков. Электронные авторегуляторы для управления электроприводами. Вестник инженеров и техников, № 3, 1946.
10. S. W. Hegewald. Considerations in Servomechanism Design. El. Eng., № 12, 1944.
11. А. А. Булгаков. Переходные режимы электроприводов с управляемыми выпрямителями. Бюллетень ВЭИ, № 3, 1941.



# Исследование динамики следящих электроприводов и систем авторегулирования методом частотных характеристик

Кандидат техн. наук В. В. СОЛОДОВНИКОВ

Институт автоматики и телемеханики Академии наук СССР

**Постановка задачи.** Исследование устойчивости следящих систем и систем авторегулирования обычно производится либо при помощи критерия устойчивости Рауса-Гурвица [Л. 1], либо критерия устойчивости Найквиста [Л. 2, 3].

Однако, системы авторегулирования и следящие системы предназначены для поддержания заданного режима при наличии возмущающих причин, стремящихся отклонить их от этого режима. Поэтому задача теории, после того как проверена устойчивость, заключается в том, чтобы охарактеризовать способность системы сопротивляться нарушениям заданного режима, между тем, как исследование устойчивости позволяет лишь определить способность системы возвращаться в исходное состояние. Таким образом, для полного суждения о динамических свойствах системы необходимо уметь анализировать переходные процессы, возникающие в ней под влиянием возмущающих воздействий.

Правда, известны попытки определять коэффициент затухания и частоту основного колебания, исходя из неравенств Гурвица [Л. 5] или из вида амплитудно-фазовых характеристик [Л. 6], построение которых необходимо для проверки устойчивости по Найквисту. Однако, эти приемы имеют ограниченную область применения и не могут быть использованы для полной характеристики динамических свойств системы при наличии возмущающих воздействий. Привлечение же обычных классических или даже операторных методов для решения этой задачи неудобно ввиду сложности и громоздкости требуемых ими вычислений, кроме того, использование этих методов, если не совсем, то во всяком случае в значительной мере умаляет целесообразность применения критериев устойчивости, поскольку задачей последних является исследование устойчивости без необходимости нахождения корней характеристического уравнения.

Показывается, что амплитудно-фазовые характеристики, построение которых необходимо для исследования устойчивости, могут быть использованы для полной характеристики переходных процессов в следящих системах и системах регулирования, вызываемых возмущением заданной формы, без необходимости вычисления корней характеристического уравнения. Применение метода иллюстрируется на примере построения картины переходного процесса в следящем электроприводе для стабилизации пушки танка.

Между тем при последующем исследовании системы согласно указанным методам определение этих корней необходимо.

В настоящей статье излагается метод, позволяющий не только судить о «качестве» рассматриваемой системы, с точ-

ки зрения ее сопротивляемости возмущающим воздействиям, характеризуемой максимальным отклонением, продолжительностью переходного процесса и его «колебательностью», но и определять картину переходного процесса при любых возмущающих воздействиях без необходимости вычисления не только произвольных постоянных, но и корней характеристического уравнения. Для применения метода необходимо лишь задание амплитудно-фазовой характеристики системы в разомкнутом состоянии, нахождение которой и так необходимо для исследования ее устойчивости.

Согласно предлагаемому методу исследование динамики следящих систем и систем регулирования распадается на три этапа: исследование устойчивости, исследование «качества» системы, построение картины переходного процесса.

**Амплитудно-фазовые и частотные характеристики системы.** Как известно [Л. 4], между оператором  $\Phi(p)$  системы регулирования в замкнутом состоянии и ее оператором  $W(p)$  в разомкнутом состоянии существует весьма простая зависимость:

$$\Phi(p) = \frac{\Phi_Q(p)}{1 - W(p)}, \quad (1)$$

где  $\Phi_Q(p)$  — оператор, характеризующий объект регулирования в случае отсутствия регулятора.

В том частном случае (особенно часто рассматриваемом в случае следящих систем), когда предполагается, что возмущающее воздействи-

исходит от задающего элемента регулятора, а внешнее возмущающее воздействие  $J(t)$  равно 0:

$$\Phi(p) = \frac{1}{1 - W(p)}. \quad (2)$$

Рассмотрим оператор системы в замкнутом состоянии  $\Phi(p)$ .

Заменяя в нем  $p$  через  $j\omega$ , где  $j = \sqrt{-1}$ , и отделяя вещественную часть  $P(\omega)$  от мнимой  $Q(\omega)$ , мы можем написать:

$$\Phi(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega). \quad (3)$$

Будем называть  $P(\omega)$  активной или вещественной частотной характеристикой, а  $Q(\omega)$  — реактивной или мнимой частотной характеристикой системы.

Мы можем также написать

$$\Phi(j\omega) = A(\omega) e^{-jB(\omega)}. \quad (4)$$

Функция  $A(\omega)$  называется амплитудной, а  $B(\omega)$  — фазовой характеристикой системы. Легко видеть<sup>1</sup>, что

$$\left. \begin{array}{l} P(\omega) = A(\omega) \cos[B(\omega)], \\ Q(\omega) = -A(\omega) \sin[B(\omega)]; \end{array} \right\} \quad (5)$$

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)},$$

$$B(\omega) = \operatorname{arctg} \left[ -\frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \right]. \quad (6)$$

Условимся обозначать частотные характеристики разомкнутых систем при помощи черты сверху соответствующей буквы.

Имеем:

$$W(j\omega) = \bar{P}(\omega) + j\bar{Q}(\omega) \quad (7)$$

или

$$W(j\omega) = \bar{A}(\omega) e^{-j\bar{B}(\omega)}. \quad (8)$$

Введем теперь определение амплитудно-фазовой характеристики, заметив предварительно, что  $W(j\omega)$ , как и всякую комплексную величину, можно рассматривать как вектор.

Амплитудно-фазовой характеристикой называется кривая, описываемая концом вектора  $W(j\omega)$  при изменении  $\omega$  от  $+\infty$  до  $-\infty$ .

Правила построения амплитудно-фазовой характеристики по заданным частотным характеристикам разомкнутой системы и обратно — построение частотных характеристик по заданной амплитудно-фазовой характеристике очевидны из формул (7) и (8).

Найдем теперь зависимость между частотными характеристиками системы в замкнутом и разомкнутом состояниях.

<sup>1</sup> Можно также показать, что в случае наиболее широко встречаемых на практике динамических систем задание функции  $P(\omega)$  однозначно определяет собой задание функций  $Q(\omega)$  и обратно. То же можно сказать и в отношении функций  $A(\omega)$  и  $B(\omega)$ .

**А. Случай, когда возмущающее воздействие исходит от задающего элемента.** Заменяя в (2)  $p$  через  $j\omega$  и отделяя вещественную часть от мнимой, получим:

$$P(\omega) = \frac{1 - P(\omega)}{[1 - P(\omega)]^2 + Q^2(\omega)}, \quad (9)$$

$$Q(\omega) = \frac{\bar{Q}(\omega)}{[1 - \bar{P}(\omega)]^2 + \bar{Q}^2(\omega)}. \quad (10)$$

Амплитудную и фазовую частотные характеристики следящей системы в замкнутом состоянии проще всего найти графически, если определить, соответственно, отношение векторов  $\vec{ON}$  и  $\vec{MN}$  (т. е.  $\frac{\vec{ON}}{\vec{MN}}$ ) (см. рис. 1) и, выраженный в радианах, угол  $ONM$  между теми же векторами для ряда точек, амплитудно-фазовой характеристики. При другом способе нахождения тех же характеристик можно исходить не из самой амплитудно-фазовой характеристики  $W(j\omega)$ , а из кривой, описываемой концом вектора:

$$\xi(j\omega) = 1 - W(j\omega). \quad (11)$$

Для построения кривой  $\xi(j\omega)$  необходимо лишь (рис. 1) построить зеркальное отображение амплитудно-фазовой характеристики  $W(j\omega)$  относительно вертикальной прямой, проходящей через точку  $\omega = \infty$ , и затем расположить начало координат влево от точки  $\omega = \infty$  на расстоянии, равном расстоянию между точкой, соответствующей  $\omega = \infty$ , и точкой 1,  $j0$ .

Пусть для найденной таким образом кривой

$$\xi(j\omega) = A_\xi(\omega) e^{jB_\xi(\omega)} \quad (12)$$

и пусть

$$\vartheta(j\omega) = A(\omega) e^{-jB(\omega)}. \quad (13)$$

Согласно (2) и (11)

$$\Phi(j\omega) = \frac{1}{\xi(j\omega)}, \quad (14)$$

поэтому

$$\vartheta(j\omega) = \frac{1}{A_\xi(\omega)} e^{-jB_\xi(\omega)}. \quad (15)$$

Сравнивая (15) с (13), мы видим, что

$$A(\omega) = \frac{1}{A_\xi(\omega)}, \quad (16)$$

$$B(\omega) = B_\xi(\omega). \quad (17)$$

Формулы (16) и (17) дают простое правило определения частотных характеристик замкнутой следящей системы по частотным характеристикам, соответствующим вспомогательной, функции  $\xi(j\omega)$ .

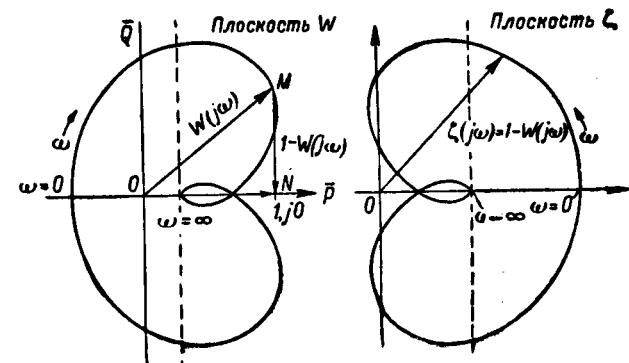


Рис. 1.

**В. Общий случай.** Заменяя в (1)  $p$  через  $j\omega$ , полагая

$$\Phi_Q(j\omega) = P_Q(\omega) + jQ_Q(\omega) \quad (18)$$

и отделяя вещественную часть от мнимой, получим:

$$P(\omega) = \frac{P_Q(1 - \bar{P}) - Q_Q\bar{Q}}{(1 - \bar{P})^2 + \bar{Q}^2}, \quad (19)$$

$$Q(\omega) = \frac{P_Q\bar{Q} + Q_Q(1 - \bar{P})}{(1 - \bar{P})^2 + \bar{Q}^2}. \quad (20)$$

Для нахождения амплитудной и фазовой частотных характеристик системы регулирования в замкнутом состоянии следует предварительно найти из амплитудно-фазовой характеристики  $W(j\omega)$  амплитудную и фазовую характеристику вспомогательной функции  $\xi(j\omega)$  так же, как это мы делали выше.

Пусть нами найдено, что

$$\xi(j\omega) = 1 - W(j\omega) = A_\xi(\omega) e^{-jB_\xi(\omega)}. \quad (21)$$

Кроме того, предположим, что частотные характеристики объекта регулирования (без регулятора), которому соответствует оператор  $\Phi_Q(p)$ , нам заданы:

$$\Phi_Q(j\omega) = A_Q(\omega) e^{-jB_Q(\omega)} \quad (22)$$

и функции  $A_Q(\omega)$  и  $B_Q(\omega)$  также заданы графически или аналитически. Согласно (1) и (2):

$$\Phi(j\omega) = \frac{\Phi_Q(j\omega)}{\xi(j\omega)}. \quad (23)$$

Положим к тому же, что [см. (4)]

$$\Phi(j\omega) = A(\omega) e^{-jB(\omega)}, \quad (24)$$

тогда получим, учитывая (21) и (22), следующие выражения для амплитудной и фазовой частотных характеристик системы регулирования в замкнутом состоянии:

$$A(\omega) = \frac{A_Q(\omega)}{A_\xi(\omega)}, \quad (25)$$

$$B(\omega) = B_Q(\omega) + B_\xi(\omega). \quad (26)$$

**Исследование «качества» следящих систем и систем регулирования по виду их частотных характеристик в замкнутом состоянии.** В этом разделе мы рассмотрим, каким образом, зная частотные характеристики, можно судить о динамических свойствах системы, а также о картине протекающего в ней переходного процесса, вызванного заданным возмущающим воздействием.

Теория этого вопроса [Л. 7] основана на соотношениях (вытекающих из применения к исследованию переходных процессов интеграла Фурье):

$$\delta(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{P(\omega)}{\omega} \sin t\omega d\omega. \quad (27)$$

$$\delta(t) = P(0) + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{Q(\omega)}{\omega} \cos t\omega d\omega, \quad (28)$$

которые показывают, что при некоторых ограничениях переходный процесс  $\delta(t)$  однозначно определяется заданием активной частотной характеристики  $P(\omega)$  системы и с точностью до постоянной определяется заданием ее реактивной частотной характеристики  $Q(\omega)$ .

Однако, вычисление интегралов (27), (28) на практике оказывается связанным с значительными трудностями. Поэтому возникает вопрос, нельзя ли судить о характере переходного процесса, протекающего в системе, непосредственно по виду частотных характеристик системы, не вычисляя интегралов (27), (28).

В специальной работе [Л. 8], посвященной этому вопросу, нами было показано, каким образом по виду частотной характеристики  $P(\omega)$  можно судить о свойствах следящих систем и систем регулирования с точки зрения условий статического и максимального отклонений, условий продолжительности и допустимого числа колебаний. Отсылаем читателей, более глубоко интересующихся этим вопросом, к упомянутой выше работе. Ограничимся здесь лишь следующими двумя замечаниями:

1. Динамические системы являются тем более высококачественными с точки зрения перечисленных выше условий, чем более пологи их частотные характеристики и чем меньше экстремумы частотных характеристик по абсолютной величине. Это положение можно пояснить при помощи кривых, приведенных на рис. 2, согласно которому частотная характеристика  $P_3(\omega)$  должна соответствовать наиболее высококачественной, а характеристика  $P_2(\omega)$  наименее высококачественной системе. Это подтверждает рис. 3, на котором изображены переходные процессы  $\delta(t)$ , соответствующие частотным характеристикам на рис. 2.

2. Очень важной областью применения метода частотных характеристик является его использование для решения таких задач, как получение приближенной картины переходного процесса, вызываемого возмущающим воздействием в какой-либо сложной системе путем введения вспомогательной частотной характеристики, приближенно совпадающей с частотной характеристикой рассматриваемой системы в существенной области частот.

**Представление переходного процесса в виде интеграла или суммы парных отражений.** Системы с малыми амплитудными и фазовыми искажениями. Перейдем теперь к рассмотрению третьего из указанных нами этапов, которые необходимы для полного исследования динамики следящих систем и систем регулирования, а именно — к построению картины переходного процесса.

Рассматриваемый ниже метод приближенного определения картины переходного процесса по виду частотных характеристик, так же как и критерий устойчивости Найквиста, основан на понятиях и представлениях нашедших себе впервые применение в теории ламповых усилителей. Его основы были даны Кюпфмюллером. Однако, в том виде, в котором метод был изложен Кюпфмюллером и Гиллемином [Л. 9, 10], он применим лишь к исследованию так называемых систем с малыми амплитудными и фазовыми искажениями. В той форме, в которой метод излагается ниже [Л. 11, 12], он свободен от этого ограничения и применим для исследования пере-

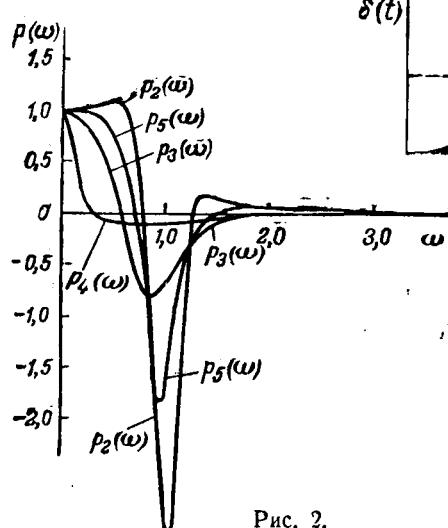


Рис. 2.

ходных процессов в любых линейных динамических системах. Однако, его применение особенно просто и удобно, во-первых, когда не нужно знать переходный процесс во всех его деталях (в особенности при малых значениях времени  $t$ ) и, во-вторых, когда переходный процесс сравнительно быстро затухает. Из сказанного очевидно, что метод с особенным успехом может быть применен в случае следящих систем и систем регулирования.

В его основе положена та предпосылка, что переходный процесс  $\delta(t)$ , возникающий в системе под действием произвольного возмущения  $f(t)$ , может быть представлен в виде суммы или интеграла от процессов, имеющих такую же форму, как и возмущение  $f(t)$ , но сдвинутых относительно него на различные промежутки времени. Мы в дальнейшем будем называть эти составные процессы, на которые может быть разложен переходный процесс  $\delta(t)$ , „отражениями“ возмущения  $f(t)$ . Другими словами, „отражением“ функции  $f(t)$  мы будем называть всякую функцию  $f_k(t)$ , удовлетворяющую равенству

$$f_k(t) = A_k f(t - \tau_k), \quad (29)$$

где величины  $A_k$  и  $\tau_k$  могут быть любыми вещественными положительными или отрицательными числами. Следует заметить, что отражения всегда являются парными, т. е. если имеется отражение с положительным  $\tau_k$ , то ему всегда сопутствует отражение и с отрицательным  $\tau_k$  (амплитуда  $A_k$  обоих отражений может иметь либо один и тот же, либо различные знаки).

Итак, можно доказать, что [Л. 13]

$$\delta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) f(t - \tau) d\tau, \quad (30)$$

т. е. что переходный процесс  $\delta(t)$  может быть представлен в виде интеграла или суммы парных отражений.

Функция  $g(\tau)$ , определяющая величину амплитуд парных отражений в функции от времени запаздывания или опережения  $\tau$  (определен-

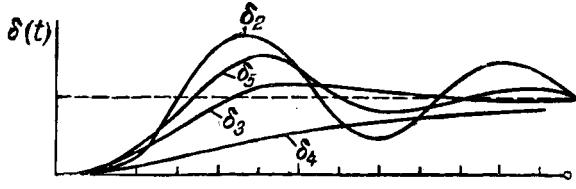


Рис. 3.

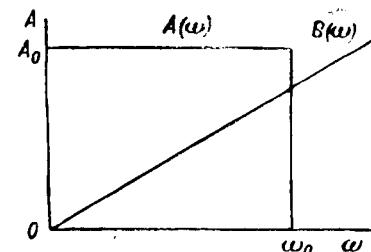


Рис. 4.

ляющих сдвиг отражений относительно возмущения), может быть названа „спектром парных отражений“.

Интеграл (30) можно найти в известных работах Кюпфмюллера [Л. 9] и Карсона [Л. 13]. Однако, ими дан простой способ его вычисления только для случая так называемых систем типа идеального фильтра с малыми амплитудными и фазовыми искажениями (рис. 4), амплитудные характеристики которых представляют собой кривые (рис. 4), приближенно удовлетворяющие условиям

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= A_0 = \text{const} \quad (0 < \omega < \omega_0), \\ A(\omega) &= 0 \quad (\omega > \omega_0), \\ (-\infty < \omega < 0), \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

а фазовые характеристики мало отличаются от прямых, проходящих через начало координат:

$$\left. \begin{aligned} B'(\omega) &= t_0 \cdot \omega \quad \text{при } 0 < \omega < \omega_0, \\ B(\omega) &= 0 \quad \text{при } -\infty < \omega < 0, \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

(при  $\omega > \omega_0$   $B(\omega)$  может иметь произвольную форму).

**Применение метода парных отражений к системам без фазовых искажений.** Покажем сначала, каким образом интеграл (30) может быть вычислен для систем без фазовых искажений, но с любыми по форме амплитудными характеристиками.

Для этого заменим прежде всего амплитудную характеристику  $A(\omega)$  системы периодической функцией частоты  $\tilde{A}(\omega)$ , совпадающей с ней в существенной для нее области частот. Очевидно, что, заменяя непериодическую функцию частоты  $A(\omega)$  периодической функцией  $\tilde{A}(\omega)$ , мы тем самым вводим погрешность в вычисление переходного процесса. Однако, эта погрешность будет тем меньше, чем больше период функции  $\tilde{A}(\omega)$  [Л. 8].

Разложим теперь функцию  $\tilde{A}(\omega)$  в ряд Фурье. Так как функция  $A(\omega)$ , а следовательно и  $\tilde{A}(\omega)$ , представляет собой четную функцию от частоты  $\omega$ , то ее разложение в ряд Фурье будет иметь вид:

$$\tilde{A}(\omega) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n t_a \omega = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n e^{j n t_a \omega}. \quad (33)$$

<sup>2</sup> Следует отметить то весьма интересное обстоятельство, что „спектр парных отражений“  $g(\tau)$  представляет собой не что иное, как импульсную проводимость системы, иначе говоря, переходный процесс, вызываемый в ней единичным мгновенным импульсом.

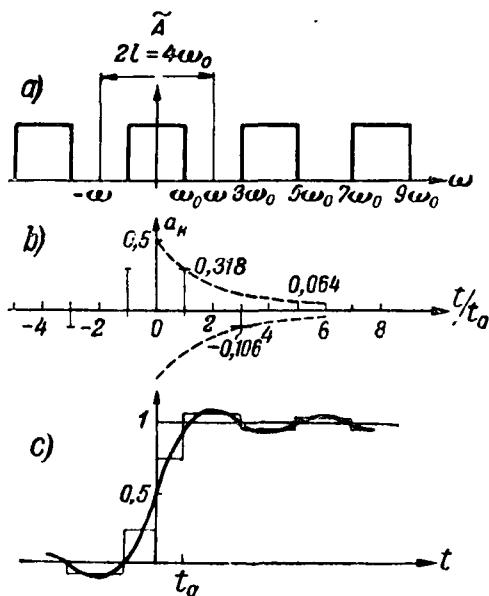


Рис. 5.

Подставляя (33) в интеграл (30) и производя некоторые преобразования, мы получим:

$$\delta(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n f(t - t_0 + nt_a), \quad (34)$$

где

$$a_{-n} = a_n.$$

Формула (34) показывает, что переходный процесс в системе без фазовых искажений может быть представлен в виде основного отражения и бесконечной суммы парных отражений, имеющих такую же форму, как и возмущение. Основное отражение имеет амплитуду, равную  $\frac{a_0}{2}$ , и отстает от возмущения на время  $t_a$ . Основное отражение сопровождается парными отражениями. Первая пара состоит из двух отражений, каждое из которых имеет амплитуду  $\frac{a_1}{2}$ , причем одно отстает, а другое опережает основное отражение на время  $t_a$ . Следующая пара отражений с амплитудой  $\frac{a_2}{2}$  смешена на время  $\pm 2t_a$  относительно основного отражения и т. д.

Поясним приведенные выше рассуждения на простом примере системы типа фильтра низкой частоты. В этом случае амплитудная характеристика  $A(\omega)$  заменяется периодической функцией  $\tilde{A}(\omega)$  с периодом  $2l$  (рис. 5). Ряд Фурье для нее имеет вид:

$$\tilde{A}(\omega) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{\pi n l}{\omega},$$

где

$$a_n = \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi n \omega_0}{e} \quad (35)$$

Полагая  $a_0 = 1$ ,  $l = 2 \omega_0$ , получим:

$$\tilde{A}(\omega) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left( \cos \frac{\pi \omega}{e} - \frac{1}{3} \cos \frac{3 \pi \omega}{e} + \dots \right).$$

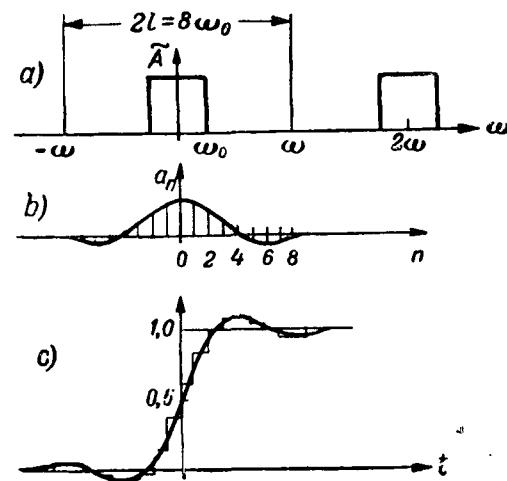


Рис. 6.

Таким образом, в данном случае спектр парных отражений определяется (б) рис. 5) следующим образом:

$$a_0 = 1.0; a_n = \pm \frac{1}{n\pi}. \quad (36)$$

Найдем теперь приближенную картину переходного процесса, вызываемого в рассматриваемой системе единичным возмущением, предположив, что тангенс угла наклона фазовой характеристики  $\operatorname{tg} \alpha = t_0 = 0$ . Произведя построение парных отражений изложенным выше образом, получим ступенчатую кривую, изображенную на рис. 5, с. На этом же рисунке приведен график кривой, соответствующий точному решению для случая системы типа фильтра низкой частоты. Уравнение этой кривой:

$$\delta(t) = \frac{1}{2} + \operatorname{Si}(\omega_0 t). \quad (37)$$

Мы видим, что ступенчатая кривая дает вполне достаточное для наших целей представление о ходе переходного процесса.

Если желательно получить большую точность в построении картины переходного процесса, то следует увеличить период функции  $\tilde{A}(\omega)$ . Положив  $l = 4 \omega_0$ , получим следующее выражение для спектра парных отражений:

$$a_0 = 0.5; a_n = \frac{1}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{4}. \quad (38)$$

Спектр парных отражений для этого случая и картина переходного процесса изображены на рис. 6. Как видно, точность построения значительно увеличилась.

**Метод парных отражений для общего случая.** Переходим теперь к применению метода в общем случае, когда не только амплитудная, но и фазовая характеристика системы представляют собой кривую произвольной формы.

Заменив (так же, как это мы делали выше для одной амплитудной характеристики) амплитудную  $A(\omega)$  и фазовую  $B(\omega)$  характеристики периодическими функциями частоты  $\tilde{A}(\omega)$ ,  $\tilde{B}(\omega)$  и разложим последние в ряды Фурье:

$$\tilde{A}(\omega) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nt_a \omega = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n e^{jn t_a \omega}, \quad (39)$$

$$\tilde{B}(\omega) = t_0 \omega - \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin mt_b \omega. \quad (40)$$

Математический анализ [Л.11] показывает, что в рассматриваемом нами общем случае комплексная проводимость  $\Phi(j\omega)$  системы может быть представлена в виде бесконечного произведения

$$\Phi(j\omega) = \Phi_0(j\omega) \Phi_1(j\omega) \Phi_2(j\omega) \dots, \quad (41)$$

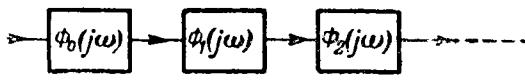


Рис. 7.

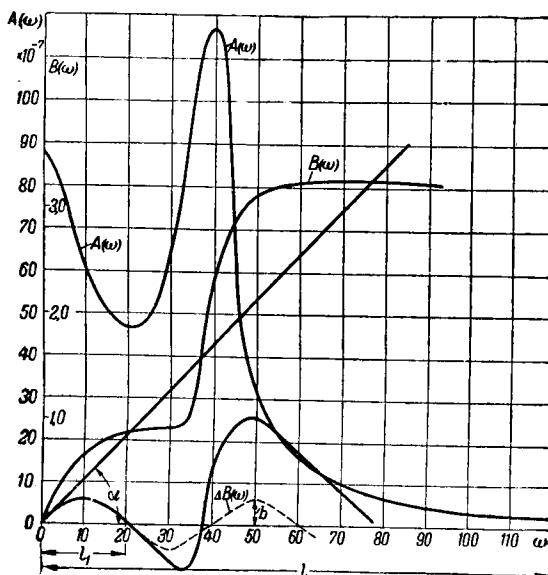


Рис. 8.

причем

$$\Phi_0(j\omega) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n e^{j(n t_a - t_0) \omega} \quad (42)$$

и

$$\Phi_m(j\omega) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(b_m) e^{j k m t_b \omega}, \quad (43)$$

где через  $J_k(b_m)$  обозначена функция Бесселя. Физически это означает (рис. 7), что система может рассматриваться как состоящая из ряда последовательно соединенных звеньев с комплексными проводимостями  $\Phi_0(j\omega)$ ,  $\Phi_1(j\omega)$ ,  $\Phi_2(j\omega)$  и т. д.

Пройдя через первое звено, комплексная проводимость  $\Phi_0(j\omega)$  которого учитывает эффект только амплитудных искажений, возмущающее воздействие превратится в  $\delta_0(t)$  [функция  $\delta_0(t)$  может быть определена способом, изложенным в предыдущем параграфе, и определяется выражением (34)]. Таким образом, роль возмущающего воздействия для второго звена с комплексной проводимостью  $\Phi_1(j\omega)$ , учитывющей эффект основной гармоники фазовой частотной характеристики, будет играть функция  $\delta_1(t)$ . Выражение для переходного процесса, возникающего при этом на выходе второго звена, будет иметь вид:

$$\delta_1(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(b_1) \delta_0(t + k t_b). \quad (44)$$

Выражение (44) показывает, что переходный процесс на выходе второго звена, так же как и в случае первого звена, представляет собой сумму составляющих такой же формы, как и возмущение, но возмущением для второго звена служит уже не  $f(t)$ , а  $\delta_0(t)$ . Таким образом, выход второго звена представляет собой бесконечную сумму парных отражений функций  $\delta_0(t)$ , сдвинутых друг относительно друга на промежутки времени целые, кратные  $t_b$  и имеющих амплитуды, определяемые выражением  $J_k(b)$ .

Точно так же на выходе третьего звена

$$\delta_2(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(b_2) \delta_1(t + 2k t_b) \quad (45)$$

и на выходе  $s+1$ -го звена

$$\delta_s(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} J_k(b_s) \delta_{s-1}(t + sk t_b). \quad (46)$$

Так как наша задача заключается в приближенном определении переходного процесса, то место бесконечного числа звеньев, мы можем ограничиться конечным и притом весьма небольшим числом звеньев (обычно от 2 до 4).

Поясним теперь, каким образом метод парных отражений может быть применен к вычислению переходных процессов на конкретном примере.

Применение метода парных отражений к исследованию переходного процесса в следящем электроприводе для стабилизации пушки танка. В журнале Electrical Engineering за 1944 г. опубликована статья Наппа и Липп (Л. 14), в которой описывается принцип действия и теория следящего электропривода, позволяющего стабилизировать направление канала ствола пушки танка с точностью до  $\pm 1/20$  градуса при возмущающих моментах до  $\pm 15$  кгм.

Дифференциальное уравнение переходного процесса, возникающего при наличии возмущающего воздействия  $f(t)$  имеет вид:

$$-I p^2 \delta = f(t) + S \delta + \frac{rp \delta}{\left(1 + \sqrt{\frac{J}{s_p}}\right)^2}, \quad (47)$$

где  $J$ —момент инерции пушки;  $S$ —статизм следящего привода;  $r$ —коэффициент демпфирования;  $s_p$ —упругость пружины  $J_p$ .

Уравнение (47), если положить, что  $f(t)$  представляет собой единичную функцию Хевисайда [1], может быть приведено к виду

$$(p^4 + c_3 p^3 + c_2 p^2 + c_1 p + c_0) \delta = (d_2 p^2 + d_1 p + d_0) [1] \quad (48)$$

или, подставляя приведенные в статье числовые значения величин,

$$(p^4 + 103 p^3 + 3065 p^2 + 149250 p + 1081500) \delta = \\ = (0,0035 p^2 + 0,37 p + 9,5) [1]. \quad (49)$$

Вычислим переходный процесс, описываемый уравнением (49), не находя корней его характеристического уравнения. Для этого, следуя изложенному выше методу, найдем прежде всего выражения для амплитудной и фазовой частотных характеристик.

Комплексная проводимость системы  $\Phi(j\omega)$  имеет вид

$$\Phi(j\omega) = \frac{d_0 - d_2 \omega^2 + j d_1 \omega}{(c_0 - c_2 \omega^3 + \omega^4) + j(c_1 \omega - c_3 \omega^3)} = \frac{a + j b}{c + j d}, \quad (50)$$

$$\text{где } a = d_0 - d_2 \omega^2, b = d_1 \omega, c = c_0 - c_2 \omega^2 + \omega^4, \\ d = c_1 \omega - c_3 \omega^3. \quad (51)$$

Отделяя в (50) вещественную часть  $P(\omega)$  от мнимой  $Q(\omega)$ , получим:

$$P(\omega) = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2}, \quad Q(\omega) = \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}, \quad (52)$$

откуда, принимая во внимание (6), будем иметь:

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{c^2 + d^2}, \quad B(\omega) = \arctg \left( \frac{ad - bc}{ac + bd} \right). \quad (53)$$

Амплитудная и фазовая частотные характеристики, определяемые (53), приведены на рис. 8. Между прочим уже из одного вида амплитудной характеристики ясно, что переходный процесс содержит явно выраженное колебание с угловой частотой порядка 40.

Заменим амплитудную характеристику  $A(\omega)$  периодической функцией частоты  $\tilde{A}(\omega)$  с периодом  $2\pi/240$ . Выбрав число членов  $n$  ряда Фурье (39) равным 24, получим спектр парных отражений, изображенный на рис. 9, причем

$$t_a = \frac{\pi}{l} = 26 \cdot 10^{-3}.$$

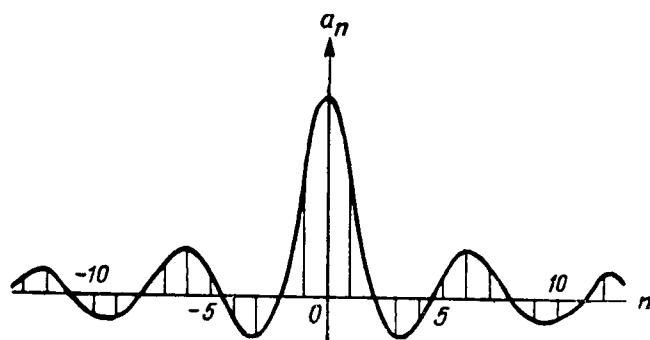


Рис. 9.

Фазовую характеристику в первом приближении заменим прямой линией (рис. 8) с тангенсом угла наклона, равным  $t_0 = \operatorname{tg} \alpha = 0,043$ .

Теперь можно построить картину переходного процесса  $\delta_0(t)$ , учитываящего эффект амплитудной характеристики и угол наклона фазовой характеристики (рис. 10).

Для того, чтобы учесть эффект фазовых искажений, т. е. отклонений фазовой характеристики от прямой линии, построим кривую, ординаты которой представляют собой разность между ординатами фазовой характеристики и ординатами прямой линии, которой она была заменена в первом приближении [кривая  $\Delta\delta(\omega)$ , рис. 8]. Так как наша задача заключается в нахождении приближенной, а не точной картины переходного процесса, то вместо того, чтобы разлагать получавшуюся кривую в ряд Фурье, заменим ее одной единственной синусоидой, т. е. положим, что

$$B(\omega) = t_0 \omega - b \sin t_b \omega, \quad (54)$$

где

$$b = 0,21$$

и

$$t_b = \frac{\pi}{l_1} = \frac{3,14}{20} = 157 \cdot 10^{-3}$$

Имеем:

$$e^{jb \sin t_b \omega} = 1 + J_1(b) e^{j t_b \omega} + J_2(b) e^{j 2 t_b \omega} + \dots \quad (55)$$

Ограничимся в (55) только первыми двумя членами разложения.

Таким образом, мы заменили нашу систему двумя звенями, причем на выходе первого звена получается переходный процесс  $\delta_0(t)$ , а выход второго звена слагается из  $\delta_0(t)$  и первой пары отражений функции  $\delta_0(t)$  (кривая  $a$ , рис. 10) с ординатами, определяемыми величиной  $J_1(b)$ .

Результатирующая кривая обозначена на рис. 10 через  $\delta_1(t)$ . Кривая  $\delta_1(t)$  на рис. 10 представляет собой график точного решения уравнения (49), полученный в результате решения характеристического уравнения (т. е. нахождения корней) и применения формулы разложения Хевисайда.

Мы видим, что даже несмотря на примененную нами довольно грубую аппроксимацию фазовой характеристики, метод парных отражений все же дал возможность получить картину процесса, вполне удовлетворительно совпадающую с действительной, и позволил уловить его характерную особенность, заключающуюся в наложении на экспоненциальную кривую колебания с периодом порядка  $\frac{2\pi}{40}$

**Выводы:** В статье показано, что амплитудно-фазовые характеристики следящих систем и систем регулирования могут быть использованы не только для исследования устойчивости, но и для характеристики динамических свойств рассматриваемой системы с точки зрения условий качества регулирования, а также для построения картины переходного процесса, вызван-

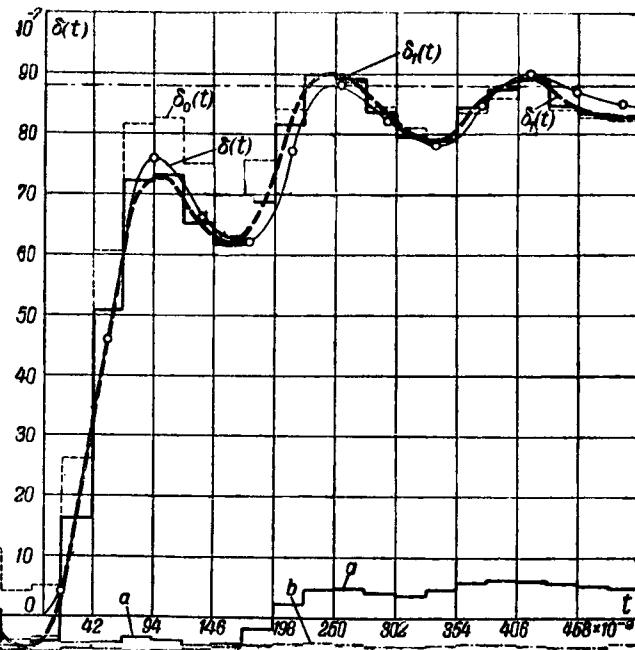


Рис. 10.

ного возмущением заданной формы, без необходимости вычисления корней характеристического уравнения.

Изложенный метод может значительно облегчить исследование динамики сложных следящих систем и систем регулирования, которым соответствуют характеристические уравнения высокого порядка или даже трансцендентные характеристические уравнения.

Существенное преимущество метода заключается также в том, что он применим в тех случаях, когда неизвестны даже дифференциальные уравнения системы, а заданы лишь ее частотные характеристики, которые часто могут быть получены экспериментально.

Приведенный пример построения картины переходного процесса в электроприводе для стабилизации пушки танка указывает на сравнительную простоту вычислений, требуемых для применения метода, которая делается тем более очевидной, чем сложнее рассматриваемая система.

#### Литература

1. M. Tolle. Regelung der Kraftmaschinen. J. Springer, 1921.
2. H. Nyquist. BSTJ, стр. 126—47, Jan. 1932.
3. А. В. Михайлов. Автоматика и телемеханика, № 3, стр. 27—81, 1938.
4. В. В. Соловьевников. Автоматика и телемеханика, № 1, стр. 43—68, 1946.
5. Я. З. Цыпкин и П. В. Бромберг. Труды НИСО, № 9, 1946.
6. Е. Н. Ludwig. Arch. f. El., № 5, 1940.
7. W. Bush. Operational circuit analysis, John Wiley, 1929.
8. В. В. Соловьевников. Известия ОНТ АН СССР, 12, стр. 1179—1202, 1945.
9. K. Käpfmüller. ENT, 1, стр. 18—32, 1928.
10. E. A. Guillemin. Communication networks, v. II. John Wiley, 1935.
11. H. Wheeler. Proc. IRE, 6, стр. 359—85, 1939.
12. F. Strecker. ENT, № 5, стр. 93, 1940.
13. Дж. Р. Карсон. Электрические нестационарные явления и операционное исчисление, ДНТУ, 1934.
14. Наппа, С. Р. Лупп. Electrical Engineering, № 10, стр. 355—360, 1914.

△ △ △'

# Ионный электропривод типа таймоторол и мототрол

Кандидат техн. наук Ю. А. САБИНИН

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

Развитие автоматизированного регулируемого электропривода за последнее десятилетие в основном идет по пути использования принципов непрерывного управления и регулирования двигателей. Такое направление обусловлено большими преимуществами приводов с непрерывным управлением по сравнению с нормальными автоматизированными приводами с контактно-релейной аппаратурой в отношении быстроты протекания переходных процессов, их точности, плавности, лучшего использования двигателя и т. д.

Одним из типов электропривода с непрерывным управлением является ионный электропривод постоянного тока, представляющий собой сочетание двигателя постоянного тока и ионного управляемого аппарата. В отличие от обычных установок с управляемыми выпрямителями в ионном электроприводе постоянного тока ионный управляемый аппарат служит не только для целей выпрямления, но и для управления двигателем и регулирования его скорости, т. е. электродвигатель и ионный аппарат представляют собой как бы единое целое. Автоматизация ионного привода достигается с помощью сеточного управления. Ионный электропривод может применяться в тех же случаях, что и нормальные электроприводы постоянного тока, в первую очередь привод системы Леонарда. Однако, по сравнению с последним ионный привод вследствие гибкости и безинерционности сеточного управления обладает несомненными преимуществами в отношении характера протекания переходных процессов.

Установки с ионным электроприводом появились в 1929 г. непосредственно после публикования работ Хэлла по сеточному регулированию и создания первых экземпляров тиатронов. В течение первых же пяти лет ионный привод проник почти во все отрасли промышленности. Однако, развитие ионного привода вскоре резко замедлилось и он не нашел тогда широкого применения. Установки с ионным приводом, особенно в области больших мощностей как в Европе, так и в Америке к началу второй мировой войны

в области автоматизированного электропривода, непрерывного управления и регулирования все более прочное положение начинает занимать ионный привод малой мощности, в котором ионный аппарат осуществляет одновременно функции выпрямления тока, управления двигателем и регулирования его скорости, образуя с двигателем как бы единый электромеханизм. В статье дано детальное описание силовой части, электроники и вспомогательной аппаратуры ионных приводов типа «таймоторол» и «мототрол».

были лишь единичными. Причина этого кроется в основном недостатке регулируемого привода — резком снижении коэффициента мощности при регулировании скорости в сторону малых скоростей.

В последние годы в США развитие ионного линии малых мощностей. В этом случае низкое значение  $\cos \phi$  не является особенно существенным; положительные же свойства ионного привода (в отношении его поведения в переходных процессах, плавности регулирования, возможности получения специальных характеристик) имеют первостепенное значение. К тому же система Леонарда при малых мощностях тоже имеет весьма невысокие энергетические показатели. Поэтому в области малых мощностей ионный привод оказался конкурентоспособным с новейшими типами электроприводов с машинами-усилителями, как-то: амплидин, рототрол, регулекс и др.

Предельное экономическое значение мощности для ионного привода определяется многими факторами: диапазоном регулирования скорости, относительной длительностью работы на низких скоростях, характером зависимости статического момента механизма от скорости и т. п. По американским данным его нормальным верхним пределом следует считать мощность порядка 5—10 kW. При больших мощностях ионный привод обычно уже неэкономичен. Характерно, что, выпустив в 1945 г. ионный привод мощностью 40 kW, фирма GEC указывает, что этот привод является неэкономичным.

В настоящее время в США ионный привод является типовым регулируемым приводом малой мощности. Используется он преимущественно в металлообрабатывающей промышленности (копировальные станки, автоматы, цилифровальные станки), а также для вспомогательных механизмов бумажной и текстильной промышленности. Выпускают его в основном две фирмы — GEC и Westinghouse. Первая называет свой привод «таймоторол» (Thymotrol), вторая — «мототрол» (Mototrol). Принципиального различия между этими приводами нет; они отличаются

только схемой управления. В первых экземплярах привода мототорол ионный аппарат использовался только для регулирования скорости изменением напряжения, подводимого к якорю. В приводе таймоторол, а также в последних выпусках привода мототорол, управляемый выпрямитель применен и для регулирования тока возбуждения двигателя.

Приводы этого типа принципиально ничем не отличаются от ранее известных типов ионного привода постоянного тока. Для них характерна система сеточного управления, построенная целиком на электронных лампах. В настоящей статье задача ограничена рассмотрением схем управления приводами типа таймоторол и мототорол. Схема управления приводом таймоторол является более сложной, но одновременно и более совершенной, поэтому ниже за основу взята именно схема привода таймоторол.

**Схема главной цепи.** Питание привода типа таймоторол и мототорол может осуществляться как от однофазной, так и от трехфазной сети. Обычно применяется однофазное исполнение. В этом случае уменьшается необходимое число ионных аппаратов — тиатронов и несколько упрощается питающий трансформатор. Этот аппарат является одним из основных элементов привода. Отказ от трансформатора привел бы к необходимости применения специальных двигателей, рассчитанных на нестандартное напряжение. В большинстве случаев для уменьшения габаритов трансформатор заменяется автотрансформатором, имеющим ряд отпаек.

Для возможности регулирования скорости как путем изменения напряжения цепи якоря, так и тока возбуждения, в схеме использованы два комплекта тиатронов. Реверс двигателя, а также инверторный режим в случае применения торможения с рекуперацией энергии, осуществляется переключением якоря с помощью соответствующих контакторов.

Принципиальная схема главной цепи привода таймоторол дана на рис. 1, на котором также на-несены и основные элементы сеточных цепей.

Для защиты двигателя от перегрузок в цепи якоря находится тепловое реле *TP*. Защита от коротких замыканий осуществляется с помощью плавких предохранителей. Параллельно обмотке возбуждения и вторичной обмотке трансформатора приключены тиристорные сопротивления, служащие для предохранения обмоток от возможных перенапряжений.

**Сеточные цепи тиатронов.** Автоматическое регулирование скорости привода осуществляется с помощью сеточного управления тиатронами цепи якоря и цепи возбуждения. В приводе таймоторол использован чисто фазовый метод сеточного управления. Сдвиг фаз анодного и сеточного напряжений осуществляется с помощью фазового моста, состоящего из насыщенного реактора и сопротивления. Для питания моста использована одна из вторичных обмоток питающего трансформатора. Напряжение на сетки тиатронов подается от диагонали моста через сеточный трансформатор. Управление током в под-

магничивающей обмотке осуществляется с помощью специальной схемы с электронными лампами. Для возможности подмагничивания реактора анодным током маломощной электронной лампы его подмагничивающая обмотка выполняется с большим числом витков и соответственно большим омическим сопротивлением (3 000  $\Omega$ ) при малом значении тока насыщения (2,5 mA).

В приводе мототорол (рис. 2) фазовый мост использован только для создания определенного постоянного сдвига между анодным и сеточным напряжением, а изменение угла зажигания осуществляется изменением величины постоянного смещения, подаваемого на сетку. Необходимо отметить, что принцип управления зажиганием в схеме привода таймоторол является более совершенным — он обеспечивает более высокую четкость подачи импульса. Кроме того, при этой схеме цепи электронного управления могут быть электрически не связаны с сеточными цепями тиатронов.

**Питание цепей управления приводом.** Питание анодных и сеточных цепей электронной схемы управления приводом таймоторол осуществляется отдельного кенотронного выпрямителя, причем для сглаживания пульсаций тока применен фильтр, состоящий из дросселя и конденсатора. В целях поддержания постоянства величины выпрямленного напряжения применены две лампы тлеющего разряда типа стабиливольт, включенные последовательно с балластным сопротивлением. Напряжение на каждом стабиливольте поддерживается равным 75 V. Одна из ламп служит эталоном постоянного напряжения, вторая используется для создания трехпроводной системы 2  $\times$  75 V. Аналогичное устройство применено и для питания цепей управления в приводе мототорол.

Управление контакторами — реверсивным, пусковым, тормозным, осуществлено на переменном токе. Для питания цепей катушек контакторов предусматривается или отдельная обмотка в питающем трансформаторе или специальные отпайки в автотрансформаторе.

**Регулирование и поддержание постоянства скорости привода.** Возможный диапазон регулирования скорости в ионном приводе несколько выше, чем в нормальном приводе по системе Леонарда. Напряжение ионного преобразователя может быть снижено до нулевого значения. Следовательно, работа на низких скоростях в ионном приводе протекает без осложнений, свойственных системе Леонарда. Однако, в ионном приводе имеются свои характерные особенности в отношении регулирования скорости, обусловленные следующими обстоятельствами: 1) механическая характеристика ионного привода несколько круче, чем характеристика самого двигателя; 2) в зоне малых нагрузок вследствие явления разрывов тока механическая характеристика имеет перегиб и резкий подъем скорости с уменьшением момента на валу двигателя; 3) колебания напряжения в питающей сети вызывают пропорциональные им изменения выпрямленного напряжения и соответственно ско-

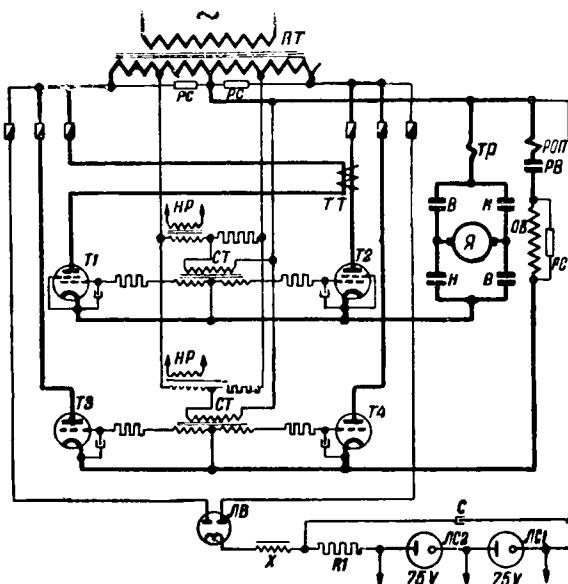


Рис. 1. Принципиальная схема главной цепи и сеточных цепей тиатронов привода таймоторол.

*Я*—якорь двигателя; *OB*—обмотка возбуждения; *ПТ*—питающий трансформатор; *T1* и *T2*—тиатроны цепи якоря; *T3* и *T4*—тиатроны цепи возбуждения; *СТ*—сеточный трансформатор; *НР*—насыщенный реактор; *Л1*—кенотрон цепи управления; *ЛС1* и *ЛС2*—лампы типа стабиливольт; *В* и *Н*—реверсивные контакторы; *ГТ*—анодный трансформатор тока *РОП*—реле обрыва поля; *РВ*—моторное реле времени; *ТР*—термическое реле; *РС*—тиристорное разрядное сопротивление.

ности двигателя. Поэтому без специальных мер по поддержанию постоянства скорости практически автоматизированный ионный привод работать не может. Соответственно с этим в описываемых приводах вопросу поддержания постоянства скорости уделено большое внимание.

Регулирование скорости привода таймоторол построено на компенсационном принципе. Выпрямленное напряжение в цепи якоря сравнивается с частью эталонного напряжения, создаваемого стабиливольтом *ЛС1* (рис. 3). Разность этих напряжений подается на сетку триода *Л1*. Сетка триода *Л2*, в анодную цепь которого включена подмагничивающая обмотка реактора фазового моста, подключена к делителю напряжения, один из элементов которого обтекается анодным током лампы *Л1*. При нормальной работе привода сетка лампы *Л2* имеет незначительный положительный потенциал, который обуславливает определенное значение тока в обмотке реактора, а следовательно, и определенный угол запаздывания зажигания тиатронов, соответствующий данной нагрузке на валу привода. При увеличении скорости двигателя, вследствие возрастания выпрямленного напряжения, что может, например, явиться следствием увеличения напряжения в сети переменного тока, сетка лампы *Л1* становится более положительной, что увеличивает ее анодный ток, а следовательно, ток через сопротивление *R2*. Это в свою очередь вызывает снижение потенциала сетки *Л2* и уменьшение подмагничивающего тока реактора. В результате, угол запаздывания зажигания тиатронов увеличится, и величина выпрямленного напряжения уменьшится, что повлечет за собой снижение скорости двигателя до первоначальной величины.

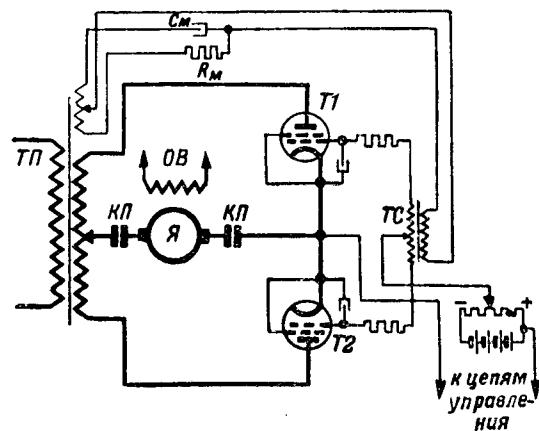


Рис. 2. Принципиальная схема сеточных цепей тиатронов привода мототорол. *Я*—якорь двигателя; *OB*—обмотка возбуждения; *T1* и *T2*—тиатроны; *КП*—пусковой контактор; *ТС*—сеточный трансформатор; *R1M* и *C1M*—плечи фазового моста; *П1*—потенциометр сеточного смещения.

Наличие двух ламп *Л1* и *Л2* связано с необходимостью изменения знака приращения напряжения в цепи подмагничивающей обмотки реактора по сравнению с сеточной цепью первой лампы; увеличение положительного потенциала на сетке лампы *Л1* при возрастании скорости двигателя должно вызывать уменьшение тока в обмотке реактора.

Для возможности регулирования скорости двигателя эталонное напряжение, с которым сравнивается напряжение якоря, должно изменяться. С этой целью катод лампы *Л1* подключен к напряжению стабиливольта через потенциометр.

Так как номинальное напряжение двигателя превышает напряжение стабиливольта, то поэтому сетка лампы *Л1* подключена к цепи якоря через делитель напряжения. Часть сопротивления последнего сделана регулируемой, что дает возможность настройки схемы при замене стабиливольта или в случае изменения его параметров со временем.

Для компенсации изменения скорости вследствие омического падения напряжения в обмотках якоря, катодном реакторе, в соединительных проводах и пр. угол запаздывания зажигания тиатронов при увеличении момента на валу двигателя должен соответственно уменьшаться. Для этого на сетку лампы *Л1* должно подаваться дополнительное отрицательное смещение, пропорциональное току якоря. С этой целью может быть использован шунт, включенный последовательно в цепь якоря. Однако, при этом необходимо дополнительное усиление, так как падение напряжения на шунте может быть принято не больше чем 50—100 мВ. Поэтому в схеме привода таймоторол использован специальный трансформатор тока, имеющий две первичные обмотки, каждая из которых включена в анодную цепь одного из тиатронов цепи якоря. Вторичная обмотка трансформатора через кенотрон *Л5*, служащий для выпрямления, замкнута на сопротивление. Часть этого сопротивления *R17* включена

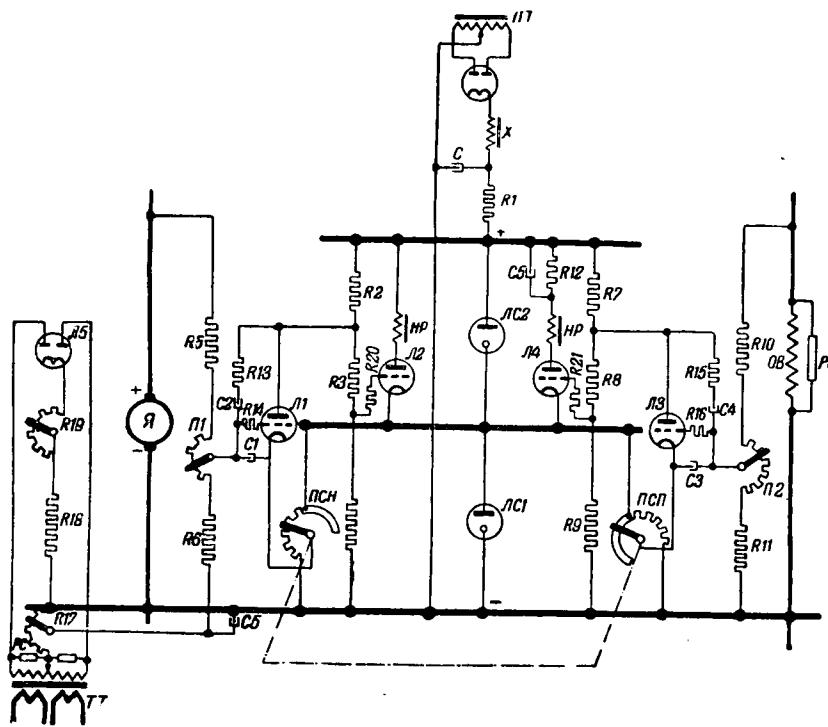


Рис. 3. Принципиальная схема регулирования и поддержания скорости двигателя привода таймотора.

ПСН и ПСП — потенциометры регулирования скорости двигателя; П1 и П2 — потенциометры подстройки схемы; НР — подмагничивающие обмотки насыщенных реакторов; ТТ — анодный трансформатор тока; Л1—Л5 — электронные лампы.

последовательно с делителем напряжения цепи якоря. В результате с увеличением момента на валу двигателя, а следовательно, тока якоря сетка лампы  $L_1$  становится более отрицательной. Вследствие этого угол запаздывания зажигания тиатронов уменьшается и выпрямленное напряжение возрастает, чем и поддерживается постоянство скорости.

Для регулирования потока двигателя применяна схема, аналогичная описанной выше. Управление током насыщенного реактора осуществляется с помощью ламп  $L_3$  и  $L_4$ . Электрическая обратная связь обеспечивает поддержание постоянства скорости тока возбуждения независимо от колебаний напряжения сети. Постоянство скорости при изменении момента на валу двигателя обеспечивается только изменением угла зажигания тиатронов цепи якоря. Регулированием тока возбуждения достигается лишь установка заданного уровня скорости. Точность поддержания постоянства скорости в приводе таймотора при колебании сетевого напряжения на  $\pm 10\%$  и изменении нагрузки от нуля до максимума составляет  $\pm 0,5\%$ .

Движки потенциометров регулирования скорости механически связаны между собой, причем на одной половине своего перемещения они скользят по металлическому сектору, а на второй по сопротивлению. Таким путем до основной скорости регулирование производится только напряжением якоря, а после основной — только током возбуждения.

В приводе мототорол для регулирования и поддержания постоянства скорости также при-

менен компенсационный метод. Однако, разность напряжений цепи якоря и эталонного напряжения, усиленная электронной лампой, непосредственно подается в сеточную цепь тиатронов. Как видно из рис. 4, при повышении скорости двигателя, вследствие возрастания выпрямленного напряжения, увеличивается потенциал сетки лампы  $L_1$ , возрастает ее анодный ток и падение напряжения на сопротивлении  $R_3$  включенном в цепь сеток тиатронов, что обусловливает изменение угла запаздывания зажигания. Регулирование скорости двигателя осуществляется перемещением движка потенциометра  $P_2$ , изменяющего величину эталонного напряжения, вводимого в цепь сетки  $L_1$ . Для упрощения на схеме все вспомогательные источники постоянного тока, в том числе источник эталонного напряжения, условно изображены в виде батарей.

На рис. 5 показаны дополнительные элементы схемы, необходимые для компенсации омического падения напряжения. Напряжение, снимаемое с шунта, включенного последовательно с якорем, усиливается лампой  $L_2$  и вводится в сеточную цепь лампы  $L_1$ .

**Ограничение тока и компаундирование.** Во избежание больших механических перенапряжений в отдельных частях исполнительного механизма и для защиты двигателя в автоматизированном приводе предельное значение тока должно быть ограничено. При превышении определенного значения момента на валу двигателя скорость его должна быть снижена. Напротив, в рабочей части механической характеристики обычно желательно постоянство скорости. Эти условия полностью обеспечены в приводах обеих систем. Устройство ограничения тока вступает в работу только при определенной перегрузке, соответствующей 150—200% номинального тока. В случае работы со скоростью выше основной при возрастании момента на валу двигателя предварительно, до снижения напряжения в цепи якоря, увеличивается поток двигателя.

В приводе таймотора для ограничения тока, в основном, используется то же устройство, которое применено для компенсации омического падения напряжения (см. ниже рис. 7). Напряжение, снимаемое с сопротивлений  $R_{18} \div R_{19}$ , включенных в цепь кенотрона  $L_5$ , подается на сетки двух ламп  $L_6$  и  $L_7$ , из которых первая используется для ограничения тока, а вторая — для форсировки поля двигателя. Появление анодного тока лампы  $L_6$  вызывает дополнительное падение напряжения в сопротивлении  $R_2$  и, как следствие, уменьшение тока в подмагничивающей обмотке реактора фазового моста тиатрона.

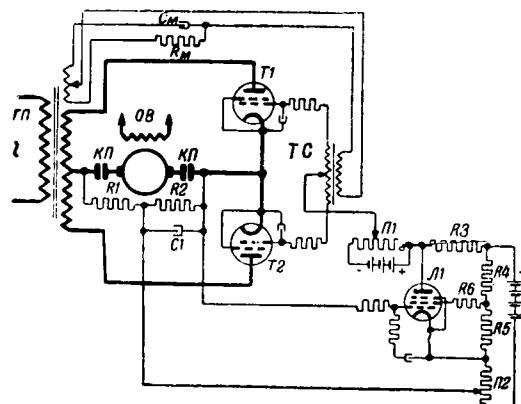


Рис. 4. Принципиальная схема регулирования скорости двигателя привода мототрол.  
 $P_1$ —потенциометр сеточного смещения;  $P_2$ —потенциометр регулирования скорости;  $L_1$ —электронная лампа.

нов цепи якоря. Лампа  $L_6$  по своему действию на сеточные цепи лампы  $L_2$  аналогична лампе  $L_1$ . Отпирание лампы  $L_7$ , напротив, вызывает возрастание тока в обмотке насыщенного реактора тиатронов, питающих обмотку возбуждения, так как при этом потенциал сетки лампы  $L_4$  становится более положительным.

Катод лампы  $L_6$  имеет более высокий потенциал, чем катод лампы  $L_7$ , поэтому при плавном нарастании статического момента механизма действие лампы  $L_7$  опережает действие лампы  $L_6$ . При резком пике нагрузки обе лампы отпираются практически одновременно, чем устраивается опасность нарушения коммутации двигателя.

Механические характеристики привода таймомтрол даны на рис. 6, где одновременно приведены и характеристики ионного привода без специальных мер по поддержанию постоянства скорости и ограничению тока. В ионном приводе имеются большие возможности в отношении компаундирования. Изменяя степень компенсации омического падения напряжения и эффективность токоограничивающего устройства, можно получить механические характеристики различной формы.

В приводе мототрол также имеется устройство для ограничения тока двигателя. При увеличении тока якоря свыше определенного значения падение напряжения в шунте, включенном в цепь якоря, возрастает настолько, что отпирается лампа  $L_3$ . Прохождение ее анодного тока по сопротивлению  $R_2$  вызывает уменьшение отрицательного потенциала на сетке  $L_1$ , несмотря на противоположное действие лампы  $L_2$ , влияние которой при перегрузках оказывается меньше. В результате угол запаздывания зажигания тиатронов увеличивается, и скорость двигателя снижается. При нормальном режиме лампа  $L_3$  не работает, так как ее сетка имеет большее запирающее напряжение, обусловленное падением напряжения на активной части потенциометра  $P_6$ .

**Переходные режимы.** Работа любого исполнительного механизма оценивается с точки зрения его производительности и качества продукта.

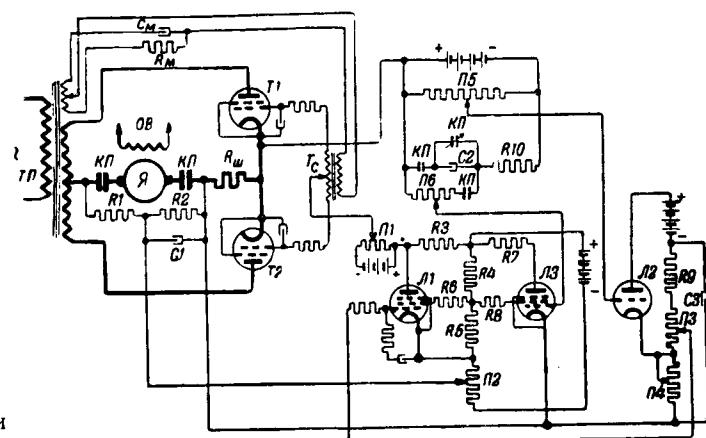


Рис. 5. Принципиальная схема управления приводом мототрол.

$K_P$ —пусковой контактор;  $R_{sh}$ —шунт в цепи якоря;  $L_1$ — $L_3$ —электронные лампы;  $P_1$ — $P_6$ —потенциометры.

ции. В электрифицированных механизмах с автоматизированным приводом оба эти фактора в основном определяются длительностью и характером протекания переходных процессов привода. Кроме того, от поведения привода в переходных процессах зависит величина динамической нагрузки и устойчивость работы агрегата.

Широкое распространение в США ионного привода типа таймомтрол и мотомтрол обусловлено исключительно его высокими качествами в отношении быстроты и плавности протекания переходных процессов. Электронная схема управления, часть которой уже описана выше, обеспечивает протекание всех процессов при наивыгоднейших условиях, а именно, при постоянстве силы тока якоря. При этом получается максимальная быстрота процессов при весьма плавном ускорении. При постоянном статическом моменте на валу двигателя разгон и торможение совершаются при постоянном динамическом моменте. Для увеличения момента привода все переходные процессы совершаются при максимальном значении потока. Безинерционное сеточное управление позволяет осуществить весьма эффективную форсировку процессов.

Основными режимами ионного привода являются двигательный режим и режим рекуперативного торможения (инверторный). В соответствии с этим при работе ионного привода могут иметь место следующие переходные процессы: а) разгон; б) торможение с рекуперацией энергии; в) прием и сброс нагрузки. Процесс реверса фактически состоит из трех последовательных процессов: а) рекуперативного торможения; б) противовключения; в) разгона в противоположном направлении. Самостоятельный значения режим противовключения в ионном приводе не имеет. Для упрощения схемы часто вместо рекуперативного торможения используется динамическое торможение, осуществляющее замыканием якоря на сопротивление. Для ионного привода этот режим не является характерным, так как в этом случае ионный аппарат в процессе торможения не участвует.

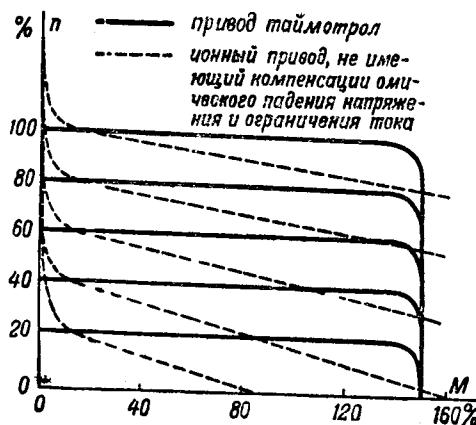


Рис. 6. Механические характеристики привода таймоторол.

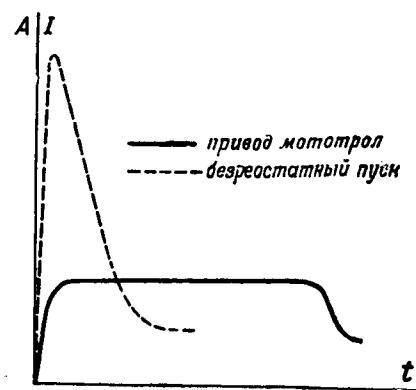


Рис. 8. Кривые силы тока при пуске двигателя.

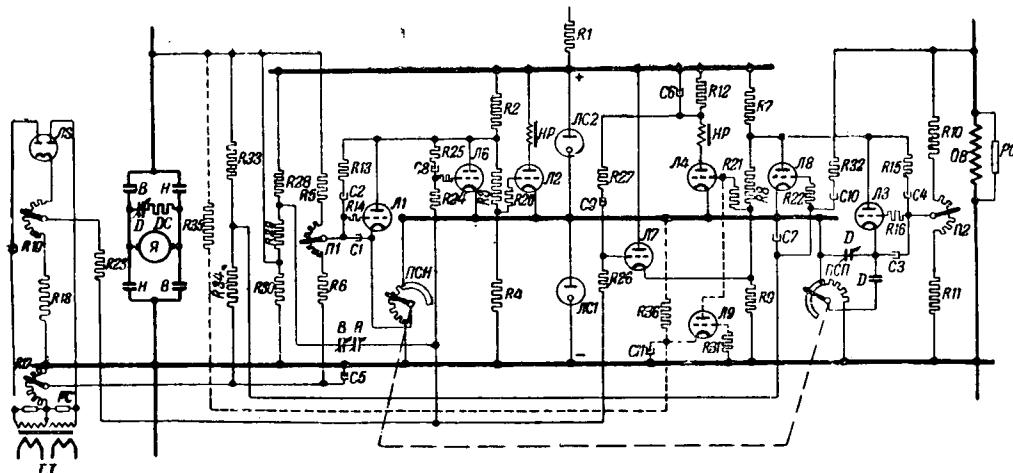


Рис. 7. Принципиальная схема управления приводом таймоторол.

Я—якорь; OB—обмотка возбуждения; B и H—реверсивные контакторы; ДС—сопротивление динамического торможения; АТТ—анодный трансформатор тока; PC—тиристорное разрядное сопротивление; Л1—Л9—электронные лампы; ЛС1 и ЛС2—лампы типа стабилитрон; ПСН и ПСЛ—потенциометры регулирования скорости; П1 и П2—потенциометры подстройки схемы.

Рассмотрим, какими средствами достигается обеспечение оптимальных условий протекания переходных процессов в приводах таймоторол и мототорол в каждом из характерных для них режимов.

**Разгон привода и регулирование скорости.** Для поддержания постоянства силы тока при пуске двигателя используется токоограничивающее устройство, описанное выше. Предварительно до нажатия кнопки «пуск» потенциометр регулирования скорости ставится в положение, соответствующее заданному числу оборотов в минуту. Вследствие этого на сетку лампы *Л1* подается значительное управляющее напряжение. Поэтому при отсутствии токоограничивающего устройства после включения пускового контактора имело бы место полное открытие тиаратронов. Однако, наличие ламп *Л6* в приводе таймоторол и *Л3* в приводе мототорол ограничивает нарастание тока до значения, соответствующего 150—200% номинального тока. Дальнейший разгон происходит по этой постоянной величине тока. Наличие лампы *Л7* (рис. 7) обеспечивает фиксировку магнитного потока двигателя до предельного значения, вне зависимости от положе-

ния движка потенциометра регулирования скорости. После достижения основной скорости дальнейший разгон осуществляется ослаблением потока, но также при постоянной силе тока.

При включении пускового контактора возможен значительный пик тока, так как устройство, ограничивающее силу тока, не может мгновенно вступить в работу. Резкое нарастание тока в первый момент при полном открытии сеток тиаратронов и последующий внезапный переход на режим постоянства тока вызвали бы нежелательные механические толчки. Поэтому схема привода таймоторол дополнена элементами, которые обеспечивают закрытие сеток тиаратронов цепи якоря в первый момент пуска. При отключенных пусковом или реверсивных контакторах через их нормально замкнутые блок-контакты на сетку лампы *Л6* подается положительное смещение от делителя напряжения, составленного из сопротивлений *R28*, *R29* и *R30*. Наличие емкостной связи сетка — анод обеспечивает в течение нескольких периодов сохранение ложного сигнала на сетке, эквивалентного сигналу в случае чрезмерного увеличения тока.

Аналогичное дополнение имеется и в приводе мототрол (рис. 5), где с помощью блок-контактов пускового контактора снимается отрицательное смещение с сетки лампы  $L_3$ . Скорость нарастания его после включения контактора определяется скоростью заряда конденсатора  $C_2$  через сопротивление  $R_{10}$ . Действие ложного сигнала длится 3—4 периода.

Для обеспечения достаточного пускового момента при включении пускового контактора необходимо иметь максимальный магнитный поток. С этой целью при неподвижном якоре с помощью блок-контактов контактора динамического торможения катод лампы  $L_3$  (рис. 7) отключается от движка потенциометра и подключается к средней шине цепей управления. Это обеспечивает полное открытие сеток тиатронов цепи возбуждения. Скорость исчезновения ложного сигнала также определяется постоянной времени цепи сетка — анод.

Кривые силы тока при пуске двигателя ионного привода мототрол даны на рис. 8 в виде сплошной кривой, где одновременно приведена и аналогичная кривая для безреостатного пуска (пунктирная кривая).

При регулировании скорости в сторону более высоких ее значений имеет место процесс, аналогичный процессу пуска. Регулирование скорости в сторону меньших значений имеет некоторые особенности. При перемещении движка потенциометра выпрямленное напряжение становится меньше э. д. с. якоря. Под действием лампы  $L_7$  поток двигателя нарастает до максимального значения. Ток якоря вследствие униполярной проводимости тиатронов не может изменить направление. Поэтому напряжение на щетках двигателя может сильно возрасти. Для устранения этой опасности в схему управления приводом таймогрол дополнительно введена лампа  $L_8$ , которая, ограничивая скорость нарастания тока возбуждения двигателя, не допускает повышения напряжения на якоре выше 130% номинального значения. На сетку ее подается напряжение, равное разности напряжения якоря и эталонного напряжения.

*Динамическое торможение двигателя*, как обычно, осуществляется замыканием якоря на соответствующее сопротивление. В случае торможения от скорости выше основной начальная часть процесса происходит при нарастающем потоке. Вследствие подключения катода лампы  $L_3$  (рис. 7) блок-контактами контактора динамического торможения к средней шине цепей управления сила тока возбуждения стремится к предельному значению. Скорость нарастания потока контролируется лампой  $L_8$ .

Очень часто динамическое торможение в приводе таймогрол используется и для быстрого перехода от скорости более высокой к более низкой. С этой целью в схему дополнительно вводится еще одна лампа, которая подключается аналогично лампе  $L_2$ . Однако, сетка ее подключена к точке делителя напряжения, имеющей более высокий потенциал. В анодную цепь этой лампы включено реле, управляющее контакто-

ром динамического торможения. При резком перемещении движка потенциометра регулирования скорости, одновременно с запиранием сеток тиатронов якоря отключается катушка контактора динамического торможения, которая вновь получает питание при достижении скорости, близкой к заданной.

*Рекуперативное торможение* в ионных приводах типа таймогрол и мототрол используется преимущественно лишь при реверсе и при полной остановке. От рекуперации энергии при снижении скорости в процессе ее регулирования во избежание усложнения схемы отказываются и применяют, как отмечалось выше, динамическое торможение. Вообще автоматический переход из выпрямительного режима в инверторный и обратно обычно не предусматривается.

Вследствие униполярной проводимости ионных аппаратов направление тока, протекающего через них, измениться не может, и поэтому рекуперативное торможение, а также реверс должны осуществляться путем переключения зажимов тиатронов и якоря. Во избежание возникновения режима противовключения ионный аппарат должен быть переведен в инверторный режим. Сетки его должны получать импульс на открытие в период отрицательных полуволн напряжения.

Управление ионным аппаратом в процессе торможения и реверса, как при пуске, в приводе таймогрол осуществляется лампой  $L_6$ , которая обеспечивает поддержание постоянства силы тока. В первый момент имеет место полное насыщение реактора фазового моста и угол регулирования составляет около  $180^\circ$ , что соответствует максимальному отрицательному напряжению инвертора. По мере торможения угол регулирования уменьшается, и напряжение инвертора падает. В случае реверса при достижении скорости, близкой к нулевой, ионный аппарат автоматически переводится в выпрямительный режим, причем на некотором отрезке времени до полного затормаживания неизбежен режим противовключения.

Для ограничения начального пика тока при реверсе, так же как и при пуске, необходима подача на сетку лампы  $L_6$  временного ложного сигнала, эквивалентного сигналу перегрузки, что осуществляется с помощью блок-контактов реверсивных контакторов.

Инвертирование может протекать удовлетворительно лишь при напряжении постоянного тока, не превышающем 90% максимального значения при выпрямительном режиме. Поэтому, во избежание нарушения коммутации инвертора напряжение на якоре двигателя в начальный период торможения до основной скорости должно поддерживаться на заданном уровне. Эту функцию выполняет лампа  $L_9$ , цепи которой на схеме рис. 7 показаны пунктиром. На сетку лампы подается разность напряжений якоря и эталонного. Делитель напряжения, к которому присоединена сетка, рассчитан таким образом, что при увеличении напряжения якоря выше 90% номинального значения лампа  $L_9$  вступает в работу и своим действием парализует

сигналы лампы  $L_7$ , подаваемые на сетку  $L_4$ , чем ограничивается увеличение потока двигателя. При достижении основной скорости лампа  $L_9$  выводится из работы, так как ее катод по отношению к сетке становится положительным. Дальнейшее управление торможением, как уже отмечалось выше, осуществляется по силе тока якоря.

Иногда рекуперативное торможение используется для остановки привода. В таком случае в схему дополнительно вводится реле минимального напряжения якоря, которое дает импульс на отключение реверсивных контакторов при достижении скорости, близкой к нулевой.

**Сглаживание пульсаций в цепях управления и стабилизация работы привода.** Как указывалось выше, в приводе таймоторл регулирование скорости двигателя построено на компенсационном принципе. На сетку лампы  $L_1$  подается разность напряжений — напряжения якоря и эталонного напряжения. Однако, выпрямленное напряжение на щетках двигателя имеет пульсирующий характер и непосредственно в цепях управления не может быть использовано. При подаче в цепь сетки лампы  $L_1$  пульсирующего напряжения величина анодного тока лампы не будет соответствовать средней величине э. д. с. якоря. Регулирование при этом не может быть устойчивым. Поэтому пульсация напряжения, подаваемого в сеточную цепь, должна быть предварительно сглажена. Этого достигают включением сеточного сопротивления и конденсатора. Однако, чем лучше сглаживание, т. е. чем больше емкость в цепи сетка — катод, тем медленнее происходит реагирование системы управления на изменение напряжения в цепи сетки. Поэтому в установках, работающих с большим числом включений в час и требующих точного поддержания скорости, стремиться к идеальному сглаживанию не следует. Сглаживание пульсаций необходимо также в цепях сеток ламп  $L_8$  и  $L_9$ , так как они работают в тех же условиях. В приводе мототорл для сглаживания пульсаций применяются аналогичные средства.

Вследствие большого усиления в электронных цепях управления привода таймоторл особенное значение приобретают вопросы устойчивости. Особенно это относится к приводам с поддержанием постоянства скорости с изменением нагрузки на валу двигателя. Поэтому все элементы схемы снабжены емкостными успокоительными обратными связями, включенными между анодом и сеткой или между анодом и катодом. Эти стабилизирующие цепи одновременно уменьшают и влияние пульсаций в кривой э. д. с. двигателя.

**Контакторно-релейная аппаратура.** Использование ионной аппаратуры для целей управления

и регулирования скорости двигателя постоянного тока позволяет значительно сократить число необходимых контакторов и реле. Контакторно-релейная аппаратура ограничивается реверсивными и тормозными контакторами и небольшим числом промежуточных и защитных реле. Габариты контакторов могут быть приняты минимальными, так как они служат лишь для размыкания цепи, а не для разрыва тока. Управление контакторами кнопочное; питание катушек всех реле осуществлено на переменном токе. Выдержка времени, необходимая для прогрева тиатронов, создается моторным реле времени, контакты которого находятся в цепи возбуждения. Наличие тока в обмотке возбуждения контролируется с помощью реле обрыва поля.

**Заключение.** Подводя итоги изложенному выше, следует еще раз подчеркнуть, что ионные приводы типа таймоторл и мототорл являются весьма совершенными регулируемыми приводами, основные преимущества которых следующие: быстрота и плавность регулирования, широкие пределы регулирования скорости, малое падение скорости с нагрузкой, возможность получения специальных механических характеристик и наивыгоднейшее протекание переходных процессов.

В области малых мощностей эти приводы в некоторых случаях могут успешно конкурировать с приводами, снабженными новейшими машинами-усилителями. Поэтому необходимо ликвидировать имеющееся у нас отставание в области развития ионного привода. Окончательно установив пределы применимости ионного привода и наметив конкретные механизмы, для которых они могут применяться, необходимо в кратчайший срок выпустить опытные образцы советского автоматизированного ионного привода малой мощности.

### Литература

1. S. D. Tendley. Electronic motor control. GER, № 4, 1943.
2. E. E. Moyer. Electronic control of D.-C. Motors, Electronics №№ 5, 6, 7, 9 и 10, 1943.
3. E. E. Moyer, H. L. Palmer. Thyatron motor control. El. Eng., № 11, 1943.
4. K. P. Ruchlowski. Electronic control of D.-C. Motors. TAEF, стр. 870—877, 1943.
5. H. L. Palmer, H. H. Leigh. Inverter action on reversing of thyatron motor control. El. Eng., № 4, 1944.
6. В. К. Попов. Переходные режимы в автоматизированном ионном электроприводе. Автоматика и телемеханика, № 3, 1941.
7. В. К. Попов. Ионный электропривод постоянного тока. Электричество, № 1—2, 1945.
8. В. К. Попов и Ю. А. Сабинин. Переходные процессы ионного электропривода постоянного тока с учетом самоиндукции. Известия АН СССР. Отделение технических наук, № 3, 1945.



# Теория переходных процессов электроприводов с упругой связью

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

Московский энергетический институт им. Молотова

Отчетливое понимание методов и способов управления и регулирования производственного процесса является одной из основных предпосылок к дальнейшему увеличению производительности станов холодной прокатки, повышению качества продукции и культуры эксплуатации оборудования. Еще совсем недавно, время разбега электродвигателей этих станов исчислялось в 20—30 сек. Это очень большая величина, если сравнить ее с временем разбега двигателя блюминга мощностью 7 000 л. с., равным всего 1 сек. Объясняется это тем, что методы регулирования и схема управления не обеспечивали в должной мере постоянства натяжения прокатываемой ленты в переходных режимах. Путем усовершенствования схемы электропривода, за счет введения ряда вспомогательных машин, — в том числе так называемых бустеров омического падения напряжения, время разбега доведено до 10÷15 сек. За последнее время в практику электропривода станов холодной прокатки введены элементы электромашинной автоматики — амплидины — и благодаря усовершенствованию процессов регулирования достигнуто дальнейшее сокращение времени переходных процессов. Задача достижения как высоких скоростей при прокатке, так и больших ускорений требует углубленной разработки теории и экспериментальных исследований.

В настоящей статье изложены дальнейшие работы автора по теории электромеханических процессов станов холодной прокатки.

Вывод основных уравнений. В предыдущих наших работах [Л. 1] по теории электроприводов с упругой связью переходные процессы анализированы в предположении, что скорость вращения двигателя клети в процессах разгона и замедления изменялась по линейному закону. В настоящем исследовании мы примем, что скорость двигателя клети изменяется по закону, который определяется величинами электромагнитной и электромеханической инерции системы электропривода клети, а также нагрузочным моментом ста-

таны холодной прокатки с их сложным автоматизированным электроприводом за последние годы приобрели большое значение в деле снабжения авиационной, автомобильной и тракторной промышленности широким и узким листом, прокатанным холодным способом. Необходимо в углубленной разработке теории электропривода станов холодной прокатки весьма велика. Изложены теория и основные принципиальные положения методики расчета электроприводов с упругой связью, применительно к станам холодной прокатки листов. Выявляются условия поведения основного фактора — натяжения — при различных режимах и параметрах установки.

тического сопротивления. Соответствующее уравнение для скорости вращения двигателя клети имеет вид:

$$n_1 = \frac{\alpha n_{01} - \Delta n_c}{T_m - \Theta} [T_m (1 - e^{-T_m}) - \Theta (1 - e^{-\frac{t}{\Theta}})]. \quad (1)$$

Здесь  $\Theta$  — электромеханическая постоянная времени двигателя клети;  $T_m$  — электромагнитная эквивалентная постоянная времени процесса возбуждения генератора;  $\Delta n_c$  — перепад скорости вращения двигателя клети при данном моменте статического сопротивления  $M_0$ ;  $n_{01}$  — скорость вращения двигателя при холостом ходе и номинальном токе возбуждения генератора;  $\alpha$  — коэффициент форсировки процесса возбуждения;  $n_1$  и  $t$  — текущие значения скорости вращения и времени.

Таким образом, исследовавшие, приближаясь к действительным условиям, будет учитывать дополнительно следующие факторы: электромагнитную инерцию цепей возбуждения генератора, а значит, и характер процесса возбуждения, маховой момент двигателя клети и момент статического сопротивления на его валу (момент прокатки).

Дифференциальное уравнение для электропривода на матывающей моталки примет следующий вид:

$$-I_2^2 \frac{d^2 n_2}{dt^2} = \frac{M_{02}}{2 \Delta I_0} \left\{ \frac{D_{02} n_2}{i_2} - \frac{D_1 (\alpha n_{01} - \Delta n_c)}{i_1 (T_m - \Theta)} \left[ T_m \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) - \Theta \left( 1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) \right] \right\}. \quad (2)$$

Для всех величин, входящих в состав данного уравнения, сохранены те же буквенные обозначения, что и в предыдущей работе.

После соответствующих преобразований, получим:

$$\frac{a^2 n_2}{dt^2} + b n_2 = c \left( T_m - \Theta - T_m e^{-\frac{t}{T_m}} + \Theta e^{-\frac{t}{\Theta}} \right). \quad (3)$$

Здесь

$$b = \frac{M_{02} D_{02}}{2 \Delta I_0 I_2^2}, \quad (4)$$

$$c = \frac{M_{02} D_1 (\alpha n_{01} - \Delta n_c)}{2 \Delta I_0 I_1 I_2 (T_m - \Theta)}. \quad (5)$$

Для дифференциального уравнения (3) общий интеграл соответственно неполного уравнения будет:

$$n_2 = C_1 \cos \beta t + C_2 \sin \beta t, \quad (6)$$

где

$$\beta = \sqrt{b} = \sqrt{\frac{M_{02} D_{02}}{2 \Delta I_0 I_2 I_2}}. \quad (7)$$

После интегрирования и соответствующих преобразований (приложение 1) получим для скорости вращения двигателя наматывающей моталки следующее выражение:

$$n_2 = c \left\{ \frac{T_m - \Theta}{\beta^2} - \frac{T^3 m e^{-\frac{t}{T_m}}}{1 + T^2 m \beta^2} + \frac{\Theta^3 e^{-\frac{t}{\Theta}}}{1 + \Theta^2 \beta^2} + \right. \\ \left. + \frac{A}{\beta} \cos \beta t + \frac{B}{\beta} \sin \beta t \right\}. \quad (8)$$

Остается определить постоянные интегрирования  $A$  и  $B$ .

Полагая, что двигатели клети и моталки приводятся в движение с неподвижного состояния, будем иметь начальные условия при  $t=0$ :

$$n_2 = 0 \text{ и } \left( \frac{dn_2}{dt} \right)_{t=0} = \frac{(M_2 - M_{02}) 375}{G D^2} = M_j. \quad (9)$$

Подстановка этих начальных условий в исходное уравнение (9) определяет величины  $A$  и  $B$ .

В окончательном виде уравнение для скорости вращения двигателя моталки будет:

$$n_2 = c \left\{ \frac{T^3 m}{1 + T^2 m \beta^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) - \frac{\Theta^3}{1 + \Theta^2 \beta^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) + \right. \\ \left. + \left( \frac{T_m - \Theta}{\beta^2} - \frac{T^3 m}{1 + T^2 m \beta^2} + \frac{\Theta^3}{1 + \Theta^2 \beta^2} \right) (1 - \cos \beta t) + \right. \\ \left. + \left[ \frac{375 (M_2 - M_{02})}{G D^2 \beta c} - \frac{T^2 m}{\beta (1 + T^2 m \beta^2)} + \frac{\Theta^2}{\beta (1 + \Theta^2 \beta^2)} \right] \sin \beta t \right\}. \quad (10)$$

Наличие найденной функциональной зависимости между скоростью двигателя моталки и временем позволяет перейти к определению величины натяжения. Воспользуемся для этой цели уравнением, дающим в общем виде зависимость между натяжением на наматывающей стороне моталки и скоростью вращения двигателей клети и моталки [Л. 1]:

$$T = \frac{2 \pi M_{02} I_2}{60 \Delta I_0 D_{02}} \int_0^t \left( \frac{D_{02} n_2}{I_2} - \frac{D_1 n_1}{I_1} \right) dt + T_0.$$

Подставив в это уравнение  $n_2 = f(t)$  из (10) и  $n_1 = \varphi(t)$  из выражения (1), получим после интегрирования, подстановки пределов интегрирования и ряда промежуточных преобразований

$$T = \frac{2 \pi M_{02}}{60 \Delta I_0} \left\{ \frac{c}{\beta^3} \left[ (T_m - \Theta) t - \frac{T^4 m \beta^2}{1 + T^2 m \beta^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + \right. \right. \\ \left. + \frac{\Theta^4 \beta^2}{1 + \Theta^2 \beta^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) - \frac{1}{\beta} \left( T_m - \Theta - \frac{T^3 m \beta^2}{1 + T^2 m \beta^2} + \right. \right. \\ \left. + \frac{\Theta^3 \beta^2}{1 + \Theta^2 \beta^2} \right) \sin \beta t + \left( \frac{375 (M_2 - M_{02})}{G D^2 c} + \frac{T^2 m}{1 + T^2 m \beta^2} + \right. \\ \left. + \frac{\Theta^2}{1 + \Theta^2 \beta^2} \right) (1 - \cos \beta t) \left. \right] - \frac{D_1 I_2}{I_1 D_{02}} \frac{(\alpha n_{01} - \Delta n_c)}{(T_m - \Theta)} \left[ (T_m - \right. \\ \left. - \Theta) t - T^2 m \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) + \Theta^2 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) \right] \right\} + T_0. \quad (11)$$

Дальнейшие преобразования этой достаточно сложной формулы изложены в приложении 2. Окончательная формула для натяжения имеет вид:

$$T = \frac{\alpha v_{02} m' \cdot 2}{T_m - \Theta} \left\{ - \frac{(T_m - \Theta) \beta \sin (\beta t - \varphi_4)}{\sqrt{(1 + \Theta^2 \beta^2)(1 + T^2 m \beta^2)}} - \right. \\ \left. - \frac{T^2 m \beta^2}{1 + T^2 m \beta^2} e^{-\frac{t}{T_m}} + \frac{\Theta^2 \beta^2}{1 + \Theta^2 \beta^2} e^{-\frac{t}{\Theta}} \right\} + (T_2 - T_0) (1 - \cos \beta t) + T_0. \quad (12)$$

Здесь означают:

$$\varphi_4 = \arctg \frac{\beta (\Theta + T_m)}{1 - \beta^2 \Theta T_m}, \quad (13)$$

$v_{02} = \frac{\pi D_{02} n_{02}}{60 \cdot I_2}$  — окружная скорость барабана моталки при скорости ее двигателя  $n_{02}$ ;  $m' \cdot 2 = \frac{G D^2 I^2}{D^2 \Theta g}$  — масса системы двигатель—моталка, приведенная к окружности моталки.

Эта последняя формула для натяжения на стороне моталки справедлива для разгона системы от неподвижного состояния. Она может быть проанализирована для различных практически возможных случаев в отношении величины действующего момента двигателя моталки  $M_2 = \text{const}$  и при разных величинах первоначального натяжения  $T_0$ , подобно тому, как это было произведено нами в предыдущей работе.

Анализ может быть произведен и в отношении разных величин коэффициента форсирования  $\alpha$  и электромагнитной постоянной времени  $T_m$ , т. е. в отношении различного характера процесса возбуждения, а также и при различных значениях электромеханической постоянной времени двигателя клети (точнее, при различных значениях его маховых масс). К детальному исследованию влияния всех этих факторов и перейдем, но вначале проанализируем полученные уравнения в общем виде, а затем уже на конкретном примере выполненной установки.

**Общий анализ основных уравнений.** Найденные в предыдущем разделе уравнения (1), (10) и (12) позволяют определить при переходном процессе разбега: скорость вращения двигателя клети, двигателя моталки и натяжение ленты. В установившемся режиме ( $t = \infty$ ) в этих уравнениях обрашаются в нуль показательные функции. Тогда

$$n_1 = \alpha n_{01} - \Delta n_c, \\ n_2 = c \left\{ \frac{T_m - \Theta}{\beta^2} + \left( \frac{T_m - \Theta}{\beta^2} - \frac{T^3 m}{1 + T^2 m \beta^2} + \right. \right. \\ \left. + \frac{\Theta^3}{1 + \Theta^2 \beta^2} \right) \cos \beta t + \left[ \frac{(M_2 - M_{02}) 375}{G D^2 \beta c} - \frac{T^2 m}{\beta (1 + T^2 m \beta^2)} + \right. \\ \left. + \frac{\Theta^2}{\beta (1 + \Theta^2 \beta^2)} \right] \sin \beta t \right\}, \quad (14)$$

$$T = \frac{\alpha v_{02} m' \cdot 2}{T_m - \Theta} \left\{ - \frac{(T_m - \Theta) \beta \sin (\beta t - \varphi_4)}{\sqrt{(1 + \Theta^2 \beta^2)(1 + T^2 m \beta^2)}} + \right. \\ \left. + (T_2 - T_0) (1 - \cos \beta t) + T_0. \right\} \quad (15)$$

Из трех последних уравнений видно, что если скорость двигателя клети имеет в установившемся режиме неизменное значение, то скорость двигателя моталки и натяжение ленты в установившемся режиме неизменных значений не получают, а представляют собой величины, содержащие слагающую, имеющую незатухающий колебательный характер.

Это чрезвычайно важное обстоятельство. Очевидно, что поскольку в уравнения для этих величин входят тригонометрические функции с разными амплитудами и сдвигнутые по фазе, — выбором величины ускоряющего момента  $M_2 - M_{02}$  нельзя достичь ликвидации периодической составляющей, как для скорости, так и для натяжения. Это положение

справедливо, как для установившегося, так и для переходного режима разбега, и оно означает, что получить постоянство натяжения не представляется возможным. В дальнейшем мы покажем, что периодическую составляющую в кривых скорости и натяжения можно довести до практически незначительных величин.

Попробуем несколько упростить формулу (12), тем более, что это можно сделать без большого ущерба в отношении точности, формула же примет более удобный вид для дальнейшего общего анализа.

Действительно, если принять во внимание числовые значения некоторых величин, входящих в эту формулу, подсчет которых дан в предыдущей работе, то получим:

$$T_m \geq 2 \text{ sec.}; \theta = 0,03 \div 0,1 \text{ sec.}; \beta = 35.$$

В связи с этим  $T_m - \theta \approx T_m$ ;  $\sqrt{1 + \beta^2 T_m^2} = \beta T_m$ ;

$$T = \frac{\alpha v_{02} m' 2}{T_m} \left\{ -\frac{\sin(\beta t - \varphi_4)}{\sqrt{1 + \theta^2 \beta^2}} - e^{-\frac{t}{T_m}} + \frac{\theta^2 \beta^3}{1 + \theta^2 \beta^2} e^{-\frac{t}{\theta}} \right\} + (T_2 - T_0) (1 - \cos \beta t) + T_0. \quad (16)$$

Коэффициент, стоящий перед фигурными скобками (16), мы можем представить в несколько ином виде.

Время разбега двигателя до основной скорости вращения

$$t_{01} = T_m \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1},$$

откуда

$$T_m = \frac{t_{01}}{\ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}}.$$

Обозначим, так же как и раньше,  $F_j = \frac{v_{02} m' 2}{t_{01}}$  — динамическое усилие на ободе барабана моталки, если бы он разгонялся с неизменным ускорением  $a_{02} = \frac{v_{02}}{t_{01}}$ . Используя эти соотношения, получим:

$$T = -\frac{\alpha \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}}{\sqrt{1 + \theta^2 \beta^2}} F_j \sin(\beta t + \varphi_4) - \alpha \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1} F_j \left( e^{-\frac{t}{T_m}} - \frac{\theta^2 \beta^2}{1 + \theta^2 \beta^2} e^{-\frac{t}{\theta}} \right) + T_2 - (T_2 - T_0) \cos \beta t.$$

При  $\alpha$ , стремящемся к бесконечности, выражение  $\alpha \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}$  стремится к единице, при оптимальном значении  $\alpha = 4$  оно равно 1,15.

Приняв это во внимание, перепишем вновь предыдущую формулу, сделав перегруппировку ее членов:

$$T = T_2 - 1,15 F_j \left( e^{-\frac{t}{T_m}} - \frac{\theta^2 \beta^2}{1 + \theta^2 \beta^2} e^{-\frac{t}{\theta}} \right) - \left[ (T_2 - T_0) \cos \beta t + \frac{1,15}{\sqrt{1 + \theta^2 \beta^2}} F_j \sin(\beta t - \varphi_4) \right]. \quad (17)$$

Выражение, заключенное в квадратные скобки, представляет собой незатухающую периодическую величину с неизменной амплитудой как в переходном, так и в установившемся режимах. Эта периодическая составляющая накладывается на среднее значение [выражение, стоящее в формуле (17) перед квадратными скобками], которое, однако, является постоянным только для установившегося режима ( $t = \infty$ ). В переходном режиме это среднее значение сначала уменьшается от величины  $T_2$  до некоторого минимального значения, а затем вновь возрастает опять до величины  $T_2$ .

**Конкретный анализ основных уравнений. Методика исследования.** Уравнение для скорости вращения двигателя моталки (10) и уравнение для натяжения ленты (12) получены в достаточно сложном виде. Дальнейшие их преобразования не могут дать заметных результатов в смысле их упрощения. Поэтому целесообразно перейти к исследованию влияния отдельных параметров на конкретном примере. Для этой цели мы вновь обратимся к установке реверсивного стана холодной прокатки [Л. 2]. Ввиду большого количества факторов, подлежащих учету и исследованию, необходимо наметить основной путь или, точнее, последовательность исследования влияния отдельных величин для получения наиболее отчетливых результатов.

В последующем анализе принимаем за основную исходную величину время разбега (или, что равноценно, ускорение при разбеге). Считая его неизменным, производим исследование процесса при различных величинах действующего момента  $M_2(T_2)$ , сохранив все остальные параметры неизменными. Затем продолжаем исследование при различных величинах электромагнитной инерции возбуждения генератора, при разных величинах электромеханической инерции двигателя и т. д. Сопоставление полученных результатов позволит сделать надежные общие выводы. Количественные подсчеты будем выполнять по точным формулам (12) и (10), а общий анализ в тексте по упрощенной формуле (17). Во всех случаях исследование будем производить при условии наличия предварительного натяжения, так как благоприятное его влияние исчерпывающим образом доказано в предыдущих работах автора.

*Исследование влияния действующего усилия и ускорения на поведение натяжения и скорости двигателя моталки. Время разбега  $t_{01} = 10$  sec. Подсчитаем параметры процесса.*

Примем, что возбуждение генератора осуществляется при оптимальном значении коэффициента форсировки  $\alpha = 4$ . Электромагнитная эквивалентная постоянная времени процесса возбуждения

$$T_m = \frac{t_{01}}{\ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}} = \frac{10}{\ln \frac{4}{3}} = 35 \text{ sec.}$$

Электромеханическую постоянную времени двигателя клети подсчитаем по следующей известной формуле:

$$\theta = \frac{GD^2 R_a}{375 C_m C_e},$$

$$C_e = \frac{U - I_n R_a}{n_n} = \frac{600 - 2980 \cdot 0,00627}{300} = 1,94,$$

$$C_m = \frac{C_e}{1,03} = 1,88.$$

Маховой момент в числителе принят равным

$$GD^2 = 15 \cdot 10^3 \text{ kgm}^2$$

$$\theta = \frac{15 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 0,0627}{375 \cdot 1,94 \cdot 1,88} = 0,137 \text{ sec.}$$

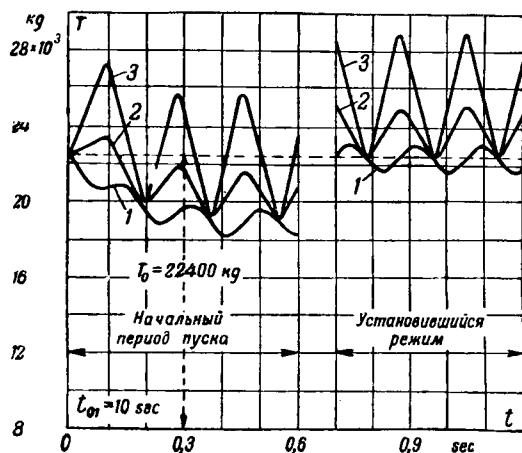


Рис. 1. Поведение натяжения при разбеге в 10 sec.  
Кривые: 1— $T_2 = T_0$ ; 2— $T_2 = 1,07 T_0$ ; 3— $T_2 = 1,15 T_0$ .

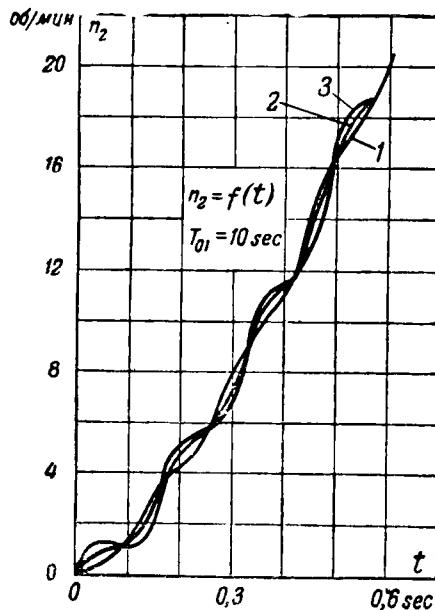


Рис. 2. Скорость вращения двигателя моталки при разбеге 10 sec.  
Кривые: 1— $T_2 = T_0$ ; 2— $T_2 = 1,07 T_0$ ; 3— $T_2 = 1,15 T_0$ .

Цифра два в числителе введена с учетом сопротивления обмотки главной цепи генератора, которое принято равным сопротивлению обмотки главной цепи двигателя.

Величины, подсчитанные в предыдущей работе:  $\beta = 36,2$ ,  $m'_3 = 215 \text{ kg cm}^{-1} \text{ sec}^3$ .

Так же, как и в предшествующих расчетах, будем исходить из того, что двигатель клети разгоняется до скорости вращения 300 об/мин, а двигатель моталки — до скорости вращения 356 об/мин. Установившаяся скорость прокатки (при  $n_{01} = 300$  об/мин) составляет  $91 \text{ m/min} = 152 \text{ cm/sec}$ . Величина предварительного натяжения принята равной 22 400 kg. Маховой момент двигателя моталки  $GD^2_2 = 1400 \text{ kgm}^2$ .

На рис. 1 построены кривые натяжения ленты на стороне наматывающей моталки при перечисленных выше условиях, —  $t_{01} = 10 \text{ sec}$ ,  $T_0 = 22400 \text{ kg}$  и для различных значений дей-

ствующего момента  $M_3$  (усилия  $T_2$ ) двигателя моталки. Кривая 1 построена при  $T_2 = T_0$ , т. е. при равенстве действующего момента и момента предварительного натяжения; соответствующая ей кривая скорости двигателя моталки приведена на рис. 2. Кривая построена для двух участков процесса — начального и установившегося режима. Как видно из рисунка и в соответствии с тем, что было на основе теоретического анализа отмечено выше, колебания периодической составляющей натяжения наложены на некоторую среднюю величину (ось), которая сама является переменной. Вначале среднее значение плавно уменьшается от первоначальной величины, равной  $T_0$ , затем вновь возрастает до прежнего значения.

Максимальное изменение натяжения, как это легко определить по рис. 1, равно 4 000 kg, а процентное —  $\frac{4000 \cdot 100}{22400} = 18\%$ .

Упрощенная формула (17) для данного случая ( $T_2 = T_0$ ) принимает вид:

$$T = T_2 - 1,15 F_j \left( e^{-\frac{t}{T_m}} - \frac{0^{232}}{1 + 0^{232}} e^{-\frac{t}{\theta}} \right) + \frac{1,15 F_j}{\sqrt{1 + 0^{232}}} \sin(\beta t - \varphi_4). \quad (18)$$

Из этой формулы следует, что максимальное изменение натяжения определяется, с одной стороны, разностью показательных функций, а с другой, — амплитудой периодической составляющей. Изменение натяжения в установившемся режиме характеризует исключительно периодическая составляющая. В общем поведение натяжения при  $M_2 = M_{02}$  можно считать в достаточной мере удовлетворительным.

Амплитуда периодической составляющей для случая, если бы двигатель клети разбегался по прямолинейному закону,

$$F_j = \frac{v_{02} n'_2}{t_{01}} = \frac{152 \cdot 215}{10} = 3280 \text{ kg}.$$

Амплитуда периодической составляющей для данного случая, т. е. с учетом электромеханической и электромагнитной инерции двигателя клети, согласно формуле (18)

$$\frac{1,15 F_j}{\sqrt{1 + 0^{232}}} = \frac{1,15 \cdot 3280}{\sqrt{1 + 0,137^2 \cdot 35,2^2}} = \frac{1,15 \cdot 3280}{5,06} = 750 \text{ kg}.$$

Разница — весьма существенная и в пользу рассматриваемого случая. Это объясняется влиянием инерционных масс, так как в самом начале процесса разбега нарастание скорости вращения двигателя клети, а значит и выдача ленты из валков замедлены. Отмечая здесь предварительно благоприятное влияние на поведение натяжения инерционных масс привода двигатель — клеть, мы этому вопросу посвятим более детальное исследование в конце настоящей статьи.

Кривые 2 и 3 рис. 1 построены для значений  $T_2$ , отличных от  $T_0$ , а именно: при  $T_2 = 1,07 T_0$  (кривая 2) и  $T_2 = 1,15 T_0$  (кривая 3).

Соответствующие кривые скорости вращения двигателя моталки помечены на рис. 2 одинаковыми цифрами. В соответствии с формулой (17) в этих процессах фигурируют две гармонические составляющие, причем вторая с амплитудой  $T_2 - T_0$  при выбранных нами значениях  $T_2$  превалирует над первой:

кривая 2

$$T_2 - T_0 = 0,07 T_0 = 1550 > \frac{1,15 F_j}{\sqrt{1 + 0^2 \beta^2}} = 750 \text{ kg.}$$

кривая 3

$$T_2 - T_0 = 0,15 T_0 = 3360 \text{ kg.}$$

Выявим сдвиг фаз между этими двумя синусоидальными величинами. Путем последовательных преобразований нетрудно установить, что

$$(T_2 - T_0) \cos \beta t + \frac{1,15 F_j}{\sqrt{1 + 0^2 \beta^2}} \sin (\beta t - \varphi_4) = \\ = (T_2 - T_0) \sin \left( \beta t + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1,15 F_j}{\sqrt{1 + 0^2 \beta^2}} \sin (\beta t - \varphi_4).$$

Фазовый сдвиг равен  $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} + \varphi_4$ .

На основании формулы (13)

$$\operatorname{tg} \varphi_4 = \frac{\beta(\theta + T_m)}{1 - \beta^2 \theta T_m} = -0,2,$$

$$\varphi_4 = -11,5^\circ \pm k\pi; \quad \varphi_4 = 168,5^\circ.$$

Таким образом, периодические составляющие сдвинуты по фазе на угол, весьма близкий к  $180^\circ$ , иначе говоря, соответствующим выбором величины  $T_2 - T_0$  можно свести и амплитуду результирующей этих двух гармонических к весьма малому значению.

Для кривой 2 (рис. 1) величина  $T_2 - T_0 = 1550 \text{ kg}$  взята несколько большей, чем это необходимо для сглаживания периодических колебаний; однако, при этом абсолютные изменения натяжения в переходном режиме (начальный участок кривой) уменьшились. При слишком большом значении  $T_2 - T_0 = 0,15 T_0$ , как это принято для процесса, изображенного кривой 3 (рис. 1), имеют место значительные колебания натяжения, как в переходном, так и в установившемся режимах.

Кривые скорости (рис. 2) подтверждают сказанное. Наиболее плавный (относительно) характер имеет кривая 1 ( $T_2 = T_0$ ). К ней весьма близка кривая 2 и более резкие колебания скорости наблюдаются в кривой 3 (очень большая разница между  $T_2$  и  $T_0$ ).

Относительное расположение кривых 1 и 2 показывает, что возможна, как примерно средняя между ними, еще более плавная кривая скорости при весьма незначительной величине периодической составляющей. То же рассуждение справедливо и для кривых натяжения 1 и 2 (рис. 1). Однако, следует отметить, что оптимальные скорости и натяжения могут быть получены лишь при очень высокой точности практи-

ческого установления величины  $T_2$ , вернее,  $T_2 - T_0$ . Разность  $T_2 - T_0$  мала по сравнению с абсолютными значениями величин  $T_2$  и  $T_0$ . Поэтому, очевидно, что в условиях эксплуатации неизбежно могут иметь место отклонения, а значит и не исключена возможность недопустимых искажений в поведении процесса от намеченного оптимального.

С другой стороны, процесс при  $T_2 = T_0$  дает весьма удовлетворительные показатели, а практическое его осуществление представляет меньшие трудности.

Время разбега  $t_{01} = 5 \text{ sec}$ . Коэффициент форсировки  $\alpha$  попрежнему равен 4. Электромагнитная постоянная времени процесса возбуждения получит новое значение:  $T_m = 17,5 \text{ sec}$ . Вырастет вдвое величина  $F_j$ , она составит 6560 kg. Сдвиг фаз между периодическими составляющими [формула (17)] почти не изменит своей величины.

Кривая 1 (рис. 3) изображает поведение натяжения при  $T_2 = T_0$ . В самом начале процесса наблюдается весьма значительное падение натяжения. Амплитуда гармонических колебаний невелика:

$$\frac{1,15 \cdot F_j}{\sqrt{1 + 0^2 \beta^2}} = 1500 \text{ kg.}$$

Увеличение изменения натяжения обусловлено в основном снижением средней линии (оси) колебаний. Положение ее определяется членом в простых скобках формулы (17), а также и коэффициентом перед этими скобками, т. е.  $F_j$ . При этом их влияние противоположно, а в количественном отношении влияние второго более значительно, чем первого.

Максимальное изменение натяжения составляет примерно 30% от первоначально установленного. В установившемся режиме вследствие небольшой величины амплитуды периодической составляющей поведение натяжения можно считать удовлетворительным.

Кривые 2 и 3 показывают поведение натяжения при значениях действующего момента, больших момента первоначального натяжения. Кривая 2 построена для  $M_2 = 1,07 M_{02}$ , а кривая 3 для  $M_2 = 1,15 M_{02}$ . Как видно из этих кривых, выбором величины действующего момента поведение натяжения может быть улучшено как в переходном, так и в установившемся режимах. В установившемся режиме так же, как и в предыдущем рассмотренном случае (при  $T_2 = T_0$ ), изменение натяжения можно довести до практически незаметных значений. В переходном режиме, именно в начальной его части, можно выровнять кривую натяжения, но в сравнительно небольших пределах, так как уже при относительно небольшой разнице между  $T_2$  и  $T_0$  значительное влияние начинает оказывать периодическая составляющая. В общем можно считать, что в достаточной мере благоприятное протекание переходного процесса в отношении поведения натяжения может быть обеспечено и при времени разбега в 5 sec.

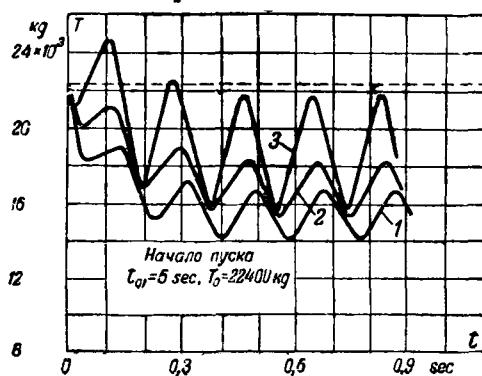


Рис. 3. Поведение натяжения при разбеге в 5 sec.  
Кривые: 1— $T_2 = T_0$ ; 2— $T_2 = 1.07 T_0$ ; 3— $T_2 = 1.15 T_0$ .

Если же поставить вопрос о дальнейшем снижении инерционных масс системы двигатель — моталка, то в отношении проведения натяжения, как в переходном, так и в установившемся режимах можно достичь весьма хороших результатов и при времени пуска, меньшем 5 sec.

При этом желательно, и это вполне возможно, обеспечить процесс при условии  $T_2 = T_0$ , т. е. при равенстве моментов действующего и первоначального натяжения.

Кривые 1, 2, 3 рис. 4 изображают поведение скорости вращения при условиях, аналогичных для кривых 1, 2 и 3 рис. 3.

Время разбега  $t_{01} = 2$  sec. Для дальнейшего изучения поставленного вопроса о наименьшем времени пускового периода на рис. 5 построены кривые натяжения 1 и 2 для времени разбега, равного 2 sec.

При  $t_{01} = 2$  sec и коэффициенте форсирования  $\alpha = 4$  эквивалентная электромагнитная постоянная времени процесса возбуждения  $T_m = 7$  sec. Величина  $F_j = \frac{v_{02} m' 2}{t_{01}} = 16000$  kg.

Как в установившемся, так и в переходном режимах здесь имеют место недопустимые колебания натяжения и выбором величины действующего момента уменьшить их нельзя. Очевидно, что радикальное решение могло бы быть здесь достигнуто при очень большом снижении величины инерционных масс привода двигатель — моталка, что практически встречает затруднения.

**Влияние момента прокатки на поведение натяжения.** Из формул (11) и (15) видно, что влияние момента статического сопротивления (момента прокатки) оценивается коэффициентом  $\alpha n_{01} - \Delta n_c$ , который может быть вынесен в виде множителя перед фигурными скобками, т. е. перед всей правой частью уравнения (11). Величина  $\Delta n_c = \frac{M_c R_0}{C_m C_e}$  представляет собой перепад скорости вращения при нагружочном моменте на валу двигателя, равным  $M_c$ . Она составляет примерно 2–3% от основной скорости двигателя  $n_{01}$  (при номинальном потоке), а по отношению к  $\alpha n_{01}$  ее значение не будет превосходить 1%.

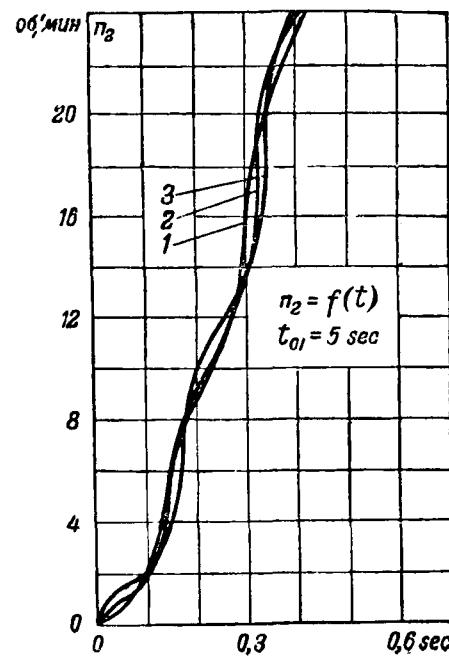


Рис. 4. Скорость вращения двигателя при разбеге в 5 sec.

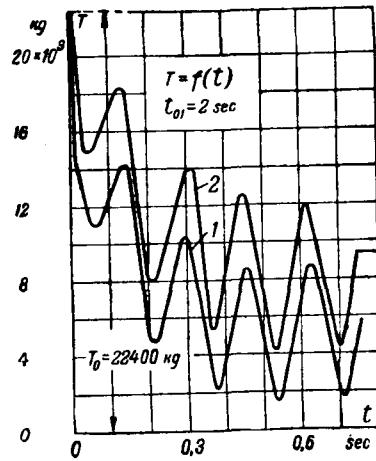


Рис. 5. Поведение натяжения при разбеге стана в 2 sec.  
Кривые: 1— $T_2 = T_0$ ; 2— $T_2 = 1.15 T_0$ .

Поэтому величиной  $\Delta n_c$  мы пренебрегли в целях упрощения, и в конечных формулах для натяжения она не входит. В связи с этим можно отметить, что влияние момента статического сопротивления прокатки на поведение натяжения и на скорость вращения двигателя моталки неизначительно. Момент статического сопротивления валков клети не остается постоянным, так как на него в свою очередь оказывают влияние колебания натяжения как на наматывающей, так и на сматывающей сторонах прокатываемой ленты. Однако, эти колебания невелики по сравнению с основным усилием, потребным для обжатия металла, и общего вывода относительно влияния момента статического сопротивления валков клети изменить не могут.

**Влияние характера скорости сращения двигателя клети при разбеге на поведение натяжения.** Время разбега двигателя до основной ско-

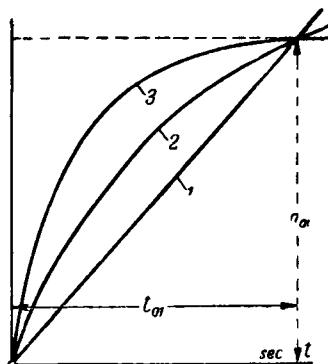


Рис. 6. Определение эффекта, которое оказывает характер нарастания скорости вращения двигателя клети на натяжение.

рости вращения в системе Леонарда определяется известной формулой:

$$t_{01} = T_m \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1},$$

где  $T_m$  — эквивалентная электромагнитная постоянная времени процесса возбуждения;  $\alpha$  — коэффициент форсирования.

Таким образом, время разбега определяется только двумя этими величинами. Характер поведения кривой скорости вращения при одном и том же времени разбега может быть различный и зависит от выбора величин  $\alpha$  и  $T_m$ .

Сказанное иллюстрируется тремя кривыми рис. 6. Кривая 1 построена для  $\alpha = 1$  и при наименьшем значении  $T_m$ , кривая 2 — при больших значениях  $\alpha$  и  $T_m$  и, наконец, кривая 3, близкая к прямой, при еще больших значениях этих величин. Представляет интерес исследовать, как влияет характер поведения кривой скорости вращения двигателя клети при разбеге на натяжение ленты и на скорость вращения двигателя моталки.

На рис. 7 построены по формуле (12) кривые  $T = f(t)$  при одном и том же времени разбега  $t_{01} = 10$  сек, но при различных параметрах цепи возбуждения генератора  $\alpha$  и  $T_m$ , указанных в следующей таблице:

| $t_{01} = \text{const} = 10$ sec |          |             |                      |
|----------------------------------|----------|-------------|----------------------|
| Кривая<br>рис. 7                 | $\alpha$ | $T_m$ , sec | $\frac{\alpha}{T_m}$ |
| 1                                | 4        | 35          | 0,115                |
| 2                                | 2        | 14,5        | 0,138                |
| 3                                | 1,01     | 2,17        | 0,48                 |

Все три кривые построены при условии, что  $M_2 = M_{02}$ , т. е. при равенстве действующего момента и момента первоначального натяжения.

Рассмотрение этих кривых позволяет заключить, что равномерность процесса возбуждения генератора, а значит, и равномерность разбега двигателя клети в отношении скорости его вращения являются обязательными для обеспечения

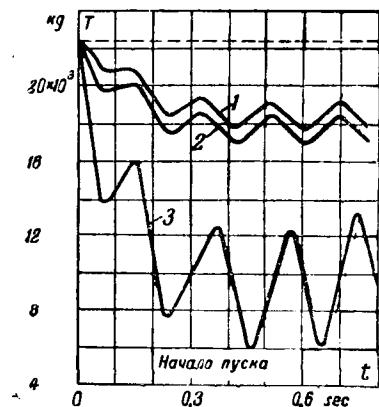


Рис. 7. Поведение натяжения при различном характере процесса разбега двигателя клети.

постоянства величины натяжения или малых отклонений ее от первоначально установленного значения.

Действительно, кривая 1 рис. 7 построена для наилучших показателей в отношении равномерности процесса возбуждения генератора ( $\alpha = 4$ ); кривая 3 на том же рисунке построена, можно считать, для наихудших показателей в этом же смысле ( $\alpha = 1,01$ ), и разница между этими кривыми весьма значительна.

Если поведение натяжения по кривой 1 может быть приемлемо по условиям эксплуатации, хотя оно еще далеко от идеальных условий, то поведение этой же величины по кривой 3 совершенно недопустимо.

Дело, в конечном счете, сводится к весьма большому ускорению, которое получает привод клети в начальном участке разгона при неравномерном протекании процесса. Это характеризуется для переходного процесса коэффициентом  $\frac{\alpha}{T_m - \theta} \approx \frac{\alpha}{T_m}$ , стоящим перед фигурными скобками формулы (20), который для менее равномерного возбуждения генератора принимает наибольшее значение. Это наглядно иллюстрируют числовые подсчеты, помещенные в приведенной таблице.

На рис. 8 представлены кривые скорости вращения двигателя моталки для самого начального участка разбега при разных условиях возбуждения генератора, помеченные цифрами соответственно кривым натяжения рис. 7. Кривые отчетливо выявляют большое различие в величине ускорения двигателей в начальном участке процесса разбега при разных условиях возбуждения генератора, но при одном и том же времени  $t_{01}$ , потребном для достижения основной (номинальной) скорости.

*Влияние инерционных масс привода двигателя-клети на поведение натяжения.* Прежде всего заметим, что речь в основном идет об инерционных массах двигателя клети, так как маховые массы валков клети и передаточного механизма незначительны по сравнению с ними. Для конкретной установки, использованной нами для анализа изучаемых вопросов, отношение махового

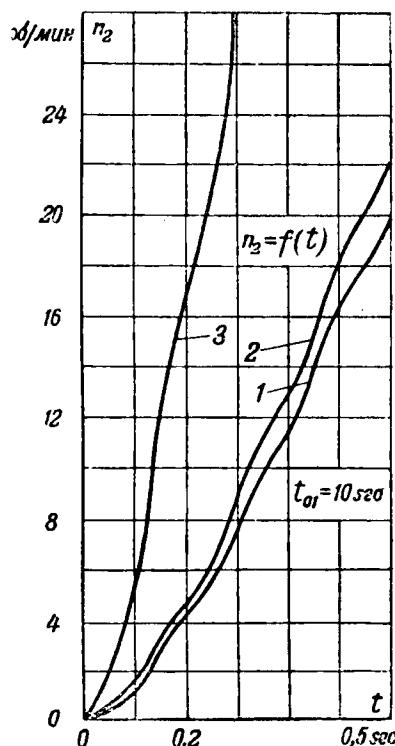


Рис. 8. Кривые скорости вращения двигателя моталки при различном характере разбега двигателя стана.

момента валков и передачи к суммарному маховому моменту двигателя — клеть составляет:  $\frac{1.5}{15} \cdot 100 = 10\%$ , что подтверждает сказанное.

Время разбега  $t_{01} = 10$  sec. На рис. 9 построены ряд кривых для различных значений махового момента двигателя клети. Будем считать величину электромеханической постоянной времени, принятую во всех предыдущих расчетах и соответствующую обычным параметрам двигателя выполненной установки, за номинальную:

$$\Theta_n = 0,137 \text{ sec.}$$

Все четыре кривые рис. 9 подсчитаны при условии  $M_2 = M_{02}$ , т. е. при равенстве действующего момента и момента первоначального натяжения и для наиболее благоприятного процесса возбуждения при  $\alpha = 4$ .

Кривая 1 дает поведение натяжения при  $\Theta = 2\theta_n$ , иначе говоря, при вдвое увеличенном значении маховых масс, чем кривая 2, для которой  $\Theta = \theta_n$ ; для кривой 3  $\Theta = 0,5\theta_n$  кривая 4 построена для гипотетического случая полного отсутствия инерционных масс ( $\Theta = 0$ ).

Формула (12), по которой произведены расчеты всех кривых при  $T_2 = T_0$ , принимает вид:

$$T = T_0 - \frac{\alpha v_{02} m' 2}{T_m} \left\{ e^{-\frac{t}{T_m}} - \frac{\theta^2 \beta^2}{1 + \theta^2 \beta^2} e^{-\frac{t}{\Theta}} \right\} - \frac{\alpha v_{02} m' 2}{T_m \sqrt{1 + \theta^2 \beta^2}} \sin(\beta t - \varphi_4). \quad (19)$$

Как видно, натяжение в переходном режиме равно первоначально установленному натяже-

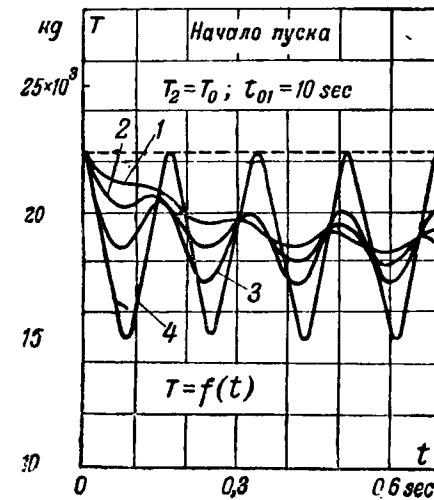


Рис. 9. Исследование влияния инерционных масс двигателя клети на натяжение при времени разбега 10 sec. и  $T_2 = T_0$ .

нию  $T_0$  за вычетом разности двух экспоненциальных функций и некоторой периодической составляющей. Разность первых двух членов правой части уравнения (19) определит собой поведение средней линии (оси колебаний), на которую и накладывается гармоническая составляющая.

Чем больше величина инерционных масс двигателя клети, т. е. чем больше значение  $\Theta$ , тем меньше будет отклоняться средняя линия натяжения от первоначально установленного значения, тем меньше будет также амплитуда гармонической составляющей, а значит, тем благоприятнее поведение натяжения. Все это непосредственно вытекает из общего анализа формулы (19) и (12) и подтверждается кривыми рис. 9.

Наименьшие отклонения натяжения от первоначально установленного значения  $T_0$ , как в переходном, так и в установившемся режимах дает кривая 1, построенная для наибольшего махового момента двигателя клети. С уменьшением величины инерционных масс колебания натяжения возрастают. Наиболее неблагоприятная картина имеет место при  $\Theta = 0$ . Формула (19) для этого случая может быть написана в следующем виде:

$$T = T_0 - \frac{\alpha v_{02} m' 2}{T_m} e^{-\frac{t}{T_m}} - \frac{\alpha v_{02} m' 2}{T_m} \sin(\beta t - \varphi_4). \quad (20)$$

Отсюда следует непосредственно, что при  $\Theta = 0$  наблюдается наибольшее отклонение средней линии (оси колебаний) от первоначально установленного значения, а также и наибольшая амплитуда гармонических колебаний.

На рис. 10 представлены кривые скорости вращения двигателя наматывающей моталки, построенные для тех же условий, что и помеченные соответственными цифрами кривые натяжения на рис. 9. Их поведение подтверждает все изложенное относительно влияния инерционных масс. Наибольшие колебания скорости вращения двигателя моталки содержатся в кривой 4 (минимальная величина инерционных масс двига-

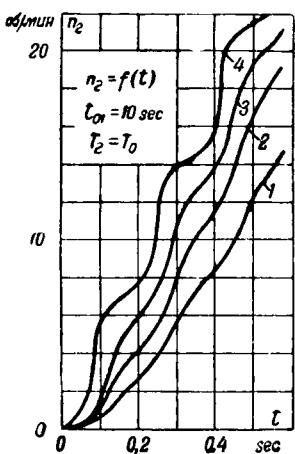


Рис. 10. Поведение скорости вращения двигателя моталки при различных значениях инерционных масс двигателя клети.

теля клети) и наименьшие колебания скорости в кривой 1, которая построена для наибольшего (из выбранных) значения махового момента двигателя клети.

На основе сказанного можно констатировать благоприятную роль инерционных масс двигателя клети и целесообразность применения в некоторых случаях дополнительного маховика на его валу.

Время разбега  $t_{01} = 5$  sec. Вполне целесообразно исследовать влияние инерционных масс привода двигатель-клеть при еще меньшем времени разбега до основной скорости вращения. Для  $t_{01} = 5$  sec и при всех остальных неизменных условиях и параметрах, что и в предыдущем случае, на рис. 11 представлены кривые поведения натяжения.

Здесь положительное влияние инерционных масс двигателя клети выявляется еще отчетливее как в переходном, так и в установившемся режимах. Наибольшее изменение натяжения имеет место в переходном режиме. Натяжение уменьшается примерно на 30% от своего первоначального значения при инерционных массах, вдвое увеличенных против маховых масс самого двигателя (кривая 1,  $\Theta = 2\Theta_n$ ). При меньших значениях инерционных масс изменение натяжения возрастает, принимая уже недопустимые значения. Наибольшее значение как в переходном, так и в установившемся режимах оно имеет при полном отсутствии маховых масс ( $\Theta = 0$ , кривая 4).

Амплитуда периодической составляющей (коэффициент перед последним членом правой части уравнения (19)) примерно обратно пропорциональна электромеханической постоянной времени  $\Theta$ , а значит и маховому моменту привода двигателя — клеть:

$$\frac{\alpha v_{02} m'_2}{T_m V \sqrt{1 + \theta^2 \beta^2}} \approx \frac{\alpha v_{02} m'_2}{T_m \theta \beta} \equiv \frac{1}{0} \equiv \frac{1}{CD^2}.$$

Если пойти на дальнейшее увеличение маховых масс двигателя клети и дополнительный маховик выбрать с трехкратным значением инер-

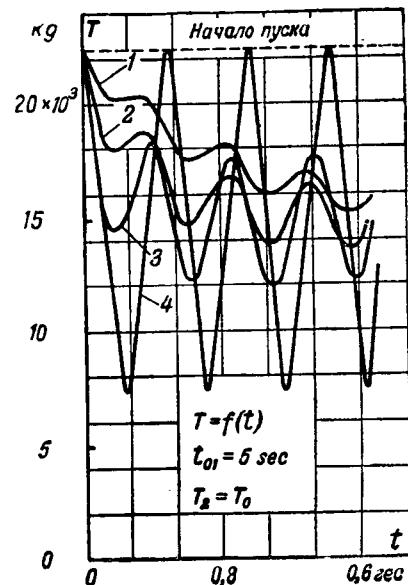


Рис. 11. Поведение натяжения при различных величинах инерционных масс двигателя клети ( $t_{01} = 5$  sec.).

ционных масс по сравнению с таковыми же самого двигателя ( $\Theta = 3\Theta_n$ ), то и для времени разбега  $t_{01} = 5$  sec можно получить вполне приемлемые результаты в отношении поведения натяжения.

**Выводы.** 1. Наличие предварительно устанавливаемого натяжения является обязательным для обеспечения благоприятного процесса прокатки и качества продукции.

2. Благоприятное протекание процесса прокатки как в переходном, так и в установившемся режимах может быть достигнуто при равенстве действующего момента и момента предварительно установленного с весьма малыми изменениями натяжения (этот режим имеет то преимущество, что он легко достижим в условиях эксплуатации).

3. Более благоприятное протекание процесса пуска (замедления) и установившегося режима прокатки возможно при увеличении (уменьшении) действующего момента двигателя моталки по сравнению с моментом первоначального натяжения. Однако, здесь следует отметить, что необходимая разница в этих моментах весьма мала по сравнению с их абсолютными значениями; точность в ее обеспечении должна быть очень велика, что для практического выполнения представляет определенные затруднения. Малые отклонения от требуемой разницы в этих моментах, незначительные по сравнению с их абсолютными значениями, могут привести к недопустимым искажениям ожидаемых результатов.

4. Время разбега двигателя клети в 10 sec. может быть обеспечено при весьма хороших показателях в отношении поведения натяжения. Вполне возможно получить еще меньшее время разбега, вплоть до 5 sec., при вполне удовлетворительных показателях в отношении поведения натяжения прокатываемой ленты. Дальнейшее снижение времени разбега лимитируется махо-

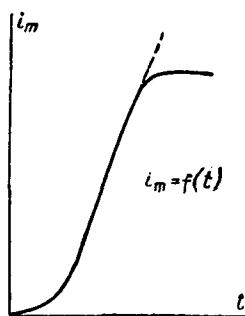


Рис. 12.

выми массами привода двигатель—моталка, всенарное снижение которых должно быть рекомендовано во всех случаях.

5. Влияние момента статического сопротивления валков (момента прокатки) на поведение натяжения как в переходном, так и в установившемся режимах незначительно.

6. Для получения наиболее благоприятных результатов в отношении натяжения процесс возбуждения генератора по своему характеру должен быть равномерным, т. е. нарастание тока возбуждения генератора и его э. д. с. должны в функции времени следовать линейному закону. Для этой цели вместо контроллерного реостата с большим числом ступеней целесообразно применить специальные схемы возбуждения.

7. Инерционные массы привода двигатель—клеть имеют положительное влияние на выравнивание натяжения прокатываемой ленты. Вполне целесообразно применение дополнительного маховика на валу двигателя клети, если необходимость в этом мероприятии будет (в количественном отношении) установлена соответствующими расчетами.

8. Благоприятное действие инерционных масс привода клети является, как это отмечалось выше, следствием того, что они вызывают заметное отставание скорости вращения двигателя по отношению к э. д. с. генератора. Это в свою очередь обусловливает замедленную выдачу прокатываемой ленты из валков клети, а значит, способствует уменьшению натяжения в начальном участке разбега системы.

Следует отметить, что подобный же по действию эффект можно получить и другим путем. Действительно, когда мы установили в настоящей работе, что равномерное возбуждение генератора является наиболее желательным, то сравнивали его с процессами, протекающими по законам простой экспоненциальной функции (рис. 6). Если же предположить, что процесс возбуждения генератора протекает согласно кривой I рис. 12, а двигатель моталки разбегается с тем же неизменным моментом, то возможно, что здесь будет получено желаемое поведение скорости вращения двигателя клети, при котором будет обеспечена благоприятная картина в отношении натяжения на начальном участке разбега. Однако, этот вопрос подлежит более детальному исследованию.

Нужно также отметить, что вопрос о выборе избыточного момента и точное поддержание его в действительных условиях эксплуатации имеет весьма важное значение для последних пропусков прокатки, для малых сечений прокатываемой ленты. В этом случае при сохранении неизменной величины удельного натяжения общее натяжение будет иметь сравнительно небольшие значения и влияние динамической составляющей окажется более ощутимым.

В отечественной и заграничной практике в схемы автоматического управления электроприводами станов холодной прокатки усиленно внедряются амплидины для осуществления быстродействующего регулирования и точного установления требуемых по заданному режиму величин.

В связи с этим необходима дальнейшая разработка теории переходных режимов электроприводов с упругой связью при учете действия регулирующих устройств.

В заключение автор считает долгом отметить большую помощь, оказанную инж. А. С. Филатовым и инж. Б. С. Кузиковым в расчетах и графическом оформлении настоящей работы.

#### Приложение 1. Вывод уравнения (8).

В ходе решения дифференциального уравнения (6) будем иметь:

$$y_1 C'_1 + y_2 C'_2 = 0, \quad (a)$$

$$y'_1 C'_1 + y'_2 C'_2 = c (T_m - \theta - T_m e^{-\frac{t}{T_m}} + \theta e^{-\frac{t}{\theta}}), \quad (b)$$

где  $y_1$  и  $y_2$  — частные интегралы неполного уравнения (3). После определения этих интегралов

$$C'_1 \cos \beta t + C'_2 \sin \beta t = 0, \quad (c)$$

$$-\beta C'_1 \sin \beta t + \beta C'_2 \cos \beta t = c (T_m - \theta - T_m e^{-\frac{t}{T_m}} + \theta e^{-\frac{t}{\theta}}). \quad (d)$$

Получим после решения относительно  $C'_1$  и  $C'_2$  и интегрирования

$$C_1 = \frac{c}{\beta} \left\{ \frac{T_m - \theta}{\beta} \cos \beta t + \frac{T_m^2 e^{-\frac{t}{T_m}}}{1 + T_m^2 \beta^2} (-\sin \beta t - T_m \beta \cos \beta t) - \frac{\theta^2 e^{-\frac{t}{\theta}}}{1 + \theta^2 \beta^2} (-\sin \beta t - \theta \beta \cos \beta t) \right\} + A;$$

$$C_2 = \frac{c}{\beta} \left\{ \frac{T_m - \theta}{\beta} \sin \beta t - \frac{T_m^2 e^{-\frac{t}{T_m}}}{1 + T_m^2 \beta^2} (T_m \beta \sin \beta t - \cos \beta t) + \frac{\theta^2 e^{-\frac{t}{\theta}}}{1 + \theta^2 \beta^2} (\theta \beta \sin \beta t - \cos \beta t) \right\} + B, \quad f$$

где  $A$  и  $B$  — постоянные интегрирования.

После подстановки найденных значений для  $C_1$  и  $C_2$  в уравнение (6) получается после очевидных преобразований искомое уравнение (8).

**Приложение 2.**

Дальнейшее упрощение полученной формулы (11) требует раскрытия отношения  $\frac{c}{\beta^2}$ . Воспользовавшись уравнениями (5) и (7), получим после очевидных преобразований:

$$\frac{c}{\beta^2} = \frac{(\alpha n_{01} - \Delta n_c) D_1 l_2}{l_1 D_{02} (T_m - \Theta)}.$$

Без ущерба в отношении точности можно принять:

$$\alpha n_{01} - \Delta n_c \approx \alpha n_{01}.$$

Поэтому

$$\frac{c}{\beta^2} = \frac{\alpha n_{02}}{T_m - \Theta}.$$

Учитывая это, получим после подстановки в уравнение (11) и ряда сокращений:

$$T = \frac{2 \pi \alpha M_{02} n_{02}}{60 \Delta l_0 (T_m - \Theta)} \left\{ \frac{T_m^2}{1 + T_m^2 \beta^2} \left( \cos \beta t - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) - \frac{\Theta^2}{1 + \Theta^2 \beta^2} \left( \cos \beta t - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) - \left( \frac{T_m - \Theta}{\beta} - \frac{T_m^3 \beta}{1 + T_m^2 \beta^2} + \frac{\Theta^3 \beta}{1 + \Theta^2 \beta^2} \right) \sin \beta t + \frac{375 (M_2 - M_{02})}{G D_{02}^2 c} (1 - \cos \beta t) \right\} + T_0$$

и далее:

$$T = \frac{2 \pi \alpha M_{02} n_{02}}{60 \Delta l_0 (T_m - \Theta)} \left\{ \frac{T_m^2}{1 + T_m^2 \beta^2} \left( \cos \beta t - \frac{\sin \beta t}{\beta T_m} - e^{-\frac{t}{T_m}} \right) - \frac{\Theta^2}{1 + \Theta^2 \beta^2} \left( \cos \beta t - \frac{\sin \beta t}{\beta \Theta} - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) + \frac{375 (M_2 - M_{02})}{G D_{02}^2 c} (1 - \cos \beta t) \right\} + T_0.$$

Произведя преобразование тригонометрических величин, входящих в состав предыдущей формулы, получим:

$$T = \frac{2 \pi \alpha n_{02} M_{02}}{60 \Delta l_0 (T_m - \Theta)} \left\{ - \frac{T_m \sin (\beta t - \varphi_3)}{\beta \sqrt{1 + T_m^2 \beta^2}} - \frac{T_m^2}{1 + T_m^2 \beta^2} e^{-\frac{t}{T_m}} + \frac{\Theta \sin (\beta t - \varphi'_3)}{\beta \sqrt{1 + \Theta^2 \beta^2}} + \frac{\Theta^2 e^{-\frac{t}{\Theta}}}{1 + \Theta^2 \beta^2} + \frac{375 (M_2 - M_{02})}{G D_{02}^2 c} (1 - \cos \beta t) \right\} + T_0.$$

Здесь

$$\varphi_3 = \operatorname{arctg} \beta t_m, \\ \varphi'_3 = \operatorname{arctg} \beta \Theta.$$

При дальнейшем аналогичном упрощении тригонометрических величин

$$T = \frac{2 \pi \alpha n_{02} M_{02}}{60 \Delta l_0 (T_m - \Theta)} \left\{ - \frac{(T_m - \Theta) \sin (\beta t - \varphi_4)}{\beta \sqrt{(1 + \Theta^2 \beta^2)(1 + T_m^2 \beta^2)}} - \frac{T_m^2 \beta^4}{1 + T_m^2 \beta^2} e^{-\frac{t}{T_m}} + \frac{\Theta^2 \beta^2}{1 + \Theta^2 \beta^2} e^{-\frac{t}{\Theta}} + \frac{375 (M_2 - M_{02})}{G D_{02}^2 c} (1 - \cos \beta t) \right\} + T_0.$$

Здесь

$$\varphi_4 = \operatorname{arctg} \frac{\beta (\Theta + T_m)}{1 - \beta^2 \Theta T_m}.$$

Вынесем за скобки величину  $\frac{1}{\beta^2}$ , а последний член, стоящий в фигурных скобках, вынесем из этих последних. Тогда после соответствующих замен величин  $\beta$  и  $c$  их развернутыми значениями по формулам (5) и (7), получим:

$$\frac{2 \pi M_{02} \alpha n_{02}}{60 \Delta l_0 (T_m - \Theta)} \frac{(M_2 - M_{02}) 375}{G D_{02}^2 c} = T_2 - T_0, \\ \frac{2 \pi \alpha n_{02} M_{02}}{60 \Delta l_0 \beta^2} = \frac{4 \pi M_{02} \alpha n_{02}}{60 \Delta l_0} \frac{2 \Delta l_0 l_2 l_2}{60 D_{02}} = \alpha v_{02} m'_2.$$

При выводе последней формулы принято во внимание, что

$$v_{02} = \frac{\pi D_{02} n_{02}}{60 l_2} — окружная скорость барабана моталки при скорости ее двигателя  $n_{02}$ ;$$

$$m'_2 = \frac{G D_{02}^2 l_2^2}{D_{02}^2 g} — масса системы двигатель — моталка, приведенная к окружности моталки.$$

Получим в окончательном виде:

$$T = \frac{\alpha v_{02} m'_2}{T_m - \Theta} \left\{ - \frac{(T_m - \Theta) \beta \sin (\beta t - \varphi_4)}{\sqrt{(1 + \Theta^2 \beta^2)(1 + T_m^2 \beta^2)}} - \frac{T_m^2 \beta^4}{1 + T_m^2 \beta^2} e^{-\frac{t}{T_m}} + \frac{\Theta^2 \beta^2}{1 + \Theta^2 \beta^2} e^{-\frac{t}{\Theta}} \right\} + (T_2 - T_0) (1 - \cos \beta t) + T_0. \quad (12)$$

**Литература**

1. Д. П. Морозов. К теории электромеханических процессов станов холодной прокатки. Вестник электропромышленности, № 3, 1944.

2. Д. П. Морозов. Анализ процессов ускорения и замедления электропривода станов холодной прокатки. Вестник электропромышленности, № 10—11, 1945.



# Переходные процессы электропривода в системе Леонарда с амплидином

Кандидат техн. наук К. С. БОБОВ

Военно-воздушная академия им. Жуковского

Автоматизированный регулируемый электропривод небольшой мощности широко применяется в различных областях техники, особенно в авиации, радиолокационных станциях и т. п.

Преимущественное распространение получила система Вард-Леонарда с применением амплидина в качестве главной машины, питающей приводной электродвигатель. Амплидин позволяет использовать очень эффективные по действию и простые по выполнению всякого рода потенциометрические схемы управления, а иногда электронные усилители с применением особых стабилизирующих обратных связей. В статье рас-

Изложена теория переходных процессов автоматизированного электропривода малой мощности, питающего амплидином, для наиболее распространенной схемы управления. Проанализирована устойчивость системы при переходных процессах. Установлено влияние стабилизирующих цепей амплидина на переходный процесс электропривода.

смотрены переходные режимы, определяющие основной характер работы системы Леонарда для наиболее простой и распространенной схемы управления, представленной на рис. 1.

Процесс возбуждения амплидина в схеме управления при выключенном электродвигателе. Для оценки свойств схемы управления целесообразно вначале рассмотреть процесс возбуждения амплидина, когда обмотка управления его приключается к неизменному по величине напряжению сети, а цепь двигателя разомкнута.

Электродвигущая сила по продольной оси  $E_d$  при переходном режиме, как и для установившегося состояния, пропорциональна току управления  $i_s$ . Однако, в отличие от установившегося состояния<sup>1</sup> при этом режиме необходимо принимать во внимание следующее равенство:

$$k_s i_s = E_d + T_q \frac{dE_d}{dt}. \quad (1)$$

Уравнение переходного режима для тока цепи управления согласно схеме рис. 1 имеет вид:

$$T_s \frac{di_s}{dt} + i_s = \frac{\epsilon U_c - \beta U_a}{R_s}, \quad (2)$$

где

$$R_s = r_s + \epsilon (1 - \epsilon) r_0 + \beta (1 - \beta) R_0. \quad (3)$$

Выражения (1) и (2) позволяют получить уравнение переходного режима в следующем виде:

$$T_s T_q \frac{d^2 U_a}{dt^2} + (T_s + T_q) \frac{dU_a}{dt} + \left(1 + \beta \frac{k_s}{R_s}\right) U_a = \epsilon \frac{k_s}{R_s} U_c. \quad (4)$$

В большинстве случаев постоянная времени цепи поперечной оси амплидина  $T_q$  значительно больше постоянной времени цепи управления  $T_s$ .

<sup>1</sup> Обозначения даны в конце статьи.

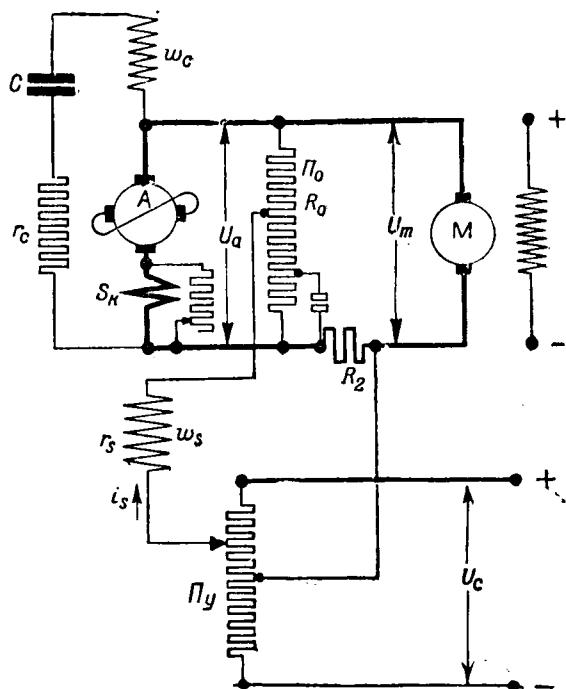


Рис. 1. Схема электропривода.

А—амплидин; М—электродвигатель;  $w_s$ —обмотка управления и  $w_c$ —стабилизирующая обмотка амплидина;  $\Pi_u$ —потенциометр обратной связи;  $\Pi_0$ —потенциометр управления;  $S_k$ —компенсационная обмотка амплидина;  $R_2$ —компенсирующее сопротивление; С и  $r_c$ —конденсатор и сопротивление стабилизирующей цепи.

При этом решение уравнения переходного режима, если положить  $T_s = 0$ , уравнения (4) будут:

$$U_a = U_{a0} \left[ 1 - e^{-\left(1 + \beta \frac{k_s}{R_s}\right) \frac{t}{T_q}} \right], \quad (5)$$

где

$$U_{a0} = \frac{k_s}{R_s} \frac{\epsilon}{1 + \beta \frac{k_s}{R_s}} U_c.$$

Равенство (5) показывает, что переходный процесс в схеме управления турелью имеет при указанных условиях апериодический характер и протекает значительно быстрее, чем в обычной схеме, когда схема управления не используется ( $\beta = 0$ ). Ускорение процесса будет тем значительное, чем больше  $\beta \frac{k_s}{R_s}$ . Схема управления приводом, таким образом, если учесть, что для амплидина в отличие от обычных машин отношение  $\frac{k_s}{R_s}$  очень велико, создает исключительно высокую форсировку возбуждения. Действие схемы равносильно уменьшению в  $1 + \beta \frac{k_s}{R_s}$  раз по-стоянной времени цепи поперечной оси  $T_q$ .

В общем случае решение уравнения (4) может представлять быстро затухающий колебательный процесс.

**Основные уравнения переходного режима электропривода.** Амплидина, работающий вхолостую при разомкнутой цепи электропривода, в схеме управления турелью согласно рассмотренному выше имеет всегда устойчивый переходной режим. Однако, если к зажимам амплидина присоединить электродвигатель, то его механическая инерция будет являться для электрической цепи некоторой электромеханической емкостью, и она может вызывать при переходных режимах колебания тока в главной цепи.

Для исследования переходных процессов необходимо рассмотреть дифференциальные уравнения для тока и напряжения отдельных цепей амплидина и двигателя. При составлении уравнений целесообразно принимать во внимание, как это делают обычно при рассмотрении переходных процессов, лишь переменные составляющие тока, напряжения и скорости вращения электропривода.

Нагрузочный момент на валу привода можно считать не зависящим от скорости вращения. При указанных условиях вращающий момент двигателя, обусловленный постоянной составляющей тока, всегда уравновешивает нагрузочный момент. На основании этого можно получить следующее уравнение для главной цепи двигателя:

$$U_a = \frac{1}{C_m} \int_0^t Id\tau + IR_m + L_m \frac{dI}{dt} + IR_2. \quad (6)$$

Электромеханическая емкость электродвигателя  $C_m$  обычно имеет очень большую величину и составляет десятые доли фарады.

Переходный режим для цепи продольной оси амплидина характеризуется следующим уравнением:

$$E_d = U_a + IR_d + L_d \frac{dI}{dt} + M_{ds} \frac{di_s}{dt}. \quad (7)$$

Последний член правой части уравнения (7) обычно чрезвычайно мал и им поэтому можно пренебречь.

Уравнение переходного режима для главной цепи системы получается на основании (6) и (7) в следующем виде:

$$E_d = \frac{1}{C_m} \int_0^t Id\tau + I(R_m + R_d + R_2) + (L_m + L_d) \frac{dI}{dt}. \quad (8)$$

В этом уравнении основную роль играют первые два члена правой части.

*Переходный режим для цепи поперечной оси амплидина:*

$$k_s i_s + KI = E_d + T_q \frac{dF_d}{dt}. \quad (9)$$

*Уравнение переходного режима цепи управления амплидина имеет вид:*

$$R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} = -\beta U_a - M_{ds} \frac{dI}{dt} + IR_2. \quad (10)$$

В уравнении (10) постоянный член  $\epsilon U_c$  в отличие от равенства (2) отсутствует потому, что принимаются в рассмотрение, как указано было выше, лишь переменные составляющие тока. В (10) учтено падение напряжения на компаундирующем сопротивлении  $IR_2$ , которое согласно схеме рис. 1 также воздействует на цепь управления.

Коэффициент взаимоиндукции  $M_{ds}$  положителен при перекомпенсации и отрицателен при недокомпенсации.

Индуктивность цепи якоря шунтового электродвигателя  $L_m$  при отсутствии смещения щеток очень незначительна. Точно также для цепи обмоток продольной оси амплидина при хорошей компенсации индуктивность  $L_d$  составляет очень небольшую величину. Поэтому, как это обычно делают при анализе переходных процессов в электроприводе, индуктивностью в главной цепи можно пренебречь.

При этих допущениях, и полагая в процессе

$$M_{ds} \frac{k_s}{R_s} C_m = \frac{M_{ds}}{R_s} C_m K \frac{\omega_s}{\omega_{dk}} = \frac{T_s}{\sigma_s} T_k,$$

из уравнений (8), (9) и (10) можно получить:

$$T_s T_q (T_m + T_d + T_2) \frac{d^3 I}{dt^3} + \left[ (T_m + T_2 + T_d) (T_s + T_q) + T_s (T_q - \Delta_s T_k) \right] \frac{d^2 I}{dt^2} + \left[ \left( 1 + \beta \frac{k_s}{R_s} \right) T_m - T_k - \nu T_2 + T_d + T_q + T_s \right] \frac{dI}{dt} + \left( 1 + \beta \frac{k_s}{R_s} \right) I = 0, \quad (11)$$

где

$$\Delta_s = 1 - \frac{1}{\sigma_s}, \quad \nu = \frac{k_s}{R_s} - \beta \frac{k_s}{R_s} - 1.$$

Как видно, переходный процесс системы электропривода описывается линейным дифференциальным уравнением третьего порядка, в котором коэффициенты для ненасыщенного состояния амплидина и для малых отклонений можно считать постоянными. В уравнении (11), как нетрудно видеть, основную роль играют постоянные времени  $T_m$ ,  $T_d$ ,  $T_q$  и  $T_k$ , а также параметры амплидина и схемы управления  $\beta$ ,  $\frac{k_s}{R_s}$  и  $R_3$ .

Постоянная времени цепи управления  $T_s$  по сравнению с постоянными  $T_q$ ,  $T_m$ ,  $T_d$  и  $T_k$  невелика. С достаточной точностью можно принять ее в (11) равной нулю. Тогда

$$T_q(T_m + T_d + T_2) \frac{d^3I}{dt^3} + \left[ \left(1 + \beta \frac{k_s}{R_s}\right) T_m - T_k - \nu T_2 + T_d + T_q \right] \frac{d^2I}{dt^2} + \left(1 + \beta \frac{k_s}{R_s}\right) I = 0. \quad (12)$$

Интересен режим заторможенного электродвигателя, амплидин при этом питает внешнюю цепь, состоящую из индуктивности  $L_m$  и сопротивления  $R_m$ . В этом случае  $C_m = \infty$  и  $R_3 = 0$  и

$$T_s T_q (L_d + L_m) \frac{d^3I}{dt^3} + [T_s T_q (R_m + R_d) + (L_d + L_m) (T_s + T_q)] \frac{d^2I}{dt^2} + + \left[ \left( T_q + T_s \right) (R_m + R_d) - \Delta_s T_s K + L_d + \left(1 + \beta \frac{k_s}{R_s}\right) L_m \right] \frac{dI}{dt} + \left[ \left(1 + \beta \frac{k_s}{R_s}\right) R_m + R_d - K \right] I = 0. \quad (13)$$

Как видно, переходный процесс в данном случае описывается линейным дифференциальным уравнением третьего порядка, коэффициенты которого в основном определяются сопротивлением главной цепи  $R_m + R_d$ , постоянными временем амплидина  $T_s$  и  $T_q$ , параметрами схемы управления  $\beta$  и  $\frac{k_s}{R_s}$  и в значительной мере степенью перекомпенсации амплидина  $K$ .

**Устойчивость работы электропривода при переходных режимах.** Одно из основных условий устойчивости системы при переходном процессе, как известно, соблюдается, если коэффициенты при производных уравнений (11) и (13) положительны или имеют одинаковый знак. Поэтому, если рассмотреть в уравнении (13) член при нулевой производной, а в уравнении (11) член при первой производной, то можно заключить, что значительная перекомпенсация в обоих случаях опасна. Коэффициент при первой производной в уравнении (13), если учесть значение члена  $\Delta_s T_s$ , положителен даже при очень большой перекомпенсации.

Требование о положительности коэффициента при нулевой производной в уравнении (13), как нетрудно заметить, соответствует условию отсутствия самовозбуждения амплидина при уста-

новившемся режиме, когда его внешняя цепь замыкается на сопротивление  $R_m$ . В согласии с этим условием также находится указание о необходимости значительного уменьшения перекомпенсации, если сопротивление нагрузки  $R_m$  мало, а указанная схема управления не используется ( $\beta = 0$ ).

Переходный процесс электропривода, описываемый однородным линейным дифференциальным уравнением третьего порядка (11), будет затухающим в том случае, если вещественные части корней соответствующего характеристического уравнения имеют отрицательное значение. Иначе говоря, при соблюдении условий Гурвица или Раяса.

Для уравнения (11) условия Гурвица могут быть записаны в следующем виде:

$$(T_m + T_2 + T_d)(T_q + T_s) + T_s(T_q - \Delta_s T_k) > 0, \quad (14)$$

$$\left[ \frac{1}{T_q} + \frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_m + T_d + T_2} - \frac{\Delta_s T_k}{T_q(T_m + T_2 + T_d)} \right] \times \left[ T_m - \frac{T_k - T_q - T_s - T_d + \nu T_2}{1 + \beta \frac{k_s}{R_s}} \right] > 1 \quad (15)$$

и, поскольку коэффициенты при третьей и нулевой производных положительны, и как следствие из первых двух условий, получаем:

$$\left(1 + \beta \frac{k_s}{R_s}\right) T_m - T_k - \nu T_2 + T_d + T_q + T_s > 0. \quad (16)$$

Условия (15) и (16) показывают, что выбор компаундирующего сопротивления  $R_3$  в соответствии с неравенством

$$\left(1 + \beta \frac{k_s}{R_s}\right) R_m < \nu R_2$$

приводит к незатухающим колебаниям, даже при незначительной перекомпенсации.

Условие (14) соблюдается даже при сравнительно большой перекомпенсации. Поэтому величина первого множителя условия (15) определяется в основном членом  $\frac{1}{T_s}$  и в меньшей

мере членом  $\frac{1}{T_q}$ .

При достаточно большой перекомпенсации и  $R_2 = 0$  условие (15) можно заменить следующим приближенным:

$$\left( \frac{1}{T_s} + \frac{1}{T_q} \right) \left( T_m - \frac{T_s}{1 + \beta \frac{k_s}{R_s}} \right) > 1. \quad (17)$$

Как видно, увеличение постоянной времени  $T_s$  может вызвать нарушение условия (17) в том случае, когда разность  $T_m - T_k \frac{1}{1 + \beta \frac{k_s}{R_s}}$  со-

ставляет величину, соизмеримую с постоянной  $T_s$ . Однако, на практике это почти невозможно, так как постоянные  $T_m$  и  $T_k$  значительно больше  $T_s$ , и разность их практически никогда не доводится до нуля из-за опасности нарушения

устойчивости, когда при возможных случайных изменениях постоянных  $T_m$  и  $T_k$  указанная разность станет отрицательной. Поэтому изменения постоянных  $T_s$  и  $T_q$  в довольно широких пределах не вызывают нарушения устойчивости.

Нетрудно теперь понять, что основным является условие (16), согласно которому коэффициент при производной первого порядка уравнения (12) или, что то же самое, второй множитель в условии (15) должны быть положительными. В условии (16) постоянная времени  $T_s$ , как величина сравнительно малая, не играет существенной роли.

При уменьшении постоянных  $T_m$ ,  $T_s$ ,  $T_d$  и особенно  $T_q$  частота собственных колебаний системы, как это следует из уравнения (12), увеличивается, что желательно для повышения маневренности привода. С этой точки зрения применение компаундирующего сопротивления  $R_2$  нежелательно и целесообразно иметь член  $\beta \frac{k_s}{R_s}$  достаточно большим.

При значительном напряжении на зажимах амплидина магнитная система насыщается, что вызывает значительное уменьшение коэффициентов  $k_s$  и  $K$ . Кроме того, при этом двигатель вращается с большой скоростью, вследствие чего эффективное сопротивление цепи якоря его  $R_m$  из-за влияния коммутируемых секций значительно увеличивается. Все это, как нетрудно заметить из (11) и (12), значительно повышает устойчивость системы при переходных процессах.

**Влияние стабилизирующей цепи.** Условие устойчивости (16) не соблюдается, как было указано, при значительной перекомпенсации. Для устранения неустойчивых колебаний, появляющихся при возможных нарушениях условия (16), применяют стабилизирующую цепь, приключенную к зажимам амплидина. Аналогично цепи двигателя она состоит из конденсатора и сопротивления.

Появляющийся в стабилизирующей цепи при переходном режиме ток протекает по особой стабилизирующей или так называемой антишунтовой обмотке, расположенной в продольной оси амплидина, и меняется примерно по такому же закону, как и ток в главной цепи. Стабилизирующая обмотка включается так, что ампервитки ее оказывают действие на магнитный поток управления, обратное действию тока главной цепи при перекомпенсации. Таким образом, при переходном режиме эффект стабилизирующей обмотки оказывается равноценным уменьшению перекомпенсации амплидина. При установившемся режиме ток в стабилизирующей обмотке отсутствует и амплидин имеет нормальную перекомпенсацию.

При переходном режиме для стабилизирующей цепи справедливо следующее уравнение:

$$U_a = i_c R_c + \frac{1}{C} \int_0^t i_c d\tau + L_c \frac{di_c}{dt} - M_{dc} \frac{dI}{dt} - M_{cs} \frac{di_s}{dt}. \quad (18)$$

В уравнении (18) основную роль играют два первых члена правой части. Поэтому, если подобрать параметры стабилизирующей цепи так, чтобы соблюдалось равенство

$$CR_c = C_m R_m = T_m, \quad (19)$$

то токи главной и стабилизирующей цепей будут меняться примерно по одинаковому закону и между величинами их будет справедливо следующее соотношение:

$$\frac{I}{i_c} = \frac{R_c}{R_m} = \frac{C_m}{C}.$$

На основании этого можно получить следующее:

$$L_c \frac{di_c}{dt} - M_{dc} \frac{dI}{dt} = L_c \left(1 - \frac{w_{dk}}{w_c} \frac{C_m}{C}\right) \frac{di_c}{dt} = \Delta_c L_c \frac{di_c}{dt}, \quad (20)$$

где

$$\Delta_c = 1 - \frac{w_{dk}}{w_c} \frac{C_m}{C}.$$

Коэффициент  $\Delta_c$  выбирается по величине таким, чтобы он был близок к нулю при наибольшей возможной на практике перекомпенсации. Поэтому член  $\Delta_c L_c \frac{di_c}{dt}$  ничтожен по сравнению с первыми двумя членами правой части уравнения (18).

Электродвижущая сила самоиндукции в цепи управления  $L_s \frac{di_s}{dt}$ , согласно по равенству (10), обычно имеет меньшее значение, чем падение напряжения  $i_s R_s$  и составляет небольшую часть напряжения  $\beta U_a$ . На основании этого, и поскольку число витков стабилизирующей обмотки  $w_c$  не очень сильно отличается от числа витков обмотки управления  $w_s$ , можно считать член  $M_{cs} \frac{di_s}{dt}$  также небольшим по сравнению с величиной напряжения  $U_a$  и с остальными членами правой части уравнения (18).

Таким образом, можно считать, что в стабилизирующей цепи, как и в цепи электродвигателя, основную роль играют емкость и сопротивление.

В этом случае уравнения переходного режима для цепи поперечной оси амплидина и для цепи управления с учетом влияния стабилизирующей цепи будут иметь следующий вид:

$$k_s i_s + KI - k_c i_c = k_s i_s + (K - K_c)I = k_s i_s + K_0 I = E_a + T_a \frac{dE_a}{dt}, \quad (21)$$

$$-\beta U_a = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + M_{ds} \frac{dI}{dt} - M_{cs} \frac{di_c}{dt} = R_s i_s + -L_s \frac{di_s}{dt} + M_0 \frac{dI}{dt}, \quad (22)$$

где

$$k_0 = K - K_c = k \left(1 - \frac{K_c}{K}\right) = K \left(1 - \frac{w_c}{w_{dk}} \frac{C_m}{C}\right),$$

$$M_0 = M_{ds} \left(1 - \frac{w_c}{w_{dk}} \frac{C_m}{C}\right) = M_{ds} \left(1 - \frac{K_c}{k}\right).$$

Как видно, уравнения (11) и (13) остаются в силе и в данном случае с тем лишь отличием, что в них необходимо ввести коэффициенты  $M_0$  и  $k_0$  взамен  $M$  и  $K$ .

При заданном числе витков стабилизирующей обмотки изменение в некоторых пределах емкости и особенно сопротивления стабилизирующей цепи несколько нарушит идентичность законов изменения токов в главной и стабилизирующей цепях. В основном его влияние скажется на результирующий коэффициент перекомпенсации  $K_0$ . Это можно заметить, составив уравнение переходного процесса системы для общего случая, когда  $T_m \neq T_c$  и  $T_s = 0$ :

$$\begin{aligned} T_c T_q (T_m + T_d) \frac{d^3 I}{dt^3} + \left\{ T_c \left[ 1 + \beta \frac{k_s}{R_s} \right] T_m - \right. \\ \left. - T_k + T_d + T_q \right\} + T_q (T_m + T_d) + k_c C T_m \frac{d^2 I}{dt^2} + \\ + \left[ \left( 1 + \beta \frac{k_s}{R_s} \right) (T_m + T_c) - T_k + T_d + T_q + k_c C \right] \frac{dI}{dt} + \\ + \left( 1 + \beta \frac{k_s}{R_s} \right) I = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Как видно, коэффициенты при производных первого и второго порядка в уравнении (23) значительно больше, чем в уравнении (16).

Устойчивость системы в этом случае будет, как и ранее, определяться знаком коэффициентов при производных первого и особенно второго порядка.

При отсутствии стабилизирующей цепи условия устойчивости нарушались при соотношении  $\left( 1 + \beta \frac{k_s}{R_s} \right) \cdot T_m - T_k + T_d + T_q < 0$ . Включение стабилизирующей цепи может сделать систему устойчивой при указанном соотношении в том случае, если будут соблюдены условия

$$T_c \left[ \left( 1 + \beta \frac{k_s}{R_s} \right) T_m - T_k + T_d + T_q \right] + T_q (T_m + T_d) + k_c C T_m > 0, \quad (24)$$

$$\left( 1 + \beta \frac{k_s}{R_s} \right) (T_m + T_c) - T_k + T_d + T_q + k_c C > 0. \quad (25)$$

Последнее соотношение имеет место всегда при соблюдении условия (24) и если постоянные  $T_c$  и  $T_m$  не очень отличаются друг от друга. Условие (24) может нарушиться, если при отрицательном значении выражения, заключенного в квадратные скобки, увеличить сопротивление стабилизирующей цепи и постоянную времени  $T_c$ , оставляя при этом величину емкости неизменной. Наоборот, изменение в некоторых пределах только одной емкости стабилизирующей цепи в любую сторону, если учесть сравнительно небольшую величину члена  $(T_m + T_d) T_q$  в условии (24), не может нарушить условия устойчивости, если они ранее соблюдались, или перевести систему из неустойчивого состояния в устойчивое.

Лишь при значительном уменьшении емкости стабилизирующей цепи  $C$ , когда  $T_c < T_m$ , второе условие может нарушиться и система будет неустойчивой.

Из условий (24) и (25) можно получить следующее:

$$-T_c T_k + k_c C T_m = -T_c R_m \left( K - k_c \frac{R_m}{R_c} \right) = -T_c K_0 C_m, \quad (26)$$

$$-T_k + k_c C = -C_m \left( K - k_c \frac{C}{C_m} \right) = -C_m K_0. \quad (27)$$

Система будет безусловно устойчивой, когда

$$\left( 1 + \beta \frac{k_s}{R_s} \right) R_m > K_0, \quad (28)$$

$$\left( 1 + \beta \frac{k_s}{R_s} \right) (T_m + T_c) > C_m \cdot K_0. \quad (29)$$

Неравенства (24) и (25) показывают, что нельзя выбирать постоянную времени  $T_c$  стабилизирующей цепи значительно меньше  $T_m$ . Нетрудно также видеть, что увеличение момента инерции привода и, следовательно, электромеханической емкости  $C_m$ , а также уменьшения сопротивления  $R_m$  может нарушить устойчивость системы.

Если принять  $T_m = T_c$ , то  $k_0 = k'_0$ . Кроме того, принимая  $k_0 = 0$ , получим следующее:

$$\frac{K}{k_c} = \frac{w_{dk}}{w_c} = \frac{R_m}{R_c} = \frac{C}{C_m}. \quad (30)$$

Как видно, при указанных условиях и при заданном сравнительно небольшом числе витков стабилизирующей обмотки  $w_c$  необходимо выбирать емкость конденсатора стабилизирующей цепи значительной и тем больше, чем выше установлена перекомпенсация  $K$ , при которой  $K_0 = 0$ .

Значение перекомпенсации  $K$ , при которой соблюдается условие (30) и  $K_0 = 0$ , должно быть примерно в два раза меньше максимально возможной перекомпенсации амплидина  $K_{\max}$ .

**Расчетные и экспериментальные данные.** Для подтверждения теоретических положений были проведены испытания системы. Данные амплидина:  $P = 530$  Вт,  $U = 60$  В,  $I = 8,8$  А,  $R_d = 0,48$  Ом,  $r_s = 25$  Ом. Электродвигатель—независимого возбуждения с номинальной мощностью 0,5 л.с. и скоростью вращения  $n = 4200$  об/мин, соответствующей холостому ходу при  $U = 60$  В. В системе использована схема управления с данными:  $r_0 = 90$  Ом,  $R_0 = 140$  Ом.

На основании экспериментальных характеристик амплидина и двигателя получены следующие данные:  $k_0 = 2500$ ,  $R_s = 81$  Ом (при  $\beta = 0,35$  и  $\epsilon = 0,5$ ),  $T_q = 0,05$  с,  $T_s = 0,01$  с,  $R_m = 0,4$  Ом,  $C_m = 0,17$  Ф,  $T_m = 0,07$  с,  $T_d = 0,08$  с,  $L_m = 0,0015$  Гн,  $L_d \approx 0,0004$  Гн.

Оценивая величину постоянных систем, можно получить, что условие устойчивости (15) не соблюдается, когда нарушено соотношение (16). При  $\beta = 0,35$  это будет иметь место, если

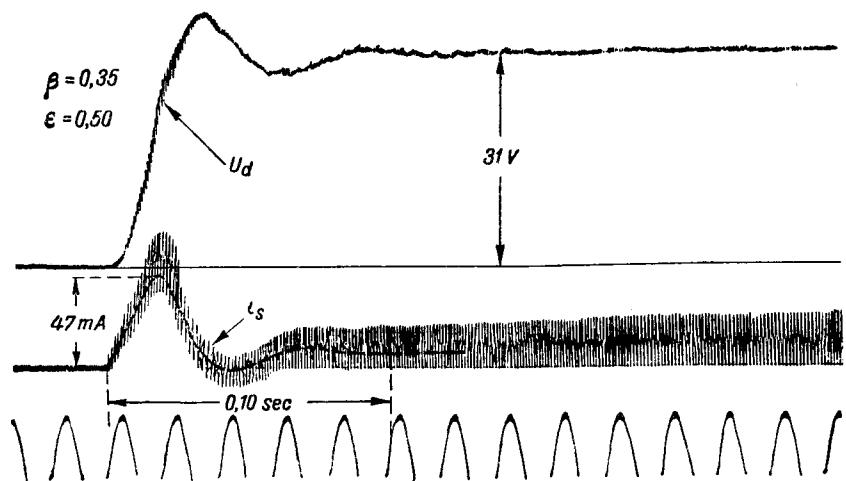


Рис. 2. Процесс возбуждения амплидина при холостом ходе и выключенном электродвигателе.

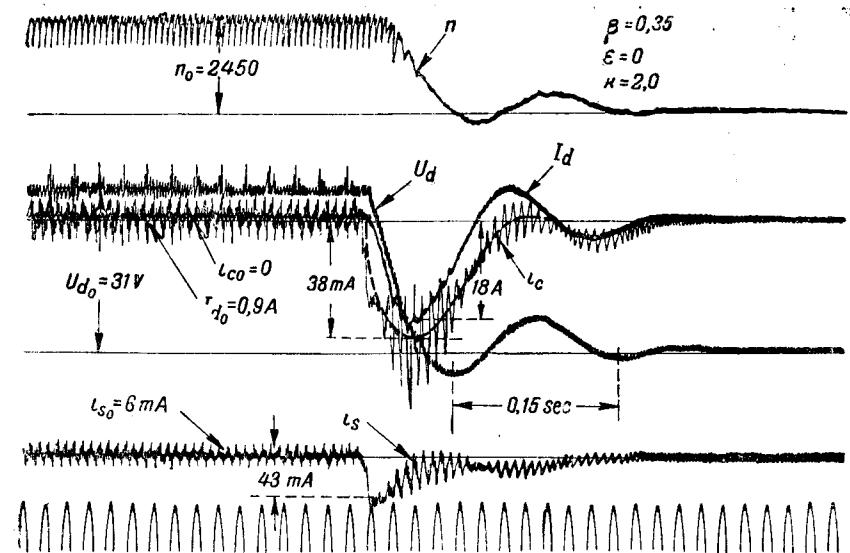


Рис. 4. Переходный процесс электропривода со стабилизирующей цепью.

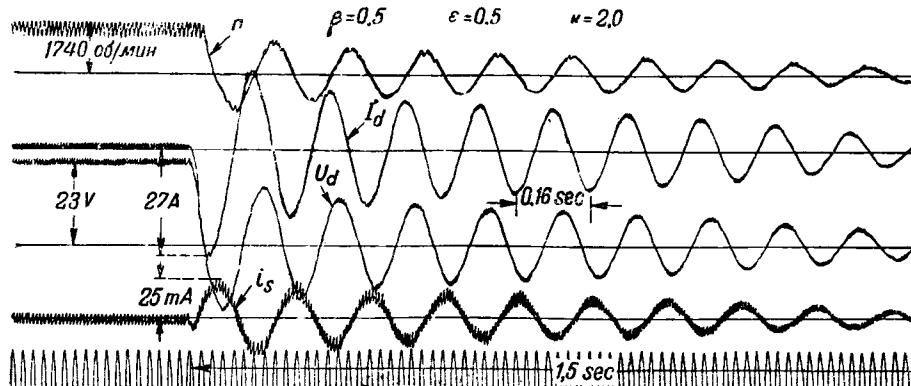


Рис. 3а. Переходный процесс электропривода без стабилизирующей цепи,  $\beta=0.5$ .

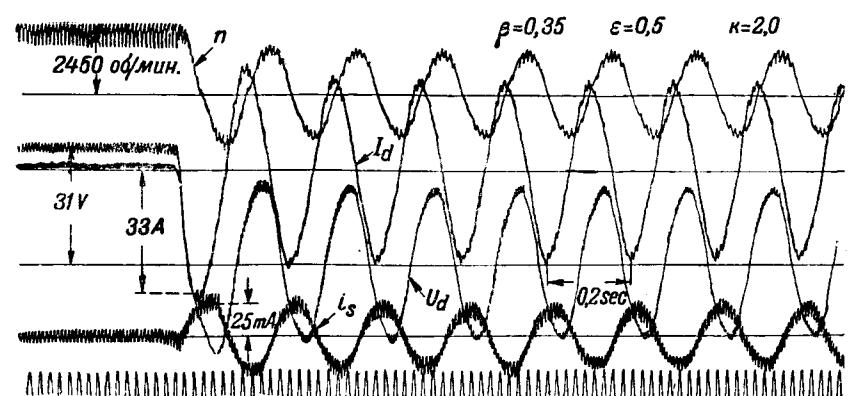


Рис. 3б. Переходный процесс электропривода без стабилизирующей цепи,  $\beta=0.35$ .

перекомпенсация устанавливается такой, что  $T_k > 0,8$  sec ( $K > 4,7$ ). Включение стабилизирующей цепи с данными  $R_c = 350 \Omega$ ,  $C = 150 \mu F$ ,  $k_c = 4500$  позволяет в этом случае увеличить перекомпенсацию почти в два раза, не нарушая условий устойчивости.

Процесс возбуждения иллюстрирует осциллограмма рис. 2. Как видно, амплидин возбуждается при использовании указанной схемы управления очень быстро — практически мгновенно.

Осциллограммы рис. 3 определяют переходный процесс электропривода при  $K=2,0$  для случаев, когда  $\beta=0,5$  и  $\beta=0,35$ . Как видно, во втором случае получается незатухающий переходный процесс. Переходный процесс перейдет в затухающий, если включается стабилизирующая цепь с данными  $R_c = 350 \Omega$ ,  $C = 150 \mu F$ ,  $k_c = 4500$  (рис. 4).

**Выводы.** 1. Переходные процессы системы электропривода с амплидином могут иметь неустойчивый характер лишь при большой перекомпенсации и значительном по величине компаундирующем сопротивлении. В этом случае имеет место также в установившемся режиме явление самовозбуждения системы.

2. Применение компаундирующего сопротивления равноценно в установившемся режиме увеличению перекомпенсации амплидина, но при переходном режиме, кроме того, оно вызывает уменьшение частоты собственных колебаний системы, что снижает маневренность привода.

3. Применение в амплидине стабилизирующей обмотки, обтекаемой током цепи, содержащей конденсатор и сопротивление и приключенной к зажимам амплидина, позволяет создать при переходном режиме эффект уменьшения перекомпенсации амплидина и благодаря этому повысить устойчивость системы.

#### Принятые обозначения

- $T_q$  — постоянная времени цепи поперечной оси амплидина.  
 $k_s$  — коэффициент, определяемый наклоном характеристики холостого хода.  
 $U_c$  — напряжение сети, к которой присоединен потенциометр управления.  
 $U_g$  — напряжение на зажимах амплидина.  
 $\epsilon$  и  $\beta$  — коэффициенты, определяющие положения точек присоединения обмотки управления, соответственно к потенциометрам управления и обратной связи.  
 $T_s$  — постоянная времени цепи управления.  
 $R_s$  — эффективное сопротивление цепи управления.  
 $L_s$  — индуктивность цепи управления.  
 $r_0$  — сопротивление потенциометра управления.  
 $R_0$  — сопротивление потенциометра обратной связи.  
 $r_s$  — сопротивление обмотки управления.

- $C_m$  — электромеханическая емкость электродвигателя.  
 $I$  — ток главной цепи.  
 $R_m$  и  $L_m$  — сопротивление и индуктивность цепи якоря двигателя.  
 $R_2$  — компаундирующее сопротивление.  
 $R_d$  — сопротивление цепи продольной оси амплидина.  
 $L_d$  — результирующий коэффициент самоиндукции обмоток главной цепи амплидина в продольной оси.  
 $M_{ds}$  — коэффициент взаимоиндукции между обмотками продольной оси и обмоткой управления.  
 $K$  — коэффициент, характеризующий перекомпенсацию амплидина (при недокомпенсации он отрицателен).  
 $T_m$  — постоянная времени разбега электродвигателя.  
 $T_d$ ,  $T_2$ ,  $T_k$  — коэффициенты ( $T_d = R_d C_m$ ,  $T_2 = R_2 C_m$ ,  $T_k = K C_m$ ).  
 $w_s$  — число витков обмотки управления.  
 $w_{dk}$  — результирующее число витков обмоток главной цепи амплидина, соответствующее перекомпенсации  $K$ .  
 $\sigma_s$  — коэффициент магнитного рассеяния для обмоток управления.  
 $i_o$  — ток стабилизирующей цепи.  
 $R_s$  — сопротивление стабилизирующей цепи.  
 $C$  — емкость конденсатора стабилизирующей цепи.  
 $L_c$  — индуктивность стабилизирующей цепи.  
 $M_{dc}$  — коэффициент взаимоиндукции между обмотками амплидина главной цепи и стабилизирующей обмоткой.  
 $M_{cs}$  — коэффициент взаимоиндукции между стабилизирующей обмоткой и обмоткой управления.  
 $w_c$  — число витков стабилизирующей обмотки.  
 $k_c$  — коэффициент, определяющий наклон характеристики, представляющей зависимость э. д. с. амплидина от тока протекающего по стабилизирующей обмотке.  
 $K_c$  — коэффициент, приведенный к главной цепи.

#### Литература

1. М. И. Романов. Теория работы амплидина и области его применения. Электричество, № 11—12, 1944.
2. В. С. Кулебакин. Основные статические характеристики амплидинов генераторов. Известия Академии наук СССР, Отд. техн. наук, № 6, 1945.
3. В. П. Никикин и Н. П. Кунинский. Электропривод с амплидином, питаящим двигатель механизма. Известия Академии наук СССР, Отд. техн. наук № 7—8, 1944.
4. Я. С. Эпштейн. Переходные процессы в амплидине. Вестник электропромышленности, № 1—2, 1945.
5. В. К. Попов и Ю. А. Сабинин. Переходные режимы ионного электропривода с учетом влияния самоиндукции. Известия Академии наук СССР, Отд. техн. наук № 3, 1945.
6. Д. П. Морозов. О колебательных процессах в электроприводах. Электричество, № 8, 1945.
7. T. D. Graybeal. Steady-State theory of the amplidyne generator. El. Eng., Oct. 1942.
8. L. A. Zahorsky. The amplidyne generator applied to speed-controlled electric gun turrets for aircraft. El. Eng., May, 1945.
9. J. D. Thompson. Electric gun turrets for aircraft El. Eng., November, 1944.



# К обобщению теории движения автоматизированного электропривода

Доктор техн. наук проф. В. К. ПОПОВ

Ленинградский политехнический институт им. Калинина

**1. Введение.** Теория электропривода во всей ее полноте охватывает большой комплекс сложных вопросов. Весьма существенной ее частью является теория движения электрифицированных агрегатов. Рассмотрению этого ее раздела посвящена данная работа.

Она совершенно не затрагивает вопроса структуры учебных курсов и руководств по приводу.

Теория движения электропривода анализирует законы движения комплексных электрифицированных агрегатов под действием движущих и тормозящих сил, создаваемых рабочими машинами и вращающими их электродвигателями. Таким образом, эта часть теории электропривода является расширением в определенном направлении общей теории машин и механизмов.

Содержание теории движения электропривода заключается в анализе законов изменения во времени различных величин, характеризующих работу и поведение электроприводов, сочлененных с исполнительными механизмами. Характерными для динамических режимов величинами являются: скорость вращения агрегата (число оборотов в минуту)  $n$ , вращающий момент двигателя  $M_d$ , сила тока двигателя  $I$ , мощность двигателя и рабочей машины  $P_d$  и  $P_m$ , пройденный механизмом или каким-либо его рабочим органом, путь  $L$ . Зависимости  $n, M, I, L = f(t)$  носят название нагрузочных диаграмм. Нагрузочные диаграммы характеризуют протекание переходных режимов. Анализ этих диаграмм направлен, прежде всего, к выяснению быстроты, плавности, точности и устойчивости протекания переходных процессов (пуска, торможения, переворота, перехода от одной нагрузки к другой, регулирования от одной ступени скорости к иной) в целях оценки производительности, точности и качества работы исполнительных механизмов.

Основной и конечной целью теории движения электропривода должно быть установление законов изменения отдельных величин в переход-

ных предпосылки к созданию обобщенной теории движения электропривода автор выдвигает схему классификации электроприводов по принципу характерных особенностей их переходных режимов. Классификация проводится по следующим основным признакам: 1) характер изменения статического момента рабочей машины; 2) машины массы системы двигатель—машина; 3) тип передачи и возможная степень изменения передаточного числа за счет кинематической связи от двигателя к машине; 4) механические характеристики двигателя; 5) свойства управляющей и регулирующей аппаратуры (Дискуссию по статье см. на стр. 74).

В кратчайший срок и при достижение на базе этих законов наибольших возможных рациональных ускорений и замедлений или точного осуществления какого-либо графика работы, т. е. выполнения производственных или оперативных процессов

том с нужной точностью, плавностью и устойчивостью. Выбранные мощности, параметры, механические характеристики двигателей и примененные комплексы аппаратуры управления, передаточные числа и типы передач от двигателей к механизмам должны отвечать этим условиям.

Необходимость обобщения теории движения электропривода вытекает из тех многочисленных и разнообразных задач, которые ставятся электроприводу различными производственными и транспортными машинами, военной техникой и морским делом. Решение многих вопросов оказывается аналогичным для рабочих машин разных отраслей промышленности, транспорта, военного и морского дела. Единая теория движения электропривода, обобщая опыт различных областей техники, существенно упрощает решение практических задач, показывает пути к новым конструкциям рабочих машин, дает возможность повышать производительность рабочих агрегатов и позволяет улучшить качество продукции при экономном расходовании энергии.

**Основные предпосылки к обобщению теории движения электропривода.** Некоторая сложность обобщенной структуры теории движения электропривода кажется на первый взгляд обусловленной тем, что она должна охватить, по существу, все без исключения типичные производственные и транспортные машины-орудия и автоматизируемые исполнительные механизмы морской техники и военного дела. Теоретически число возможных подлежащих рассмотрению вариантов характерных переходных режимов электрифицированных агрегатов

$$N = acbd,$$

где  $a$  — число типичных приводимых электродвигателями рабочих машин;  $b$  — число существующих отличных по электромагнитным процессам типов электродвигателей;  $c$  — число возможных вариантов, отличающихся один от другого режимов работы агрегатов;  $d$  — число характерных по принципам действия комплексов автоматической аппаратурой.

Поведение комплексного электрифицированного агрегата зависит прежде всего от правильности сочетания механических характеристик электродвигателей и рабочих машин с учетом условий устойчивости.

Движение рабочих агрегатов в целом определяется самим производственным процессом и кинематикой рабочей машины, числом и характером ее кинематических звеньев, характером связи рабочей машины с электродвигателем и их маховыми массами, рабочим процессом двигателя, влиянием аппаратуры управления и регулирования. В динамике непрерывно чувствуется взаимное влияние характеристик двигателя на процесс и рабочего процесса на поведение двигателя.

Рассмотрение всего количества режимов, охватываемых вышеприведенным выражением для  $N$ , конечно, невозможно, да по существу и не нужно, так как не всякая рабочая машина может сочетаться с любым электромагнитным типом двигателя или нуждаться в таком сочетании. Так, для регулируемых прокатных станов и кранов совершенно не могут быть использованы синхронные двигатели. Для нерегулируемых электроприводов почти на 100% оказываются неэкономичными двигатели постоянного тока и т. д. Однако, при учете этих обстоятельств число потребных типичных решений уравнений движения электропривода все же оказывается очень большим. Оно, естественно, должно быть сведено в определенную систему.

Нужно прежде всего отметить, что деление переходных режимов, характеризуемых, как выше уже отмечено, нагрузочными диаграммами, по отраслям промышленности, по производственным процессам и, наконец, по свойствам обрабатываемых материалов, совершенно не отвечало бы целям поставленной задачи — обобщению вопросов теории движения электропривода. В самом деле, по характеру ведения процесса требования, предъявляемые бумагоделательной машине, совпадают, например, с требованиями процесса непрерывных сортовых станов или непрерывного конвейера при производстве стекла в специальных печах. Далее, совпадает, например, методика решения теоретических вопросов электропривода для некоторых машин горной и нефтедобывающей промышленности. Точно также обобщение вопросов теории движения электропривода не может быть произведено на базе подразделения нагрузочных диаграмм по длительности режимов работы — по трем основным видам (длительный, кратковременный и повторно-кратковременный режимы); во всех этих трех случаях в работу агрегата входит пуск,

установившееся, на тот или другой период, движение, торможение или остановка, и только роль каждого из этих режимов в отношении нагревания двигателя и длительности динамических напряжений в системе будет различной.

Деление переходных процессов по режимам пуска, торможения, приема и сброса нагрузки и т. д. может быть использовано лишь для последующих подразделений, относящихся уже к определенному типу электродвигателей, так как, например, пуск агрегата с синхронным двигателем по характеру своих электромагнитных процессов имеет мало общего с пуском агрегата с двигателем постоянного тока.

Поведение электрифицированных рабочих агрегатов определяется процессами, связанными: 1) с двигателем, 2) с рабочей машиной и 3) с процессом передачи энергии от двигателя к рабочей машине. Оно зависит прежде всего от свойств рабочих машин и вращающих их электродвигателей. Поэтому в основу анализа и синтез вопросов теории движения электропривода должны быть положены некоторые главнейшие характеристики рабочих машин и типичные механические характеристики электродвигателей.

Конкретизируя, мы приходим к заключению, что характер переходных режимов рабочих агрегатов определяется: 1) характером изменения статического момента рабочей машины в зависимости от тех или других факторов; 2) маховыми массами системы двигатель-машина и возможной степенью их изменения за счет кинематической схемы соответствующих передач и т. п.; 3) типом передачи от двигателя к рабочей машине и характером изменения потерь на трение в ней, ролью гнезд трения рабочей машины; 4) механическими характеристиками двигателя; 5) свойствами управляющей и регулирующей аппаратуры.

Производственные процессы выполняются рабочими машинами. Электропривод служит лишь для передачи им механической энергии путем преобразования ее из электрической. Поэтому обобщать теорию движения электропривода следует в первую очередь по признаку основных свойств исполнительных механизмов.

Несмотря на исключительное разнообразие механизмов, все они имеют ряд общих в отношении моментов сопротивления свойств. Эти свойства должны рассматриваться в первую очередь в разрезе статики, а затем в условиях динамики. При этом необходимо исходить из общего уравнения движения электрифицированного агрегата, учитывающего: 1) режимы пуска, торможения и другие; 2) реактивный и потенциальный статический момент  $M_s$ ; 3) возможность изменения приведенного момента инерции системы  $J$  в зависимости от угла поворота механизма

Обобщенное уравнение движения привода при этом получает вид:

$$\pm M_d \pm M_m = J_{(a)} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_{(a)}}{dt}.$$

Решение приведенного уравнения зависит, в первую очередь, от вида входящих в него функций  $M_d$  и  $M_m$ . Поэтому классификацию переходных режимов следует производить прежде всего по характеру статических моментов механизма. Особенности статического момента рабочей машины являются основным фактором, определяющим производственный процесс работы электрифицированного агрегата.

**Подразделение исполнительных механизмов по статическому моменту.** Все исполнительные механизмы современной техники могут быть объединены в пять типичных классов по характеру изменения статического момента. Статический момент исполнительного механизма, независимо от роли механизма, определяется лишь скоростью  $n$ ,  $v$ , пройденным механизмом или каким-либо рабочим органом путем  $L$  и временем  $t$ . Эти основные возможные зависимости укладываются в пять различных классов: 1)  $M_m = \text{const}$ ; 2)  $M_m = f(v)$ ; 3)  $M_m = \varphi(L)$ ; 4)  $M_m = \psi(v, L)$ ; 5)  $M_m = f(t)$ .

Последний класс содержит механизмы: 1) работающие под воздействием возмущающей силы, которая изменяется во времени по известному закону; 2) механизмы со сложным видом возмущающей функции или которым присущи случайности в процессе (например, следящие приводы, дефибреры, в которых существо вносят внезапные изменения в процесс дробления дерева, глиномялки, шаровые мельницы) или же с очень сложной кинематикой, не поддающейся простому учету. Очевидно, методика решения дифференциальных уравнений движения электропривода для каждого упомянутого выше класса рабочих машин будет различна. Это и является основанием для главнейшего распределения переходных режимов по характеру изменения статического момента рабочих машин. Дальнейшее подразделение классов по виду функции, к примеру  $M_m = f(v)$ , практически оказывается часто излишним.

**Влияние на движение рабочих агрегатов их кинематики и гнезд трения.** Момент сопротивления рабочей машины складывается из моментов статического и динамического. Динамическая составляющая момента двигателя (или короче — динамический момент) является результатом алгебраического суммирования статического момента и момента двигателя. Однако, ускорение или замедление электрифицированного агрегата, а стало быть и характер изменения динамического момента сильно зависят от кинематики всего агрегата. Это ясно видно из полного уравнения движения электропривода с учетом двух динамических составляющих: первой  $J_{(a)} \frac{d\omega}{dt}$

и второй  $\frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_{(a)}}{dx}$ . Законы изменения скорости электрифицированного агрегата при данной его кинематической схеме, очевидно, зависят от закона изменения потерь в промежуточных передачах от двигателя к механизму. Особенно сложным оказывается рассмотрение вопроса в

тормозных режимах при передаче кинетической энергии с нескольких осей исполнительного механизма и при обмене энергии, связанной со статическими и динамическими усилиями на нескольких механических осях.

Законы изменения скорости агрегатов в переходных режимах должны соответствовать производственным процессам, что должно быть обеспечено соответствующим подбором механических характеристик электродвигателей. При исключительном разнообразии исполнительных механизмов встречаются самые различные соотношения моментов инерции рабочей машины и двигателя, однако методика расчета переходных режимов остается неизменной.

В зависимости от типа исполнительного механизма в разных приводах приходится иметь дело с различными комбинациями соотношений статического и динамического моментов. Однако, опять-таки учет явлений остается тем же. Иногда, при практическом решении задач представляется возможным несколько «огрублять» процессы за счет пренебрежения изменением статической или динамической составляющей моментов вращения.

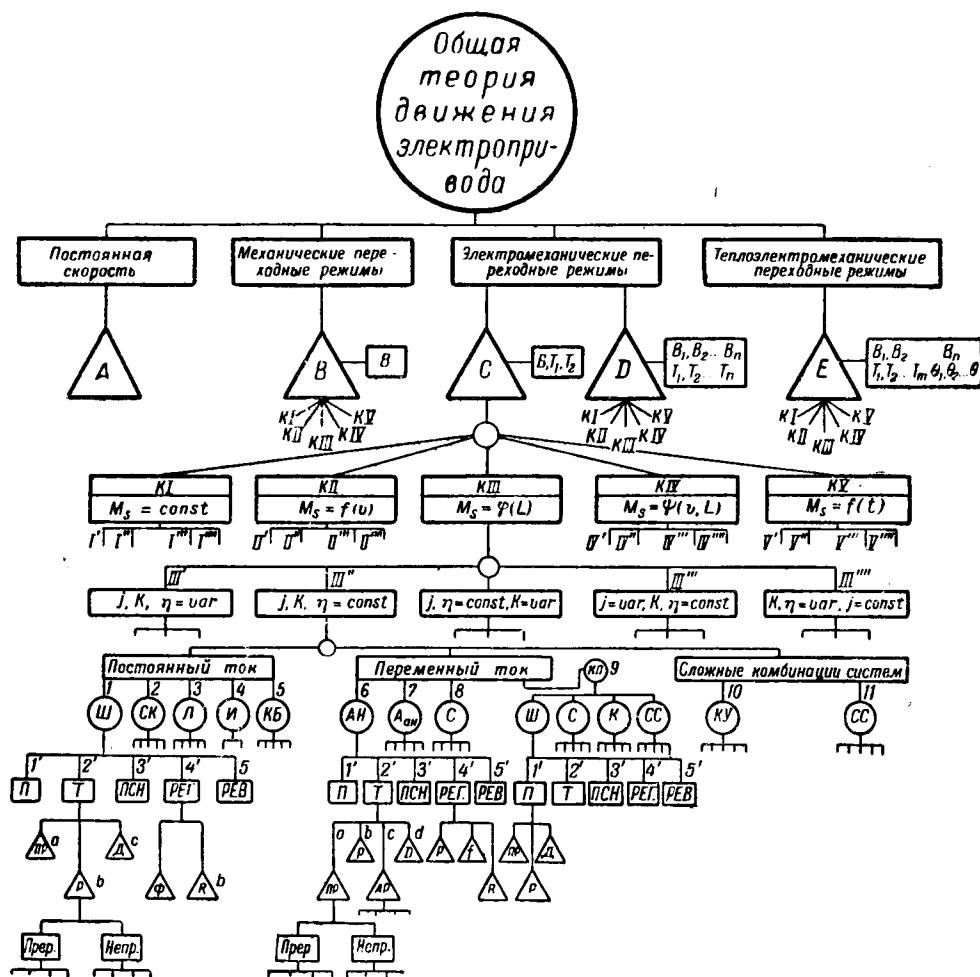
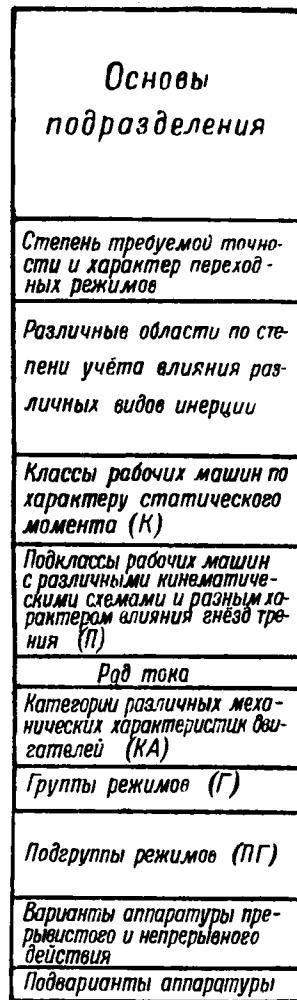
На протекание переходных режимов электропривода влияет закон изменения приведенного к валу двигателя момента инерции рабочей машины, т. е. ее кинематическая схема. Во многих случаях величина приведенного к валу двигателя момента инерции остается постоянной. Это имеет место при чисто вращательных движениях и простых связях прямолинейного движения с вращательным посредством реечных зацеплений и червячных передач. При более сложных кинематических связях, например с кривошипами, и различной комбинацией кинематических пар величина  $J_{(a)}$  меняется (например, поршневой компрессор, ножницы, автоматы, механизмы наведения артиллерийских орудий и т. д.). Рассмотрение динамических режимов существенно усложняется, нагрузочные диаграммы становятся более сложными по конфигурации.

Такого же характера усложнение вносит наличие переменного передаточного числа  $K$  между двигателями и механизмами, например, гидравлическая муфта с переменным передаточным числом, конусные шкивы и т. п.

Не менее существенен для расчета динамических режимов характер изменения потерь в передачах и в гнездах трения, т. е. форма кривой к. п. д. передач. Влияние фактора потерь в передачах можно рассматривать, как наличие добавочного переменного статического момента от потерь трения или как изменение за счет переменного к. п. д. передач приведенных статического и динамического моментов.

Сложность этого вопроса особенно выступает, если учесть наличие необратимых передач, наличие передач с передаточным числом до 22 000—25 000, как то имеет место в некоторых исполнительных механизмах военного дела.

В результате влияния  $J$ ,  $k$  и  $\eta$  каждый класс переходных режимов, соответствующий одному



определенному закону изменения статического момента, оказывается необходимым делить на пять подклассов: 1)  $J, k, \eta = \text{const}$ ; 2)  $J, k = \text{const}, \eta = \text{var}$ ; 3)  $J, k = \text{var}, \eta = \text{const}$ ; 4)  $J = \text{var}, k, \eta = \text{const}$ ; 5)  $J = \text{const}, k, \eta = \text{var}$ .

При практическом использовании последние три подкласса иногда представляется целесообразным, в целях получения приближенных решений, объединять в один с использованием одинаковых методов графического интегрирования. В свою очередь, в ряде случаев правильные решения могут быть получены лишь при использовании мгновенных значений к. п. д., весьма трудно определяемых.

**Подразделение переходных режимов по типу электродвигателя.** Дальнейшее подразделение переходных режимов должно идти по признаку электромагнитных свойств различных электрических типов электродвигателей, т. е. в связи с их механическими характеристиками. При данной комбинации механических свойств рабочей машины соответствующая механическая характеристика двигателя определяет собой поведение электрифицированного агрегата. При этом нужно иметь в виду, что динамические характеристики агрегата при заданных его статических характеристиках определяются в первую очередь динамическими характеристиками двигателей.

Роль явлений самоиндукции, взаимоиндукции, влияние токов Фуко, изменение параметров двигателей во времени во многих случаях очень существенна, в особенности при рассмотрении вопросов устойчивости.

Простейшее подразделение здесь должно идти по линии рода тока. В соответствии с этим приходится наметить три основных группы двигателей: 1) постоянного тока; 2) переменного тока; 3) сложные комплексы машин двух родов тока. При каждом роде тока электромагнитные процессы двигателей протекают по-разному. Поэтому методика решения уравнений движения электропривода будет также специфичной.

В соответствии с особенностями электромагнитных процессов каждого электрического типа двигателей и свойствами его механической характеристики, группы переходных режимов, в зависимости от типа двигателя и степени жесткости или мягкости его характеристик, приходится делить по подгруппам основных типов двигателей, по роду их механических характеристик, а иногда и особенностям схемы включения. В постоянном токе приходится различать типы двигателей (таблица): 1) шунтовой—Ш; 2) серийный; компаундный—СК; 3) систему Леонарда—Л; 4) ионный привод—И; 5) комбинированные системы—КБ.

В переменном токе приходится различать: 1) асинхронные нормальные двигатели: *a*) с кольцами, *b*) короткозамкнутые—*АН* и 2) асинхронные аномальные, например, с несимметричными схемами включения—*А<sub>ан</sub>*; 3) синхронные—*С*; 4) коллекторные—*КЛ*: *a*) однофазные и *b*) трехфазные с подразделением на: *a*) шунтовые—*Ш*, *b*) серийные—*С* и *c*) компаундные—*К*, а также более сложные системы—*СС*.

Особо необходимо выделить сложные комбинированные системы из машин постоянного и переменного тока, например, каскад Кремера, каскад для аэродинамической трубы асинхронной машины с синхронной, приводимой двигателем постоянного тока, питаемым по системе Леонарда—*КУ*, а также системы синхронной связи—*СС*.

**Подразделение переходных режимов на группы.** Полный рабочий процесс каждого электрифицированного агрегата обязательно включает в себе режим пуска, работы, остановки и некоторые возможные другие. Эти режимы в разных электрических типах двигателей протекают совершенно неодинаково, например, особенности электромагнитных процессов пуска синхронного двигателя имеют мало общего со спецификой процессов пуска двигателя постоянного тока.

Все типичные режимы могут быть разделены на 5 основных групп (таблица): 1) пуск в ход—*П*; 2) прием и сброс нагрузки—*ПСН*; 3) торможение—*Т*; 4) реверсирование—*РЕВ*; 5) регулирование скорости—*РЕГ*. Все более сложные режимы, например работа по шаблону, принципиально укладываются также в указанные категории. В свою очередь все более сложные категории разбиты на отдельные подкатегории. Так, во всех без исключения электродвигателях торможение возможно в трех основных вариантах: 1) торможение противовключением—*ПР*; 2) динамическое—*Д*; 3) рекуперативное—*Р*. Кроме того, в асинхронных машинах возможно торможение посредством несимметричных включений, специальных схем с добавочными машинами и т. д.

**Влияние типа аппаратуры на методику анализа переходных режимов.** Способы рассмотрения переходных процессов зависят от того, применена ли для управления аппаратура прерывистого или непрерывного действия. Практика последних лет характеризуется широким использованием аппаратуры непрерывного действия, в первую очередь ионных и электронных приборов и различных электрических машин типа амплидинов, роторолов, регулексов, поперечных возбудителей, бустеров, различных пилот-генераторов.

При наличии контактно-релейной аппаратуры переходные процессы приходится рассматривать по отдельным участкам, однако для каждого участка анализ оказывается аналогичным и не зависит от рода аппаратуры. При аппаратуре второго типа (непрерывного действия) необходимо процессы рассматривать как непрерывные. Понятно, что кроме деления аппаратуры на два указанных типа, для полного учета переходных процессов необходимы дальнейшие подразделения

типов аппаратуры по принципам действия (например, принцип обратной э. д. с., ограничения тока, зависимой от тока или независимой выдержки времени, частотный) по типам регуляторов, по типам следящих систем.

**Необходимость различных подходов к решению практических задач теории движения электропривода в зависимости от производственных требований и математических трудностей.** Детальное и исчерпывающее рассмотрение всех наблюдаемых в электрифицированных агрегатах переходных процессов с учетом механических, электромагнитных и тепловых явлений часто представляет непреодолимые пока трудности в силу сложного комплекса различных физических процессов, протекающих в электроприводе, их нелинейности и недостаточности имеющегося в нашем распоряжении математического аппарата. Однако, далеко не во всех случаях практики привода нам требуется одинаковая точность учета явления.

Электропривод обслуживает самые разнообразные исполнительные механизмы и производственные процессы всех отраслей промышленности, военного и морского дела. Требуемая степень детального изучения переходных процессов может быть весьма различной. Одна степень изучения требуется, когда механизм пускается до 3 000—4 000 раз в час, а другая, когда осуществляется раз в час. Также существенно различно, требуется ли точность перемещения в долях миллиметра и точность поворота механизма на  $1/2^\circ$  или же когда точность остановки может определяться 5—10  $\text{мм}$ , а поворот, например, 5—10°. В ряде случаев практики желательно с максимальной точностью знать законы изменения статического момента, нужно сравнительно точно учитывать влияние передаточного числа потерь в передачах, изменения приведенного момента в зависимости от угла поворота механизма. Для ряда случаев, наоборот,—небольшие колебания указанных величин не играют никакой практической роли.

Поэтому переходные процессы электропривода при решении конкретных задач приходится рассматривать с различной степенью детализации и точностью, в зависимости от величины и роли постоянных времени механической, электромагнитной и тепловой инерций.

В полном соответствии с практическими потребностями все переходные режимы по требуемой точности их учета мы делим по так называемым областям. Рационально наметить пять областей. Для обозначения их при классификации применяем буквы *A*, *B*, *C*, *D*, *E*. К первой области *A* мы относим такие электрифицированные агрегаты, которые длительно работают при неизменной нагрузке и в которых пусковые, тормозные и вообще переходные процессы не играют практически никакой роли. Могут в них существовать и колебания статического момента (дефибрер) и изменения махового момента (поршневой насос), но для этой категории механизмов детальный учет переходных режимов совершенно не требуется. Глубокий математический

анализ работы привода при решении подобных задач не нужен. Эту область можно назвать *областью постоянной скорости агрегатов*.

Вторая область—*B*—охватывает динамические режимы, но в силу требуемой производственными механизмами точности (например, ряд подъемно-транспортных устройств) мы имеем возможность отказаться от детального учета электромагнитных явлений в двигателях и ограничиться учетом влияния одной механической инерции. Инерционная электромеханическая постоянная времени *B* оказывается в таких случаях обычно значительно больше электромагнитных инерционных постоянных. Эту область мы называем *областью механических переходных режимов*.

Последующие две области—*C* и *D*—требуют кроме учета механической инерции агрегатов также и учета влияния электромагнитной инерции. Области *C* и *D* могут быть названы *областями электромеханических переходных режимов*. В области *C* мы учитываем лишь электромагнитную инерцию обмоток электродвигателей. Здесь при расчете кроме постоянной времени механической инерции *B* агрегата уже фигурируют электромагнитные постоянные:  $T_1, T_2, T_3 \dots$  отдельных обмоток и цепей двигателей. В иных случаях оказывается целесообразным учесть не все электромагнитные постоянные цепей, например, учитывать постоянные обмоток возбуждения и пренебречь электромагнитными постоянными обмоток якорей. В области *C* не фигурируют инерционные постоянные управляющей аппаратуры. Влияние их учитывается обычно теми или иными выдержками времени, часто фиксирующимися по опытным данным.

Область *D* охватывает электромеханические переходные режимы с детальным учетом влияния элементов аппаратуры, т. е. с детальным рассмотрением механических и электромагнитных процессов их работы. Здесь при расчете фигурируют уже постоянные времени механической инерции:  $B_1, B_2, B_3, \dots B_n$  и постоянные времени электромагнитной инерции:  $T_1, T_2, T_3, \dots T_k$  электрических машин и элементов аппаратуры—реле, контакторов, следящих систем и т. д. Эта область до настоящего времени изучалась пока в сравнительно ограниченном объеме (применительно к процессам регулирования и следящим электроприводам). Последнюю область *E*, практически почти неизученную, составляют тепловые электромеханические переходные режимы.

В этой области должно быть учтено влияние на переходные режимы происходящих в двигателях и аппаратуре тепловых процессов, которые влияют непосредственно и в первую очередь на омические и активные сопротивления цепей, сопротивления путей для токов Фуко и т. д. При расчете здесь должны фигурировать постоянные времени тепловой инерции двигателей и аппаратуры:  $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$ . Так, в случае регулируемого электропривода с компаундным двигателем постоянного тока при автоматическом

управлении по принципу обратной э. д. с. число уравнений по областям будет следующее:

| Область  | Уравнения |
|----------|-----------|
| <i>A</i> | нет       |
| <i>B</i> | одно      |
| <i>C</i> | три       |
| <i>D</i> | пять      |
| <i>E</i> | семь      |

Все изложенные выше соображения о классификации переходных режимов нашли отражение в приведенной таблице.

Для ее графического упрощения все нижележащие подразделения указаны лишь для одной выше лежащей рубрики, хотя они относятся ко всем расположенным выше рубрикам (соответствующей строчки). Исключение составляет область *A*, которая вообще никаких подразделений не имеет. В соответствии с таблицей любой режим каждого электрифицированного производственного агрегата может быть уложен в представленную в ней схему.

**Цель и возможный масштаб обобщений переходных режимов электропривода.** Рассмотрение методики решения уравнения движения электропривода в самой общей форме не может дать для электропривода каких-либо практических и теоретических выводов. Введение в уравнение движения выражения общего момента электродвигателей, полученного, например, из уравнений Лагранжа и общего выражения статического момента в виде:

$$M_m = M_0 + f(v, L) + \varphi(t),$$

не может дать, естественно, никаких конкретных результатов.

Решение уравнения движения электропривода должно производиться для обобщенных частных случаев с учетом: 1) действительного характера изменения статического момента; 2) действительного характера изменения момента электродвигателей; 3) для соответствующего определенного по своим типичным кинематическим связям махового момента системы с правильным учетом потерь в системе; 4) для соответствующей автоматической схемы управления.

В результате, как будто, должно получиться почти то огромное количество решений, которое лается схемой таблицы. Однако, в действительности в целом ряде случаев оказывается возможным в некоторых вариантах обобщение работы таких электроприводов, как электроприводы с асинхронными машинами и машинами постоянного тока, приводы с синхронными и асинхронными машинами, асинхронными и коллекторными машинами переменного тока и т. д. Общие соображения по этим вопросам даются ниже.

Из вида возможных функций, характеризующих изменение статического момента, ясно, что обобщение можно проводить лишь для одного и того же класса исполнительных механизмов. Только в отдельных случаях решения задачи для  $M_m = f(v)$  охватывает и более частный случай  $M_m = \text{const}$ . В большинстве случаев переход от

одного класса статического момента к другому или меняет характер аналитического решения или требует использования различных способов графического интегрирования. Наибольшие усложнения получаются, естественно, при учете нелинейности процессов.

Обобщение электромеханических режимов возможно, конечно, проводить лишь для электроприводов с двигателями одного и того же рода тока, так как детальные зависимости врачающего момента от различных электромагнитных факторов для двигателей постоянного и переменного тока неодинаковы.

Принципиально возможно объединение всех переходных режимов электроприводов с асинхронным двигателем (при одном и том же классе статического момента) в нормальной схеме включения. Представляется также возможным широкое обобщение большого числа режимов различных электрических типов двигателей постоянного тока.

Еще шире возможности обобщения часто механических режимов. Здесь в отдельных классах статического момента оказывается возможным обобщение нагрузочных диаграмм шунтовых двигателей постоянного тока, асинхронных, шунтовых коллекторных. Точно так же возможно рассматривать объединение динамических режимов серийных двигателей постоянного тока, серийных коллекторных и т. д.

Возможность обобщения некоторых режимов иллюстрируется ниже наиболее простым примером.

**Практические возможности обобщений по признаку механических переходных режимов.** Рассмотрим здесь для примера возможности обобщений в разрезе механических режимов и  $M_m = \text{const}$  для двигателей одного и того же рода тока, одного и того же электромагнитного типа двигателя и одной и той же электрической схемы.

Возьмем простейший по аналитическому выражению механической характеристики шунтовой двигатель постоянного тока при  $M_m = \text{const}$ .

Так как закон изменения момента двигателя в данном случае остается прямолинейным и одинаковым как для двигательного режима, так и тормозных—рекуперативного, противовключения и динамического торможения, то решение уравнения будет одинаковым для всех режимов. Решение для одного режима будет различаться от решения для другого лишь подинтегральными постоянными.

Решение уравнения движения при  $M_m = \text{const}$  и  $J = \text{const}$  для  $M_d$  даст выражение:

$$M_d = \pm M_m \left( 1 - e^{-\frac{t}{B}} \right) + M_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{B}},$$

где  $B$  — электромеханическая постоянная, равная

$$\frac{GD^2 n_0}{375 M_N} S_N.$$

Если рассматривать разные механические характеристики двигателей, то решение для них будет отличаться лишь значением инерционной постоянной  $B$ , за счет изменения величины скольжения  $S_A$ , пропорционального величине введенного в цепь якоря омического сопротивления.

Все процессы, соответствующие этим режимам, носят, как и все инерционные процессы, экспоненциальный характер. Не меняется решение уравнений и при изменении на-

грузки (приеме и сбросе нагрузки), так как уравнение движения привода получает вид

$$\pm \Delta M_d \pm M_m \pm \Delta M = \pm M_d \pm (M_m \pm \Delta M_m) = J \frac{d\omega}{dt},$$

где  $\Delta M = \text{const}$  — величина момента нагрузки, соответствующая приему или сбросу. В результате все механические переходные процессы электроприводов с двигателями постоянного тока с шунтовой характеристикой могут быть полностью обобщены. В данном случае имеем лишь одно уравнение движения электропривода. Члены этого уравнения для пуска, торможения, противовключения и рекуперативного режима приема и сброса нагрузки процесса регулирования скорости как при потенциальном, так и реактивном статических моментах различаются лишь знаками. Реверсирование должно рассматриваться, как состоящее из двух последовательных процессов — торможения и пуска.

При рассмотрении чисто механических режимов указанные решения охватывают и регулировку скорости током возбуждения и работу системы Леонарда, так как влияние электромагнитных постоянных в чисто механических процессах не учитывается. Характеристики машины остаются прямолинейными, величина же тока возбуждения или двигателя или величина напряжения, поданного от генератора Леонарда к двигателю, определяют лишь параметры механических характеристик или при графическом представлении их относительное расстояние от оси абсцисс и наклона по отношению к этой оси. В данном случае мы оперируем со статическими, а не динамическими характеристиками двигателя. Таким образом, в свете рассмотрения механических режимов электропривода все режимы одного и того же шунтового типа двигателя при одном и том же характере изменения статического момента и одной и той же принципиальной схеме автоматического управления объединяются одним и тем же уравнением, носящим экспоненциальный характер.

Все то же самое можно сказать о возможности объединения решения для механических режимов электроприводов при серийном и компаундном двигателях постоянного тока. Все отличие процесса от такого в электроприводе с шунтовыми двигателями заключается лишь в том, что по условиям насыщения и изменения основного магнитного потока аналитические решения здесь в основном неприменимы, приходится решать задачи графоаналитическим способом (метод конечных приращений, принцип пропорций с использованием метода относительных единиц). Чисто экспоненциальный характер протекания процессов здесь не выдерживается.

В зависимости от требуемой точности можно пойти здесь и на чисто аналитические решения, разбивая механическую характеристику двигателя на 3—4 прямолинейных участка или же используя для кривой намагничивания выражение Фролиха.

Аналитический метод существует в том отношении, что он показывает определенные закономерности постоянной времени механической инерции. Усложнение магнитных процессов и характера изменения статического момента делает выражение для этой постоянной более сложным.

Если работу указанных выше типов электроприводов рассматривать для случаев  $M_m = \text{const}$  или  $M_m = f(v)$  или для случаев переменных моментов инерции, переменных к. п. д. и переменных передаточных чисел, то обобщение методики рассмотрения механических режимов здесь возможно примерно в таком же объеме и направлении, как и при  $M_m = \text{const}$ .

Механические переходные режимы асинхронных двигателей с кольцами как пусковые, меняющейся нагрузке, так и тормозные, протекающие в основном по прямолинейным характеристикам, практически обычно вполне укладываются в решения для соответствующих режимов электроприводов с шунтовыми двигателями постоянного тока. Выведенными для этих двигателей уравнениями можно пользоваться обычно и в обычновенных короткозамкнутых двигателях и двигателях с переключением полюсов, пока речь идет о работе в области между скольжением, равным нулю, и не подходящим близко точке остановки.

В свою очередь, все переходные процессы короткозамкнутых двигателей как односкоростных, так и многоскоростных с той или другой точностью могут быть также

обобщены, если воспользоваться для выражения моментов двигателей упрощенным или полным уравнением Клосса.

Однако, чисто аналитические решения в относительных единицах в короткозамкнутых двигателях получаются лишь при холостом ходе и постоянном статическом моменте нагрузки. Во всех других случаях неизбежным оказывается применение графоаналитических методов.

В рабочих режимах синхронных двигателей чисто механические переходные процессы не могут иметь места, ибо эти двигатели работают при  $n = \text{const}$ . Если же пусковой процесс синхронных двигателей рассматривать на основе графического представления кривой вращающего момента, то в этом случае рассмотрение пуска электроприводов с синхронными двигателями оказывается аналогичным таковому для короткозамкнутых.

Коллекторные двигатели переменного тока являются по существу асинхронными двигателями, усложненными наличием коллектора и щеток. Аналитическое решение уравнения движения привода с переменным углом сдвига щеток весьма затруднительно. Поэтому здесь обычно приходится рассматривать процессы по существу так же, как и в асинхронных с регулировкой частоты, анализируется соответствующее число механических характеристик при различных углах сдвига щеток. Таким образом, в отношении методики решения коллекторные шунтовые двигатели могут примыкать к асинхронным короткозамкнутым.

Что же касается серийных и компаундных коллекторных двигателей, то по условиям насыщения здесь приходится пользоваться графическим представлением характеристики, а поэтому методика решения вопросов электроприводов с этими двигателями приближается к методике решения задач привода с серийными и компаундными двигателями постоянного тока.

Таковы возможные масштабы объединения теории электропривода применительно к механическим переходным режимам.

В электрических переходных режимах, когда электромагнитные процессы, происходящие в двигателях, учитываются детально, можно, естественно, говорить об объединении лишь в масштабе одного рода тока. Так, двигатели постоянного тока по методике рассмотрения никак не могут быть объединены с двигателями переменного тока.

Однозначными практически оказываются лишь такие процессы, как:

1. Противовключение асинхронных и синхронных двигателей, ибо синхронная машина работает в режиме противовключения, как асинхронная, и влияние ее чисто синхронных параметров обычно невелико.

2. Динамическое торможение синхронной и асинхронной машины, ибо в этом режиме асинхронная машина работает как неякорнополюсная синхронная.

3. Режимы противовключения асинхронной и шунтовой коллекторной машины с некоторым усложнением математических выражений в последнем типе.

4. Режим рекуперации асинхронной и шунтовой коллекторной машины.

Все остальные режимы двигателей переменного тока по протеканию электромагнитных процессов просто объединены быть не могут.

Некоторое объединение в области электрических режимов для одного и того же электрического типа двигателей может быть сделано по различным режимам. Так, в асинхронных машинах пуск в ход объединяется с торможением, противовключением, рекуперацией приемом ибросом нагрузки.

Рассмотрение масштаба возможных объединений и обобщений в большом объеме не может быть, понятно, уложено в рамках одной статьи.

**Схема общей теории движения электропривода.** Все изложенное выше дает возможность, по мнению автора, наметить следующую полную и

рационально построенную схему общей теории движения электропривода.

I — механические свойства рабочих машинорудий.

II — механические характеристики электродвигателей (в статике и динамике).

III — принципиальные условия устойчивости электрифицированных агрегатов.

IV — механические переходные режимы электрифицированных рабочих агрегатов.

1. Динамические режимы электроприводов с жесткой (шунтовой) характеристикой: a)  $M_m = \text{const}$ ; b)  $M_m = f(v)$ ; c)  $M_m = \varphi(L)$ ; d)  $M_m = \psi(v, L)$ ; e)  $M_m = f(t)$ .

2. Динамические режимы электроприводов с асинхронной характеристикой (те же подразделения).

V — электромеханические переходные режимы.

1. Динамические режимы электроприводов постоянного тока: a) с шунтовыми двигателями; b) с серийными двигателями; c) с компаундными двигателями; a) с системой Леонарда; e) с ионными системами питания.

2. Динамические режимы приводов переменного тока: a) с асинхронными двигателями; a) нормальными, b) аномальными; b) с синхронными двигателями; c) с коллекторными шунтовыми двигателями; d) с коллекторными серийными двигателями.

3. Динамические режимы сложных комбинированных электроприводов постоянного и переменного тока.

VI — работа электроприводов постоянного тока с автоматической аппаратурой.

1. Аппаратура прерывистого действия.

2. Аппаратура непрерывного действия.

VII — работа электроприводов переменного тока с автоматической аппаратурой (те же подразделения).

VIII — работа многодвигательных электроприводов, связанных производственным процессом.

IX — теплоэлектромеханические переходные режимы.

**Заключение.** В целях обобщения отдельных вопросов общей теории движения автоматизированного электропривода автором проведен сжатый анализ различных возможных режимов электрифицированных агрегатов. В результате получается полная классификация всех возможных режимов, которая частично показывает, до какой степени, в основном, могут быть доведены обобщения по отдельным классам, группам, категориям и вариантам. Дальнейшие теоретические изыскания в области теории движения электропривода должны сочетаться с детальными экспериментальными исследованиями.



# Из научно-исследовательских работ

## АВТОРЕФЕРАТЫ

### Рациональный выбор нагрузок проводов и кабелей в низковольтных электросетях<sup>1</sup>

Кандидат техн. наук Л. П. ПОДОЛЬСКИЙ

Москва

Нагрузки проводов и кабелей, предусмотренные действующими правилами, представляют собой «пропускные способности», т. е. нагрузки, исчисленные из условий предельно допускаемого нагрева. Стремление к экономии цветных металлов привело к постепенному росту этих нагрузок. До 1939 г. они для проводов с нормальной резиновой изоляцией исчислялись, исходя из температурного перепада 20° С; в 1939 г. этот перепад был увеличен до 30°. При проводах с нагревостойкой резиновой изоляцией, для которых предельно допускаемая температура нагрева достигает 70° С, перепад составляет 45° С. Если температура окружающей среды ниже 25°, это обстоятельство также используется для дальнейшего увеличения нагрузок.

Независимо от этого нормы ВЭС, действовавшие до 1938 г., по условиям защиты проводов плавкими вставками позволяли использовать пропускные способности лишь на 80%. Это ограничение в настоящее время отпало. Наконец, пропускные способности для проводов сечения до 6  $\text{mm}^2$  включительно по нормам ВЭС были значительно ниже, чем даже те, которые соответствовали перепаду в 20° С.

В результате действующие нормы нагрузок для защищенных предохранителями проводов с нормальной резиновой изоляцией сечением от 10  $\text{mm}^2$  и выше в настоящее время увеличены по отношению к прежним нормам ВЭС приблизительно на 54%, а для проводов с нагревостойкой резиновой изоляцией — на 80%. При температуре окружающей среды ниже 25° С это расхождение увеличивается.

Что касается малых сечений, то для них относительное возрастание нагрузок еще больше. Например, для провода 2,5  $\text{mm}^2$  с нормальной изоляцией, защищенным предохранителем, предельная нагрузка по нормам ВЭС составляла 15 А, а по ныне действующим правилам — 27 А, т. е. увеличение составляет 80%.

В первом приближении в такой же мере возросли и средние квадратичные нагрузки каждого элемента низковольтной сети. Поэтому прибли-

женно можно считать, что действующие нормы нагрузок связаны с потерями энергии в низковольтных сетях в 2,5—3,5 раза большими, чем потери, соответствующие нормам ВЭС. Этот результат заставляет призадуматься над целесообразностью действующих у нас норм нагрузок, которые превышают, например, американские на 40% и более. Значимость для Советского Союза вопроса о потерях энергии в заводских сетях усугубляется тем обстоятельством, что подавляющее большинство предприятий работает в две или три смены.

Стоимость потерь энергии и стоимость изделий из цветных металлов. До сих пор еще распространено мнение, что энергия потерь должна расцениваться по отношению к справочным ценам с каким-то коэффициентом, значительно меньшим единицы. Однако, для такой льготной расценки нет никаких оснований, что видно из следующих соображений:

а) потери требуют такого же расхода топлива на 1 kWh, как и полезно отпущеная энергия; момент максимума потерь совпадает с моментом максимума нагрузки. Поэтому потери для энергосистемы являются одним из наиболее невыгодных «потребителей»;

б) мощность, расходуемая на потери в низковольтных сетях, загружает сооружения всех ступеней энергосистемы (генераторы и сети);

в) потери мощности в сетях чрезвычайно велики и составляют, считая от шин станции и до пунктов потребления, около 25—30% от максимума нагрузки системы. Поэтому борьба за снижение потерь, если она будет вестись на всех ступенях электроснабжения, освободит значительные мощности.

Из сказанного следует, что потери энергии не должны расцениваться с применением каких-либо льгот. Они должны расцениваться тем выше, чем больше преобразований претерпевает на своем пути электрический ток. Энергия, отпускаемая с шин низкого напряжения, в том числе и энергия потерь, должна калькулироваться с учетом стоимости не одного только топлива, как это неоднократно предлагалось, но и с учетом отчислений по амортизации, ремонту и обслуживанию всех сооружений, начиная от электростан-

<sup>1</sup> К дискуссии по проблеме затраты металлов и снижения потерь электроэнергии в электрохозяйстве СССР (Электричество, № 6 и 12, 1946 и № 1, 1947).

ции и кончая понизительной подстанцией потребителя.

Переходя к анализу стоимости изделий из цветного металла, мы сталкиваемся с вопросом о так называемом «коэффициенте дефицитности» цветного металла по отношению к электроэнергии. Следует отметить, что компетентные плановые органы никогда не давали согласия на введение такого коэффициента. Сравнение экономической структуры себестоимости электроэнергии и цветного металла также не дает основания к этому.

Основными составляющими себестоимости цветного металла являются: отчисления со стоимости сооружений и технологического оборудования для добычи и переработки руды, административные расходы, рабочая сила, топливо и электроэнергия. Составляющими цены электроэнергии являются те же элементы, а кроме того, в немалой степени — цветной металл. Таким образом, нет принципиального различия между экономической структурой электроэнергии и цветного металла. Отсюда вытекает, что при расчетах следует расценивать как потери энергии, так и изделия из цветного металла по нормальным государственным ценам.

**Методология расчета экономических нагрузок проводов и кабелей.** Для определения наивыгоднейших с точки зрения эксплоатационных расходов нагрузок проводов низковольтных сетей более удобным оказалось использовать формулу Кельвина в следующем виде:

$$j_{ek} = \sqrt{\frac{1000 \cdot \eta_n \cdot 57 \cdot n}{3 \cdot k_t \cdot \tau \cdot b}}, \quad (1)$$

где  $j_{ek}$  — экономическая плотность тока;  $\eta_n$  — суммарные годовые эксплоатационные отчисления по низковольтной сети, выраженные в долях единицы;  $n$  — постоянная уравнения  $A = m + nq$ , выражающая эмпирическую зависимость между стоимостью проводки  $A$  (в рублях) и сечением провода  $q$  (в  $\text{мм}^2$ ). Под  $A$  понимается сумма стоимостей всех элементов проводки (включая монтаж), зависящих от выбранного сечения провода и отнесенных к 1 т трехфазной линии;  $k_t$  — коэффициент, учитывающий возрастание сопротивления проводов, вызванное нагревом их током;  $\tau = k_1 k_2 t T$  — годовое число использования максимума нагрузки, выраженное в часах;  $k_1$  — отношение длительности включенного состояния рассматриваемого элемента сети к длительности работы предприятия (за сутки);  $k_2$  — выраженное в долях единицы отношение среднеквадратичного значения нагрузки элемента сети за время нахождения его под током и квадрату максимума нагрузки;  $t$  — число часов работы предприятия за сутки;  $T$  — число дней работы в год;  $b$  — стоимость энергии на шинах потребителя в рублях.

Широкое применение при выборе сечений проводов принципа наименьших эксплоатационных затрат весьма затруднительно в низковольтных сетях, состоящих из большого числа элементов. Дело не только в необходимости трудо-

емких расчетов, но и в том, что выполнение последних требует знания таких характеристик (сметных и эксплоатационных), выявление которых может представлять большие затруднения. Как правило, экономические нагрузки должны непосредственно (без всяких расчетов) заимствоваться из таблицы. Разумеется, такая таблица может давать лишь весьма приближенные решения. Для ее построения мы будем исходить из условия работы сетей на предприятиях металлообрабатывающей промышленности. Эти сети обладают тем преимуществом, что они хорошо изучены, весьма распространены и обладают эксплоатационными характеристиками средних по отношению к другим сетям значений. Далее, мы будем исходить из применения наиболее распространенного напряжения — 380 В. Выбрав несколько величин токов нагрузки, при которых эксплоатационные характеристики ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\tau$ ) элементов сети, служащих для передачи этих токов, достаточно известны из практики проектирования, мы получим возможность определить соответствующие экономические плотности тока, пользуясь приведенной выше формулой Кельвина. Величины  $k_1$ ,  $k_2$ , а следовательно и  $\tau$ , тем больше, чем больше ток нагрузки. Поэтому естественно предположить, что величины  $\tau$  и  $j_{ek}$  в функции от передаваемого тока выразятся плавной кривой.

Руководствуясь изложенной выше методологией, мы выполнили расчет, относящийся к проводам, проложенным в газовых трубах. Результаты этого расчета, как и всех расчетов, выполняемых по формуле Кельвина, привели к нагрузкам значительно меньшим, чем нагрузки, применяемые на практике. Однако, этот разрыв был значительно уменьшен увеличением расчетных значений экономических плотностей тока примерно на 50%. При этом отклонение от оптимального значения, соответствующего принципу наименьших эксплоатационных расходов, незначительно и не превышает 7—8%.

В результате для двухсменного режима работы нами получена кривая экономических плотностей тока (рис. 1) и кривая экономических нагрузок (рис. 2).

Экономические нагрузки, применяемые для проводов, проложенных в газовых трубах, можно распространить также и на провода, проложенные открыто по кирпичным и бетонным стенам,

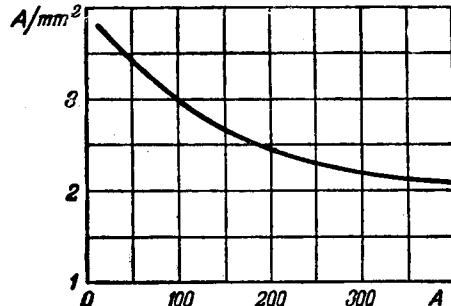


Рис. 1. Кривая экономических плотностей тока для проводов силовых сетей, проложенных в газовых трубах. По оси абсцисс — нагрузка элементов низковольтной сети, по оси ординат — экономическая плотность тока.

так как экономические показатели этих проводов близки.

Сравнение предлагаемой шкалы экономических нагрузок как со шкалой предельно допустимых нагрузок «Правил устройства электроустановок промышленных предприятий» (ПУЭПП), так и со шкалами нагрузок американской и германской приведены ниже в таблице.

| Сечение проводов, мм <sup>2</sup> | Нагрузки при открытой прокладке    |             |                                    |             |                           |                         |
|-----------------------------------|------------------------------------|-------------|------------------------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
|                                   | Нагрузка при прокладке в трубах    |             | Нагрузки при открытой прокладке    |             |                           |                         |
|                                   | из экономической плотности тока, А | по ПУЭПП, А | из экономической плотности тока, А | по ПУЭПП, А | по американским нормам, А | по германским нормам, А |
| 1,0                               | 4                                  | 13          | 4                                  | 15          | 4,9                       | 20                      |
| 1,5                               | 6                                  | 15          | 6                                  | 20          | 8,4                       | 25                      |
| 2,5                               | 10                                 | 22          | 10                                 | 27          | 16,9                      | 34                      |
| 4                                 | 15                                 | 31          | 15                                 | 33          | 21,8                      | 45                      |
| 6                                 | 23                                 | 37          | 23                                 | 46          | 27,5                      | 57                      |
| 10                                | 35                                 | 53          | 35                                 | 68          | 39,4                      | 78                      |
| 16                                | 52                                 | 70          | 52                                 | 92          | 54                        | 104                     |
| 25                                | 80                                 | 90          | 80                                 | 123         | 78,9                      | 137                     |
| 35                                | 105                                | 130         | 105                                | 152         | 91,7                      | 168                     |
| 50                                | 140                                | 150         | 140                                | 192         | 117,5                     | 210                     |
| 70                                | 180                                | 185         | 180                                | 242         | 154,2                     | 260                     |
| 95                                | 223                                | 223         | 223                                | 292         | 187                       | 310                     |
| 120                               | 268                                | 255         | 268                                | 342         | 217,2                     | 365                     |
| 150                               | 320                                | 290         | 320                                | 392         | 248,5                     | 415                     |
| 185                               | —                                  | —           | 380                                | 450         | 308                       | 475                     |
| 240                               | —                                  | —           | 480                                | 532         | 381,4                     | 560                     |

Рассмотрение таблицы показывает, что:

1) для прокладки в трубах экономические нагрузки меньше нагрузок «Правил устройства электроустановок промышленных предприятий» (ПУЭПП) при сечении проводов 1  $\text{mm}^2$  на 70%, 10  $\text{mm}^2$ —34%, 50  $\text{mm}^2$ —6,6%; при сечении провода 120 и 150  $\text{mm}^2$ , наоборот, экономическая нагрузка превышает нагрузку по ПУЭПП соответственно на 5 и 10%. Вообще, начиная с сечения 50  $\text{mm}^2$ , «экономические нагрузки» близки к нагрузкам ПУЭПП;

2) для открытой прокладки «экономические нагрузки» при сечении проводов 1  $\text{mm}^2$ , меньше

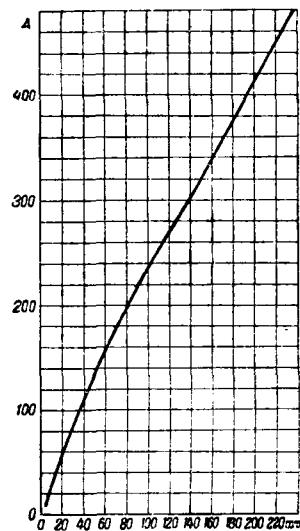


Рис. 2. Кривая экономических нагрузок для проводов силовых сетей, проложенных в газовых трубах. По оси абсцисс—сечение проводов, по оси ординат—рекомендуемая нагрузка.

нагрузок по ПУЭПП на 73% и меньше американских на 18%; при 10  $\text{mm}^2$ —на 49% меньше нагрузок ПУЭПП и на 11% меньше американских; при 35  $\text{mm}^2$ —на 31% меньше нагрузок ПУЭПП и на 16% больше американских; при 95  $\text{mm}^2$  на 24% меньше нагрузок ПУЭПП и на 19% больше американских; при 240  $\text{mm}^2$ —на 10% меньше нагрузок ПУЭПП и на 26% больше американских.

Необходимо подчеркнуть, что таблицы ПУЭПП, американская и германская, построены не на принципе «экономических нагрузок», а на принципе предельно допустимых по этим правилам температур нагрева проводов.

Данная работа доказывает, что рационализация таблицы нагрузок, действующей в СССР, требует существенного снижения нагрузок только проводов малых и частично средних сечений и мало затрагивает остальные провода.



## Электрический прибор для решения систем линейных алгебраических уравнений

Доктор техн. наук, проф. Э. А. МЕЕРОВИЧ

Энергетический институт им. Кржижановского Академии наук СССР

Рядом авторов предложены способы построения электрических схем для решения систем алгебраических уравнений. Одна из наиболее простых схем этого рода — схема Н. Bode. Однако, так как соотношения величин в электрических цепях удовлетворяют принципу взаимности, то схема Bode может быть применена только для тех случаев, когда матрица коэффициентов симметрична. Другие авторы обходили это затруднение, вводя в свои схемы трансформаторы (R. Mallock, V. Bush) или в качестве

элементов, заменяющих трансформаторы-усилители (Л. И. Гутенмакер). Были предложены также схемы, позволяющие применять итерационные способы решения уравнений (К. Самсонов, В. Прошко). Указывалась возможность построения автоматического устройства общего вида для этой же цели (Л. И. Гутенмакер).

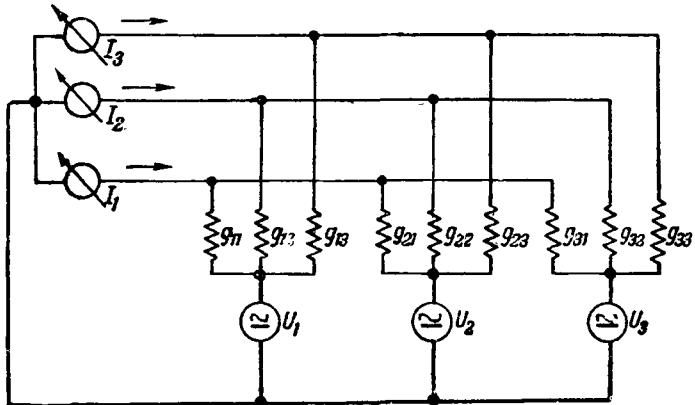
Однако, эти схемы относительно сложны. Заслуживают внимания возможности построения схем более простого вида.

Ниже мы описываем прибор, позволяющий

решать уравнения чрезвычайно общего вида. Основным достоинством прибора является его исключительная простота.

Наиболее приближается по идеи к описываемой ниже схеме схема, предложенная M. Reck. Однако, описываемая схема отличается от нее некоторыми существенными особенностями.

**Описание прибора.** Схема прибора для случая решения системы из трех уравнений с тремя неизвестными показана на рисунке.



Соотношения между электрическими величинами в этой схеме:

$$\begin{aligned} u_1 g_{11} + u_2 g_{21} + u_3 g_{31} &= I_1, \\ u_1 g_{23} + u_2 g_{23} + u_3 g_{33} &= I_2, \\ u_1 g_{13} + u_2 g_{23} + u_3 g_{33} &= I_3. \end{aligned}$$

Принимая проводимости  $g_{ik}$  за коэффициенты уравнения, а токи  $I_k$  за правые части уравнения, мы сразу замечаем, что напряжения  $U_k$ , действующие в цепи, удовлетворяют системе алгебраических уравнений. Таким образом, задача решения системы алгебраических уравнений с помощью схемы на рисунке сводится к установлению напряжений такой величины, чтобы токи  $I_k$  имели наперед заданное значение. При соответствующем увеличении числа элементов схема может быть приспособлена для решения систем с произвольным числом неизвестных. Мы здесь не касаемся вопроса о конструктивном осуществлении схемы и о выборе способа измерения электрических величин в ней. Схема может быть собрана на переменном токе, и в этом случае коэффициенты уравнений могут принимать также и комплексные значения. Для того, чтобы коэффициенты уравнений могли принимать отрицательные значения, необходимо, чтобы источники тока кроме клемм с положительным значением напряжения также были снабжены и клеммами с отрицательными значениями напряжения. При изменении напряжений абсолютные величины напряжений  $+$  и  $-$  должны всегда оставаться одинаковыми.

Сравнивая описываемую нами схему со схемой Reck<sup>1</sup>, мы видим, что последним принята другая группировка сопротивлений. Благодаря этому оказывается необходимым принять за искомые неизвестные значения проводимостей в схеме, которые у нас играют роль коэффициентов. Поэтому с помощью прибора Reck могут решаться только такие системы уравнений, в которых заранее известны знаки искомых неизвестных. Это сильно ограничивает возможность применения прибора по сравнению со схемой, описанной выше. Также весьма неудачно решен вопрос о способе отыскания неизвестных.

**Производство решения.** Каждый режим схемы соответствует некоторой системе уравнений с правой частью, определяемой токами  $I_k$ . Если в процессе решения регулировать одно из напряжений  $U_k$ , то при этом все токи претерпевают изменения.

Для получения решения заданной системы возможно применить схему последовательного приближения Зейделя, весьма распространенную среди вычислителей. В самом деле, связывая регулировку напряжений каждого из источников тока с соответствующим током  $I_k$ , мы можем поочередно устанавливать эти токи той величины, которая задана уравнениями. В схеме решения по Зейделю это означает отыскание соответствующего приближенного значения неизвестного из одной строки системы и одновременно подстановку этого значения во все другие строки. Естественно, что такой порядок решения может быть автоматизирован. При такой автоматизации, конечно, проявляются и все недостатки, свойственные итерационному процессу Зейделя. Однако, при производстве решения с помощью экспериментального устройства, подобного описанному выше, вычислитель находится в более благоприятном положении, чем при вычислениях на бумаге, и возможно использовать ряд преимуществ подобного прибора.

Перейдем к рассмотрению погрешностей описанного устройства. Вопрос погрешностей возникает во всякой счетной машине. Источником погрешностей может служить как неточность установки коэффициентов, так и влияние отдельных элементов самой машины. Кроме того, когда решение уравнений производится экспериментально, источником погрешностей является также неточность измерений.

В рассматриваемой схеме источниками погрешностей может быть: 1) неточность установки коэффициентов; 2) падение напряжения в линиях; 3) неточность измерений.

Неточность установки коэффициентов обусловлена тем, что с помощью проводимостей можно задать ограниченное число знаков, определяемое точностью калибровки. Выполнение проводимостей в виде многодекадного магазина не

<sup>1</sup> При составлении схемы работа Reck была нам неизвестна. На нее нам указал член-корреспондент Академии наук СССР И. С. Брук.

Вследствие указанного существенного отличия предлагаемого прибора от прибора Reck мы сочли целесообразным опубликование настоящего сообщения.

дает возможности увеличивать точность за счет увеличения числа декад, так как при большем числе декад погрешность первой декады в результате неточности калибровки может иметь значительность последней декады. Этот вид погрешности имеет место почти во всех электрических счетных машинах.

Погрешность в корнях вне зависимости от числа уравнений решаемой системы является линейной функцией погрешности в коэффициентах. В общем случае число верных знаков корней зависит не только от числа верных знаков коэффициентов, но также и от самих коэффициентов уравнения.

В ряде часто встречающихся в технике задач решаемую систему уравнений возможно привести к такому виду, при котором число верных знаков корней равно числу верных знаков коэффициентов.

Погрешность, обусловленная падением напряжения, может быть измерена и учтена. Погрешность измерений также может быть сведена к минимуму соответствующим выбором метода измерений. Более подробное рассмотрение погрешностей не входит в задачу настоящего сообщения. Отметим лишь, что все источники погрешностей легко обозримы и поддаются учету.

◊ ◊ ◊

## Девятишлейфовый переносный осциллограф

Инж. Е. С. БОРИСЕВИЧ

Сейсмологический институт Академии наук СССР

В 1945 г. в Сейсмологическом институте была разработана конструкция и построен опытный образец девятишлейфового переносного осциллографа УО-1 с записью на нормальную осциллографическую фотобумагу шириной 12 см.

**Основные данные осциллографа.** Средняя чувствительность шлейфов 25 мкА · м. Частота шлейфов поддается регулировке за счет изменения натяжения нити и за счет изменения ее активной длины. Кассета подвесная, фильмовая, с двумя катушками в общем футляре. Емкость кассеты 15 м к бумаги. Скорость фотоленты благодаря наличию специального фрикционного редуктора изменяется плавно в пределах от 1 до 20 см/сек. Марки времени наносятся в виде тонких поперечных полос, с помощью камертонов с частотой 50 Гц. Для визуального наблюдения за процессом записи имеется развертывающее устройство. Питание осциллографа — от постоянного тока 24 В. В осветителе шлейфов установлена кинолампа 12 В, 50 Вт. Габариты осциллографа: длина 675, ширина 325, высота 385 мм. Общий вес (без укладочного ящика) 48 кг. Внешний вид осциллографа показан на рис. 1. В правом верхнем углу видна панель 1 дополнительных сопротивлений и шунтов для регулировки чувствительности шлейфов. Под панелью имеется 9 ручек для наводки лучей, идущих от шлейфов на бумагу. В центре корпуса находится распределительная панель 2 с выключателями и сигнальными лампочками. Несколько выше слева видна ручка 7 зеркального барабана. При записи на малой скорости механическое вращение барабана выключается и он может поворачиваться от руки. Цифрой 5 помечены ручки осветителя,

устанавливающие нить лампы в требуемое положение; 4 — рукоятка переключателя скорости. При переключении рукоятка несколько оттягивается на себя и затем поворачивается до тех пор, пока в окошке не появится желаемая цифра, указывающая скорость движения бумаги в см/сек. С левой стороны корпуса подвешена кассета 3, механизм которой соединяется с механизмом осциллографа при помощи магнитной муфты. На крышке осциллографа находится коробка 8 матового стекла для визуального наблюдения за процессом записи.

Оптическая схема осциллографа УО-1 принципиально не отличается от оптической схемы портативного пленочного осциллографа ПО-1 конструкции Сейсмологического института.

Кинематическая схема показана на рис. 2. Электродвигатель Э через две червячные пары

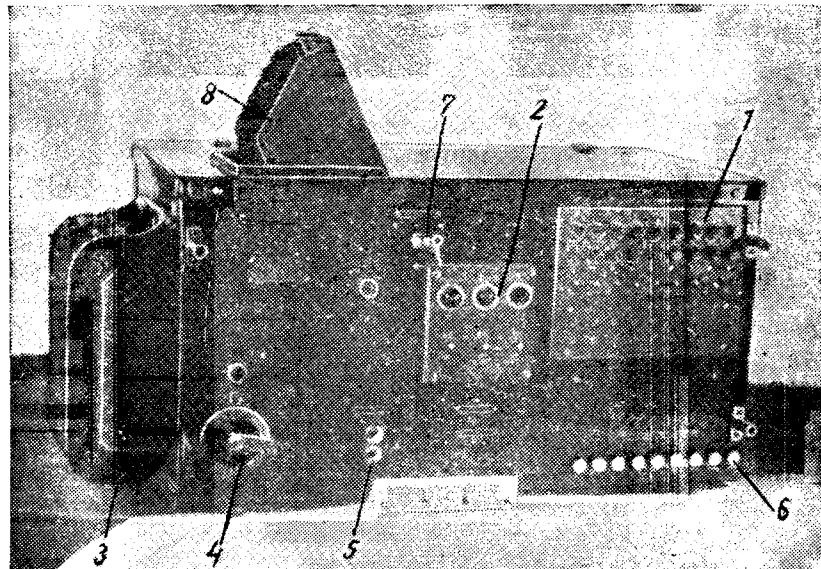


Рис. 1.

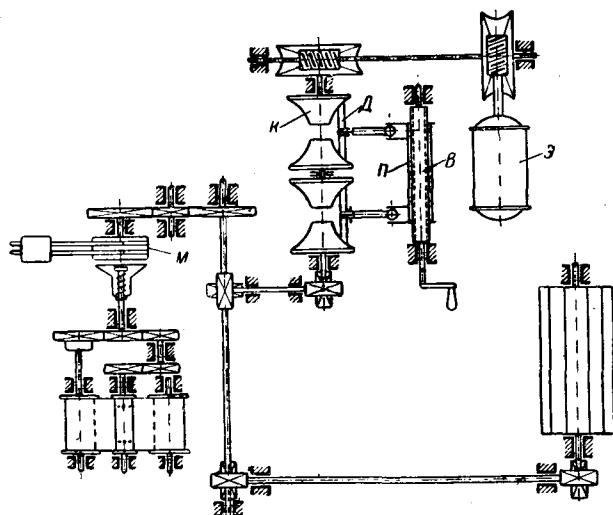


Рис. 2.

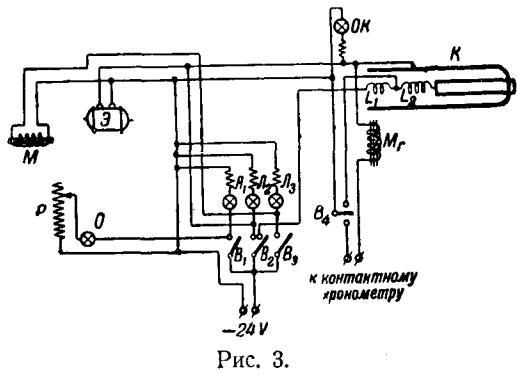


Рис. 3.

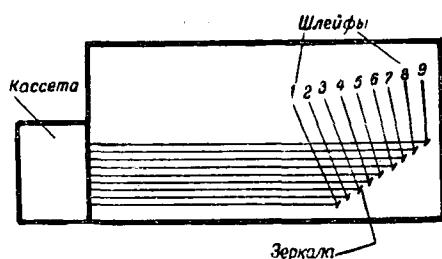


Рис. 4.

связан с валом торового фрикционного редуктора. Стальной конус  $K$  начинает вращаться, и прижатый к нему текстолитовый фрикционный ролик  $D$  приводит в движение второй стальной конус. Для обеспечения более широкой регулировки числа оборотов фрикционный редуктор изготовлен двухступенчатым. От выходного вала редуктора через ряд шестерен приводится во вращение магнитная муфта  $M$ . При включении тока эта муфта притягивает якорь-мембрану и включает перематывающий механизм кассеты. В кассете находятся сматывающая и наматывающая катушки и ведущий валик. На оси наматывающей

катушки установлена фрикционная муфта, обеспечивающая проскальзывание катушки по мере заполнения ее фотобумагой. От выходного вала редуктора одновременно приводится в движение зеркальный барабан развертывающего устройства. Регулировка скорости бумаги производится с помощью винта  $B$  при вращении которого ползунка  $P$  поворачивает фрикционные ролики  $D$ .

На рис. 3 показана электрическая (силовая) схема осциллографа. При замыкании выключателя  $B_1$  включается лампочка осветителя  $O$ , последовательно с которой включен реостат  $P$ . Реостат  $P$  связан с механизмом переключения скоростей, благодаря чему накал лампы изменяется с изменением скорости фотоленты. Выключатель  $B_2$  включает электродвигатель  $\mathcal{E}$  (50 W, 5 500 об/мин) и камертон  $K$  с осветителем  $OK$ ; последовательно с лампочкой последнего включено добавочное сопротивление. При включении  $B_2$  на мгновение замыкается контакт, соединенный с первичной низкоомной обмоткой камертонов  $L$ , и последний получает первый щипок. В дальнейшем возбуждение камертонов осуществляется при помощи высокоомной катушки  $L_3$ .

В цепи отметчика времени имеется также выключатель  $B_4$ , который обеспечивает включение камертона (при больших скоростях фотоленты) либо мигателя  $M_1$ , действующего от контактного хронометра (при малых скоростях фотоленты).

Выключатель  $B_3$  включает магнитную муфту  $M$ , соединяющую механизм осциллографа с перематывающим механизмом кассеты.

Горение сигнальных лампочек  $L_1$ ,  $L_2$  и  $L_3$  свидетельствует о том, что линии находятся под током.

Несмотря на то, что осциллограф записывает на нормальную фотобумажную ленту и имеет 9 шлейфов, габариты его сравнительно невелики. Существенного уменьшения габаритов удалось достигнуть за счет расположения шлейфов по задней, длинной стороне осциллографа, что схематично показано на рис. 4.

Применение в качестве коробки скоростей двойного фрикционного редуктора специальной конструкции, обеспечивающего равномерность хода фотобумаги без проскальзывания, позволяет производить переключение скоростей как во время остановок, так и на ходу при помощи одной рукоятки, что сильно упрощает управление прибором.

В настоящее время конструкторское бюро института приступает к изменению и дополнению некоторых узлов в осциллографе УО-1, что позволит расширить область его применения и, в частности, позволит увеличить скорость бумаги до 2-3 м/sec.

◆ ◆ ◆

# Круговые диаграммы электромагнитной асинхронной муфты

Кандидат техн. наук Е. К. МЕЗИН

Ленинградский электротехнический институт им. Ульянова (Ленина)

Электромагнитные асинхронные муфты в последнее время нашли широкое применение на морских дизельных судах для соединения гребного двигателя с винтом.

Асинхронная муфта представляет собой электрическую машину, состоящую из двух не связанных между собой механически вращающихся частей. Одна из частей муфты исполнена по типу полюсной системы, другая — ротора асинхронного двигателя. Одна часть вращается с валом гребного двигателя и при возбуждении полюсной системы постоянным током увлекает за собой другую часть, соединенную с валом гребного винта. Таким образом, принцип работы асинхронной муфты аналогичен принципу работы асинхронного двигателя.

**Векторная диаграмма.** На рис. 1 построена векторная диаграмма токов и э. д. с. муфты. При изменении нагрузки (скольжения) взаиморасположение и величины векторов также изменяются. Основное отличие режима работы электромагнитной асинхронной муфты от режима нормального асинхронного двигателя состоит в том, что у последнего величина намагничивающего тока  $I_0$  независимо от нагрузки двигателя остается практически неизменной, в то время как у асинхронной муфты, независимой от режима работы, является величина тока возбуждения  $I_2$ , а намагничивающий ток муфты  $I_0$  изменяется.

Установим зависимость векторов токов и э. д. с. от нагрузки (скольжения).

Из векторной диаграммы рис. 1 имеем:

$$I_2 = \frac{-jx_0 I_1' s}{r_2 + j(x_0 + x_2) s}, \quad (1)$$

$$I_0 = I_1' \frac{r_2 + jx_2 s}{r_2 + j(x_0 + x_2) s}. \quad (2)$$

Волях тока возбуждения  $I_2$  и  $I_0$  имеют следующие выражения:

$$|I_2| = \sqrt{\frac{x_0 s}{r_2^2 + (x_0 + x_2)^2 s^2}}, \quad (3)$$

$$|I_0| = \sqrt{\frac{r_2^2 + x_2^2 s^2}{r_2^2 + (x_0 + x_2)^2 s^2}}. \quad (4)$$

Зависимость  $|I_2| = f(s)$  и  $|I_0| = f_1(s)$  в декартовых координатах представлена на рис. 2. С увеличением скольжения величины токов  $I_2$  и  $I_0$  асимптотически приближаются к некоторым пределам. Этот предел для тока  $I_2$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} |I_2| = \frac{x_0}{x_0 + x_2},$$

для тока  $I_0$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} |I_0| = \frac{x_2}{x_0 + x_2}.$$

Заметим, что

$$\lim_{s \rightarrow \infty} |I_2| + \lim_{s \rightarrow \infty} |I_0| = 1.$$

Электродвижущая сила, наводимая во вторичной цепи муфты, волях э. д. с.  $E_m = I_1' x_0$ :

$$[E_s] = s \sqrt{\frac{r_2^2 + x_2^2 s^2}{r_2^2 + (x_2 + x_0)^2 s^2}}. \quad (5)$$

Функциональная зависимость  $[E_s] = f_{11}(s)$  также изображена на рис. 2. Кривая  $[E_s] = f_{11}(s)$  при увеличении скольжения асимптотически приближается к прямой, проходящей через начало координат и выражаемой уравнением

$$[E] = \frac{x_2}{x_2 + x_0} s.$$

**Круговая диаграмма.** Уравнение геометрического места конца вектора тока вторичной цепи  $I_2$  найдем в форме Bloch'a<sup>1</sup>, выделив из уравнения (1) целую часть:

$$I_2 = \frac{I_1'}{1 + \frac{x_2}{x_0}} e^{j\pi} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{x_2 + x_0}{r_2} e^{j\frac{\pi}{2}} s} \right]. \quad (6)$$

Это уравнение окружности в комплексной плоскости с диаметром

$$D_2 = \frac{I_1'}{1 + \frac{x_2}{x_0}}. \quad (7)$$

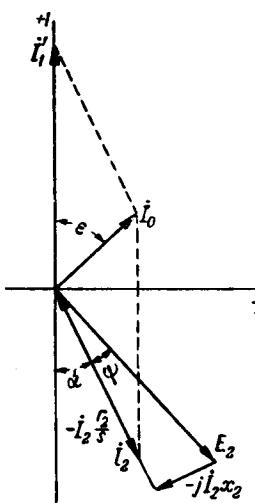


Рис. 1.

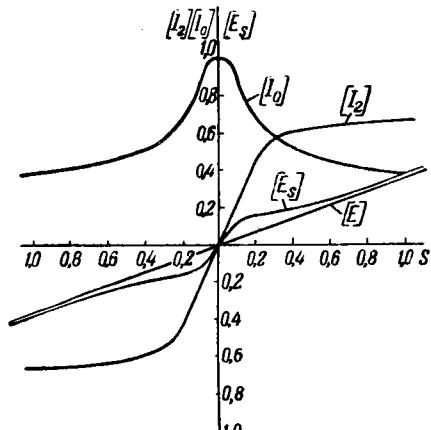


Рис. 2.

Точки на окружности тока  $I_2$ , соответствующие скольжениям  $s=0$  и  $s=\infty$ , располагаются диаметрально. Для скольжения  $-\infty < s < \infty$  точки на окружности могут быть определены при помощи члена из уравнения (6):

$$\frac{x_2 + x_0}{r_2} s = \operatorname{ctg} \alpha.$$

<sup>1</sup> Р. Рихтер. Электрические машины, Т. II, 1936.

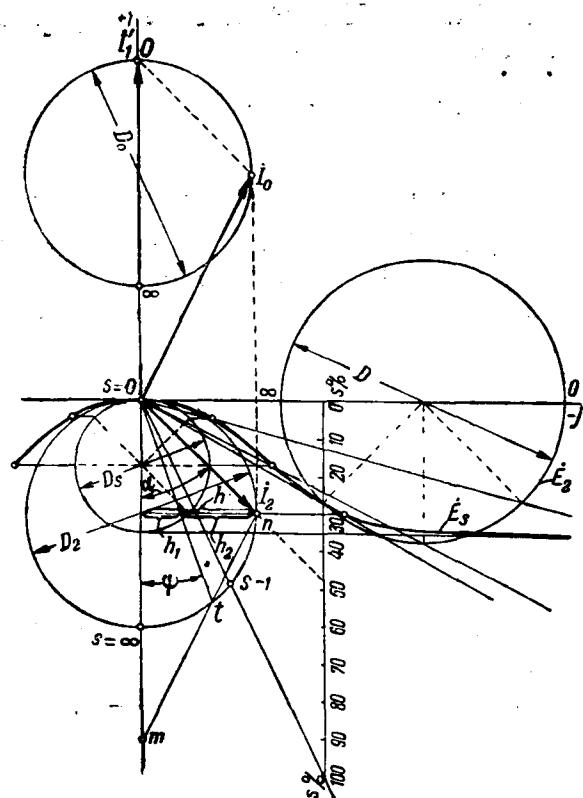


Рис. 3.

Уравнение геометрического места конца тока намагничивания  $I_0$  можно получить из выражения (2):

$$I_0 = \frac{i'_1}{1 + \frac{x_0}{x_2}} + \frac{i'_1}{1 + \frac{x_2}{x_0}} \frac{1}{1 + \frac{x_2+x_0}{r_2}} e^{j\frac{\pi}{2}s}. \quad (8)$$

Последнее уравнение также является окружностью, диаметр которой  $D_0 = D_2$ .

Аналогично получается уравнение геометрического места конца вектора э. д. с. вторичной цепи  $E_2$ :

$$\dot{E}_s = \frac{i'_1 x_2 e^{j\frac{3}{2}\pi}}{1 + \frac{x_2}{x_0}} s + \frac{i'_1 r_2 e^{j\pi}}{\left[1 + \frac{x_2}{x_0}\right]^2} \left[ 1 - \frac{1}{1 + \frac{x_2+x_0}{r_2} e^{j\frac{\pi}{2}s}} \right]. \quad (9)$$

Геометрическое место вектора  $\dot{E}_s$  и окружности тока  $I_2$  и  $I_0$  представлены на рис. 3.

**Мощность и вращающий момент.** Электромагнитная мощность асинхронной машины имеет следующее выражение:

$$P_{13} = m_2 l'^2_2 \frac{r_2}{s}.$$

Для асинхронной муфты:

$$P_{12} = m_2 r_2 l'^2_1 \frac{x_0^2 s}{r_2^2 + (x_2+x_0)^2 s^2}. \quad (10)$$

Вычтя из электромагнитной мощности джоулевы потери во вторичной цепи муфты  $q_2$ , получим полную механическую мощность муфты:

$$P_2 = m_2 r_2 l'^2_1 x_0^2 \frac{s - s^2}{r_2^2 + (x_2+x_0)^2 s^2}. \quad (11)$$

Вращающий момент муфты

$$M = \frac{P_{12}}{\omega_1} = \frac{m_2}{\omega_1} r_2 l'^2_1 \frac{x_0^2 s}{r_2^2 + (x_2+x_0)^2 s^2}. \quad (12)$$

Скольжение, соответствующее максимальному (опрокидывающему) моменту

$$s_0 = \pm \frac{r_2}{x_2 + x_0}. \quad (13)$$

Максимальный момент

$$M_0 = \pm \frac{m_2}{2 \omega_1} x_0^3 \frac{l'^2_1}{x_2 + x_0}. \quad (14)$$

В уравнениях (13) и (14) знак плюс относится к двигательному режиму муфты, минус — к генераторному.

Электромагнитная мощность и вращающий момент, каждые в своем масштабе, по диаграмме асинхронной муфты определяются перпендикуляром  $h$ , опущенным из данной точки на окружности тока  $I_2$  на вещественную ось (рис. 3). Действительно,  $h = I_2 \sin \alpha$ ; из рис. 1

$$\sin \alpha = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 + x_0)^2 s^2}};$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r_2}{(x_2 + x_0) s}.$$

После преобразований получим:

$$P_{12} = m_2 x_0 l'_1 h = A h, \quad (15)$$

$$M = \frac{m_2}{\omega_1} x_0 l'_1 h = A_1 h. \quad (16)$$

Отрезок перпендикуляра  $h_1$  в масштабе мощностей дает джоулевы потери  $q_2$ . Отрезком перпендикуляра  $h_2$  определяется полная механическая мощность

$$P_2 = P_{12} - q_2 = A h - A h_1 = A h_2. \quad (17)$$

**Скольжение.** Вследствие того, что  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{x_2 + x_0}{r_2} s$  пропорционален скольжению  $s$ , последнее может быть определено по шкале, построенной параллельно вещественной оси между линией полной механической мощности (линия, соединяющая точки  $s = 0$  и  $s = 1$ ) и мнимой осью. Луч, проведенный через вектор тока  $I_2$ , дает на шкале непосредственно величину скольжения для данного режима муфты.

**Коэффициент полезного действия.** Коэффициент полезного действия асинхронной муфты (без учета потерь в цепи возбуждения)

$$\eta = \frac{P_2}{P_{12}} = 1 - \frac{q_2}{P_{12}}.$$

Подставив сюда выражения (10) и (11), получим:

$$\eta = 1 - s. \quad (18)$$

Следовательно, к. п. д. муфты для данного режима работы может определяться по шкале скольжения.

**Угол  $\psi$ .** По отрицательному направлению вещественной оси от точки  $s=0$  (рис. 3) отложим отрезок, равный величине тока возбуждения  $I'_1$ . Соединим конец вектора тока  $I_2$  с точкой  $t$ . Линия  $tt'$  пересекает окружность в точке  $t$ . Как нетрудно показать, угол между направлением луча на точку  $t$  и диаметром есть угол  $\psi$  для данного режима работы муфты.

Для практических целей можно пользоваться только одним кругом рабочего тока  $I_2$ , из которого получаются все величины, характеризующие работу электромагнитной муфты.



## Относительная высота ориентировки молний

*Кандидат техн. наук А. П. БЕЛЯКОВ*

*Всесоюзный электротехнический институт*

За последние годы в ВЭИ получили развитие исследования избирательных свойств искровых разрядов, изыскания по установлению факторов, влияющих на путь развития разрядов и на защитную способность молниеотводов при разном их расположении относительно защищаемого объекта [Л. 1—4].

В 1932 г. [Л. 5] было установлено, что явление избирательной поражаемости искровым разрядом и молнией зависит от неоднородности строения грунтов, их проводимости, а также что объект с малым сопротивлением на землю поражается чаще, чем объект с высоким сопротивлением на землю. В 1935 г. И. С. Стекольниковым [Л. 6, 7] была дана более общая характеристика явления избирательной поражаемости участков земной поверхности. В 1936 г. указанное понятие было распространено на всю траекторию развития молнии [Л. 8].

В 1937 г. впервые [Л. 10] благодаря предложенному И. С. Стекольниковым методу торможения развития лидера сопротивлением в ВЭИ были получены фотографии развития искровых высоковольтных разрядов во времени и повторные разряды [Л. 11, 15]. В том же году удалось установить, что наряду с сопротивлением перенапряжение оказывает влияние на скорость развития лидеров разрядов [Л. 11]. Так, при данном расстоянии между электродами скорость

## Литература

1. И. Стецулла. Асинхронная муфта и ее применение в электровозах. Электричество, № 5, 1925.
2. А. А. Скоморохов. Электрическая муфта асинхронного типа. Электричество, № 3, 1928.
3. В. Т. Касьянов. Скользящие электромагнитные муфты для гребных приводов. Электросила, № 2—3, 1945.
4. M. R. Logu, L. A. Kilgore, R. A. Baudry. Electric Couplings. El. Eng., T. 59, 1940.
5. N. Ericson. Electromagnetic Slip—Couplings for Use with Geared Diesel—Engines for Ship Propulsion. ASEA Journal, № 4, 1936.
6. J. Wasmund. Electric Couplings in Marine Service. The Marine Eng. and Shipping Rev., № 5, 1940.
7. A. Reversible Magnetic Coupling. The Marine Eng., 1940.
8. A. Swedish Pilot Vessel. The Motor Ship, № 19, 1936.
9. Electric Couplings for Motor Ships. The Motor Ship, № 24, 1940.
10. Electromagnetic Ship Couplings. Shipbuilding and Shipping Record, № 20, 1937.
11. Magnetic Drive. El. World, т. 112, декабрь 1937.
12. H. Agmepo. ASEA slirkopplingsmaskinerier ASEA Tidning, № 3, 1945.
13. Accouplements électromagnétiques à glissement pour moteurs diesel marins. Bull. techn. Bureau Veritas, № 12, 1937.

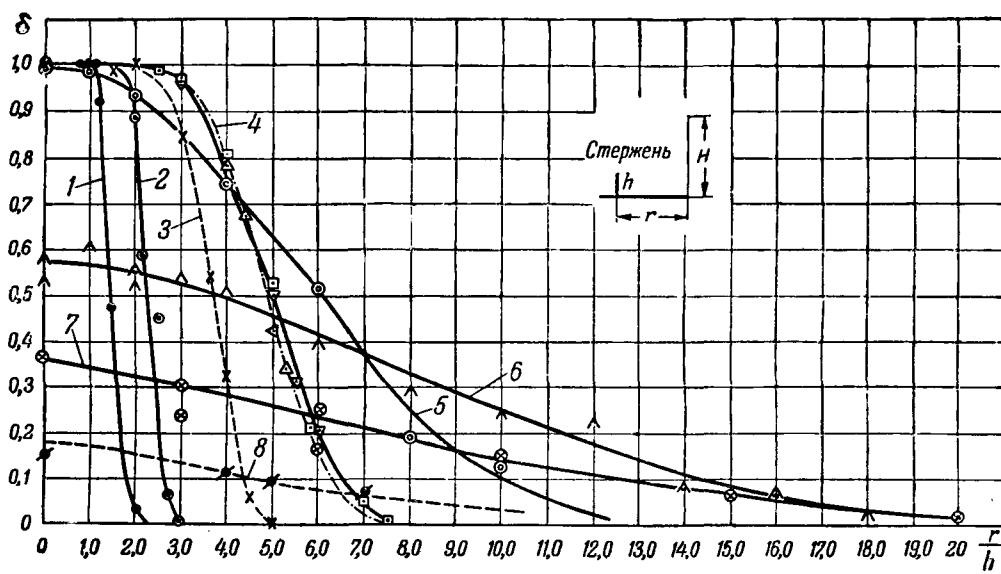


Рис. 1.

$$1 - \frac{H}{h} = \frac{3000}{1500} = 2; \gamma = 5.7 \text{ mm rt. ст.}; 2 - \frac{H}{h} = \frac{3000}{600} = 5; \gamma = 5.7 \text{ mm rt. ст.}; 3 - \frac{H}{h} = \frac{3000}{300} = 10; \gamma = 5.5 \text{ mm rt. ст.};$$

$$4 - \frac{1000}{50} = 20; \gamma = 2.9, 4.4 \text{ и } 10.5 \text{ mm rt. ст.}; 5 - \frac{H}{h} = \frac{1200}{30} = 40; \gamma = 3.3 \text{ mm rt. ст.}; 6 - \frac{H}{h} = \frac{1200}{15} = 80; \gamma = 4.2 \text{ mm rt. ст.};$$

$$7 - \frac{H}{h} = \frac{1200}{10} = 120; \gamma = 2.9 \text{ mm rt. ст.}; 8 - \frac{H}{h} = \frac{1200}{5} = 240; \gamma = 4 \text{ mm rt. ст.}$$

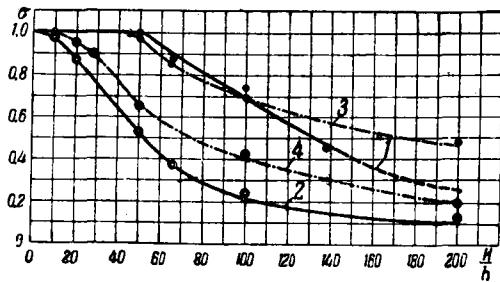


Рис. 2.

1—стержень:  $v_{cp} \sim 5 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$ ;  $\gamma \sim 8 \text{ mm rt. ст.}$ ; 2—стержень:  $v_{cp} \sim 2.4 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ ;  $\gamma \sim 7.5 \text{ mm rt. ст.}$ ; 3—трос:  $v_{cp} \sim 5 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$ ;  $\gamma \sim 7.5 \text{ mm rt. ст.}$ ; 4—трос:  $v_{cp} \sim 2.4 \cdot 10^8 \text{ см/сек}$ ;  $\gamma \sim 9.5 \text{ mm rt. ст.}$

определяет подобные условия исследований на модели, а также и коэффициент импульса. Зоны защиты при разных размерах модели, но при одинаковых относительных размерах и при минимальных разрядных импульсных напряжениях (с 50%-ным перекрытием в обычных схемах ударных контуров) получаются разными потому, что с изменением размера модели меняются участковые и средние скорости развития лидеров разрядов.

Влияя на скорости развития лидеров разрядов, можно было получить при малых размерах модели зоны защиты, наблюдаемые при больших размерах модели.

В одних случаях с увеличением скорости развития лидеров можно было наблюдать уменьшение вероятности поражения защищаемого молниеотводом объекта, а в других, более редких случаях, наоборот, увеличение вероятности поражения защищаемого молниеотводом объекта, но открытая закономерность всюду имела место.

Обнаруженная зависимость защитного дей-

ствия молниеотводов и избирательной поражаемости от скорости развития лидеров не равнозначна положению, что поражаемость объекта зависит от перенапряжения или коэффициента импульса. Последнее является лишь частной характеристикой общей установленной закономерности и, следовательно, не полно объясняет явление. Последнее явствует из того, что для моделей, разных по абсолютному размеру, но одинаковых по относительным размерам, одному и тому же коэффициенту импульса будут соответствовать разные участковые и средние скорости развития лидеров [Л. 14].

Найден экспериментальный метод определения относительной высоты ориентировки лидеров на возвышающийся объект, причем за относительную высоту ориентировки лидера принимается такое относительное положение в пространстве верхушек развивающихся лидеров при нахождении грозового центра над объектом, когда почти все лидеры (до 90% от общего их числа) направляются или избирают путь на возвышающийся объект.

Чем больше относительная высота  $\frac{H}{h}$  грозового центра, (+) тем меньшее число разрядов (σ) направляется в возвышающийся объект (рис. 1, объект—стержень). На рис. 1 представлен ход поражаемости заземленного стержня (h) при различном относительном положении центра разрядов  $H$  и разных отношениях  $\frac{H}{h}$ .

Относительная высота ориентировки первых лидеров высоковольтных разрядов зависит от скорости их развития (и от  $\gamma$  в  $\text{мм rt. ст.}$ ). На рис. 2 представлены значения поражаемости σ объектов разной вы-

соты разрядами, характеризующимися различными средними скоростями  $v_{cp}$  лидеров, при  $H=2000$  м. Обозначено  $\sigma = \frac{n_1}{n}$ , где  $n$  — общее число разрядов из центра разрядов, расположенного над объектом, и  $n_1$  — число разрядов, поразивших объект. Средние скорости найдены для случая развития разрядов от центра разрядов к плоскости (т. е. при отсутствии стержня).

Относительная высота ориентировки лидеров при поражении заземленного стержня или троса возрастает с увеличением средней скорости развития лидеров. Для данной средней скорости развития лидеров высота ориентировки лидеров при поражении стержня или троса одного порядка, когда центр разрядов расположен над поражаемым объектом. С увеличением скоростей развития лидеров высота ориентировки лидеров становится несколько больше для стержня, чем для троса. Наоборот, с уменьшением скорости лидера высота ориентировки лидера на трос становится большей, чем высота ориентировки лидера на стержень. Далее, по мере увеличения отношения высоты центра разрядов к высоте объекта уменьшается процент разрядов, поражающих объект, причем этот процент обычно больше для случая поражения троса, чем стержня (рис. 2).

В реальных условиях средние скорости первых лидеров молний могут отличаться друг от друга по порядку величины. Однако, их значения обычно заметно превышают средние скорости развития лидеров лабораторных незаторможенных высоковольтных разрядов. Можно считать, что средняя скорость развития большинства лидеров молний порядка  $10^8$  см/сек и более.

В этом случае есть основания принять за расчетную относительную высоту ориентировки лидеров молний величину порядка  $\frac{H}{h} = 40$  как для заземленного стержня, так и для заземленного троса (при высоте грозового центра  $H_{2,4} \geq 40 h$  и  $\gamma = 11$  м. рт. ст.).

В таблице приведены углы защиты одиночного заземленного троса при расчетных высотах ориентировки  $\frac{H}{h} = 10$  и 40. Как видно, увеличение  $\frac{H}{h}$  с 10 до 40 позволяет принять увеличенное значение угла защиты.

Угол защиты заземленного троса при расчетных высотах ориентировки  $\frac{H}{h} = 10$  и  $\frac{H}{h} = 40$

| $\frac{H}{h}$ | $\frac{h_0}{h}$ | Угол защиты $\alpha_0$ | Вероятность поражения | Примечание                              |
|---------------|-----------------|------------------------|-----------------------|---|
| 10            | 0,75            | 35°                    | —                     | Данные А. А. Акопяна                    |
| 40            | 0,75            | 48°                    | —                     | Экстраполированные данные А. А. Акопяна |
| 40            | 0,75            | 45°                    | $10^{-6}$             | По формуле А. П. Белякова [Л. 13]       |
| 40            | 0,9             | 44°                    | $10^{-6}$             | По формуле А. П. Белякова               |

При переходе к  $\frac{H}{h} = 40$  соответственно возрастают и значения коэффициентов защиты для одиночного стержневого молниеводоударного.

#### Литература

1. К. Шапошников. Электрический пробой в газах и вероятность его возникновения. Вестник электротехники, № 7—8, 1930; № 1, 1931.
2. Л. И. Иванов. Исследования зон защиты молниеводоударов. Отчеты ВЭИ за 1930 и 1931.
3. Л. И. Иванов и А. П. Беляков. Руководящие указания по защите строений от грозовых разрядов. ВЭИ, 1932.
4. Л. И. Иванов и С. Л. Зайенц. Защитное действие заземленных стержней и горизонтально подвешенных тросов от прямых ударов молний. ВЭК, 1933.
5. Л. И. Иванов, А. П. Беляков и С. Л. Зайенц. О влиянии некоторых факторов на распределение разрядов молний. Отчет ВЭИ Р-580-01, 1932.
6. И. С. Стекольников. Об избирательной поражаемости молнией земной поверхности. Отчеты ВЭИ, 1935.
7. И. С. Стекольников. Современное состояние изучения молний. Электричество, № 8 и 9, 1936.
8. И. С. Стекольников и А. П. Беляков. Экспериментальное исследование искрового разряда. Электричество, № 22, 1936.
9. А. П. Беляков и Б. Ханов. Электричество, № 22, 1936.
10. И. С. Стекольников, А. П. Беляков и И. Н. Мякишев. Изучение искрового разряда в лаборатории перенапряжений ВЭИ. Электричество, № 8, 1937.
11. А. П. Беляков и И. С. Стекольников. Отчет ВЭИ. Р-071-04, 1937.
12. А. А. Акопян. Отчет ВЭИ, 1937, Труды ВЭИ, вып. 36, 1940.
13. А. П. Беляков. Электричество, № 8 и 10—11, 1939; № 1, 3, 7, 1940; Бюллетень ВЭИ, № 4, 7, 1940; № 1, 4, 5, 1941.
14. А. П. Беляков. Бюллетень ВЭИ, № 6, 1941.
15. А. П. Беляков. Электричество, № 9, 1938.



# Дискуссии

## К статье В. К. Попова

### „К ОБОБЩЕНИЮ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА“ (стр. 55 этого номера)

*На статью проф. В. К. Попова поступили замечания проф. С. А. Ринкевича, проф. Д. П. Морозова, проф. Р. Л. Аронова, проф. Е. В. Нитусова, проф. А. Т. Голована и доц. И. И. Петрова. Эти замечания и ответ проф. В. К. Попова публикуются в кратком изложении.*

Останавливаясь на замечаниях принципиального характера, следует прежде всего указать на общую оценку разработанной проф. В. К. Поповым классификации режимов электрифицированных агрегатов.

Проф. Р. Л. Аронов, отмечая дальнейшее развитие принципиальной схемы, предложенной В. К. Поповым еще в 1932 г., указывает, что эта задача в настоящее время, в связи с широким развитием техники в области электропривода, весьма осложнилась. Указывая на некоторые случаи, выходящие за рамки схемы В. К. Попова (взаимная зависимость механических характеристик электродвигателей и процессов управления электроприводами, влияние степени жесткости сети или системы питания двигателей энергией и т. д.), Р. Л. Аронов отмечает отсутствие исчерпывающей полноты и законченности в схеме автора, добавляя при этом: возможно, что это и недостижимо.

Проф. Е. В. Нитусов считает, что в новой статье В. К. Попова поставлен ряд уже известных общих вопросов и что статья не дает достаточно новых принципиальных положений по сравнению с ранее опубликованными работами, за исключением, может быть, вопроса о теплоэлектромеханических режимах.

По мнению проф. Д. П. Морозова, основные вопросы теории электропривода должны обсуждаться не в направлении их обобщения, а по существу их содержания и по их значимости в свете поставленных перед техникой основных задач. Д. П. Морозов считает, что обобщение, которое не является главной целью теории, должно происходить незаметным образом, без того, чтобы на этом делать специальный упор. В статье автора, по мнению Д. П. Морозова, несомненно, наблюдается увлечение вопросами классификации, которая не должна переходить в рецептуру.

Проф. С. А. Ринкевич считает, что автором не выяснена задача предложенной классификации и что пока трудно сказать что-либо определенное о пользе этой классификации. При этом С. А. Ринкевич ссылается на следующую фразу самого автора: «Рассмотрение методики решения уравнений движения в самой общей формулировке не может дать каких-либо практических и теоретических выводов» и далее «решение уравнений движения должно производиться для частных случаев». Что касается самого принципа классификации переходных режимов, основанной на математической форме описания режимов, то, по мнению С. А. Ринкевича, указывающего на статью Минорского „Control Problems“ (Journal of the Franklin Institute, 1931) этот принцип не является нововведением.

По мнению доц. И. И. Петрова, обобщение какой-либо теории в технике обычно представляет собой переход от частных математических зависимостей, найденных теоретическим или экспериментальным путем и характеризующих отдельные процессы одного и того же физического явления, к общему математическому выражению, из которого может быть получено любое частное выражение. Рассматриваемая статья касается, по существу, не обобщений в теории электропривода, а выяснения объектов и масштабов обобщений, причем метод такого выяснения путем классификации всех элементов теории привода является весьма сложным и ненадежным. И. И. Петров считает, что разра-

ботанная автором классификация очень громоздка и не вносит чего-либо нового в теорию и практику электропривода. Основное положение автора о том, что теория электропривода должна обобщать опыт различных отраслей промышленности, транспорта, военной техники и морского дела, по мнению И. И. Петрова, общеизвестно и едва ли нуждается в особых доказательствах.

Из частных замечаний, касающихся отдельных вопросов, следует указать на замечание проф. С. А. Ринкевича о неправильности распространения уравнений, выведенных для шунтовых двигателей постоянного тока, на коротко замкнутые асинхронные и с переключением полюсов. Такое обобщение даже в пределах работы между скользящим, равным нулю, и точкой опрокидывания приводит к недостаточно точным решениям вследствие непрямолинейности характеристик асинхронных двигателей. Кроме того, по мнению С. А. Ринкевича, для решения вопросов автоматизированного электропривода при поддержании постоянства скорости, мощности или момента важен не порядок уравнений, т. е. не геометрический вид характеристик, а род параметров, входящих в уравнение; с этой точки зрения имеется резкое различие между шунтовыми и асинхронными двигателями.

Другое замечание С. А. Ринкевича относится к тому, что автор считает излишним подразделение классов по виду функции  $M_m(v)$ . С. А. Ринкевич указывает, что этот вид функции является решающим при выборе системы регулирования скорости электропривода.

Проф. А. Т. Голован, приводя фразу автора об изменении маховых масс системы двигатель—машина за счет кинематической схемы соответствующих передач, указывает, что маховые массы системы за счет кинематической схемы меняться не могут.

Далее А. Т. Голован считает неправильным утверждение автора, что статический момент механизма может зависеть лишь от скорости, пути и времени. А. Т. Голован отмечает также, что статический момент может зависеть также от температуры и ряда технологических факторов, качества смазки и т. п.

В своем ответе на замечания проф. В. К. Попов указывает на то, что эти замечания иногда противоречат друг другу. В то время, как проф. Р. Л. Аронов говорит о значительном усложнении классификации, разработанной автором в данной статье, по сравнению со схемами, предложенными в более ранних работах, другие лица считают, что в классификации имеются лишь уже известные вопросы. В этой связи В. К. Попов предлагает сопоставить данную статью с его работами 1932 г. («Применение электродвигателей в промышленности») и 1936 г. (статья в журнале «Электричество», № 21, 1936).

В. К. Попов соглашается с Р. Л. Ароновым в том, что ввиду сложности вопроса исчерпывающая полнота классификации, возможно, и недостижима. Однако, В. К. Попов полагает, что было бы неправильно отказаться от дальнейших попыток сведения большого количества решений в единую общую систему, так как это было бы равносильным признанию невозможности создания общей теории движения электропривода. В. К. Попов для сравнения указывает, что хотя вопросами теорий автоматического регулирования

занимаются уже свыше 150 лет, общей теории автоматического регулирования до сих пор не удалось создать, хотя она, конечно, может быть оформлена на основе накопленного большого материала.

В. К. Попов не соглашается с мнением Д. П. Морозова о том, что обобщение в науке происходит «незаметным образом». Обобщающие труды Арнольда по электрическим машинам, обобщающие труды Толле по классической теории автоматического регулирования вряд ли являются «незаметными» этапами. Научные работники должны пытаться идти по пути обобщения и в сложной области автоматизированного электропривода.

Фраза, на которую ссылается проф. С. А. Ринкевич, по мнению проф. В. К. Попова, не противоречит духу работы. Она говорит лишь о том, что все частные случаи уравнений движения привода, естественно, не могут быть сведены к одному виду, однако они могут быть приведены к некоторому минимальному числу уравнений. Замечание С. А. Ринкевича о направлении работы Минюрского В. К. Попов считает недоразумением, так как, во-первых, статья Минюрского совсем не охватывает проблем электропривода; во-вторых, она почти не касается нелинейных задач, тогда как в классификацию В. К. Попова входят и нелинейные задачи, прежде всего с любой зависимостью статического момента рабочих машин от пути.

На замечание С. А. Ринкевича об обобщении уравнений для шунтовых двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей В. К. Попов указывает, что рабочие режимы асинхронных крановых двигателей с фазовым ротором рассчитываются так же, как и для шунтовых двигателей; вторым аналогичным примером может быть расчет режимов при пиковых нагрузках, с регуляторами скольжения. Что же касается случаев поддержания постоянства скорости регулируемых приводов (стабилизация), то для подобных условий асинхронные двигатели практически не применяются. Случай же синхронной связи в классификации автора выделены особо.

Данное в свое время Blanc'ом подразделение рабочих машин по виду функции  $M_m = f(v)$  В. К. Попов считает с точки зрения классификации нагрузочных диаграмм устаревшим, а с точки зрения методики решения уравнений движения привода не характерным.

Замечания проф. А. Т. Голована, по мнению В. К. Попова, обусловлены также недоразумением. При рассмотрении кинематической схемы привода речь идет, очевидно, о приведенном наховом моменте привода, который, например, в схеме с кривошипной передачей, конечно, будет меняться. Зависимости же статического момента рабочих машин от температуры, смазки и тому подобных факторов могут в уравнениях движения привода выражаться в виде функции времени.



## ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ

### К рецензии Я. М. Червоненкиса на книгу

«ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ С МОЩНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ»  
(Электричество, № 3, 1947)

Рецензия кандидата техн. наук Я. М. Червоненкиса, в которой дан весьма благоприятный отзыв по всем основным разделам монографии, содержит некоторые замечания по вопросу, затронутому авторами в монографии лишь по-путно.

Соглашаясь с рецензентом, что «вопрос о связи между вероятностью обратного зажигания и параметрами электрических цепей значительно сложнее, чем это изложено в книге», необходимо отметить, что этот вопрос значительно сложнее и той его трактовки, которая дается рецензентом. Из той же работы К. Н. Kingdon, E. J. Lawton, на которую ссылается Я. М. Червоненкис, следует, что рассуждения Я. М. Червоненкиса неприменимы к вентилям со свободным или с недостаточно защищенным деионизирующими сетками и экранами анодным пространством. В этом случае с увеличением индуктивности цепи переменного тока увеличивается и вероятность обратных зажиганий при неизменной средней мощности в цепи выпрямленного тока, в полном соответствии с тем, как это отмечено в монографии. В связи с этим представляют интерес результаты наблюдений авторов, полученные ими в процессе исследования реальной выпрямительной установки весьма большой мощности. Вследствие отсутствия токоограничивающего реактора в цепи одного из трансформаторов этой установки оказалось невозможным эксплуатировать один из мощных ртутно-выпрямительных агрегатов, так как даже при весьма редких обратных зажиганиях трансформатор выходил из строя. Ввиду чрезвычайной важности ввода в эксплуатацию этого агрегата и невозможности получения недостающего реактора этот агрегат был переведен по рекомендации авторов на питание от отдельного генератора близлежащей гидростанции по самостоятельной цепи линии передачи. На выделенный агрегат были переставлены ртутные выпрямители, до этого безуспешно работавшие от общей сети всей

мощной энергосистемы через нормальные токоограничивающие реакторы. Опыт эксплуатации отчетливо показал, что при питании от отдельного генератора со значительной реактивностью цепи (около 30%) те же ртутные выпрямители стали давать заметное число обратных зажиганий, хотя и не опасных для оборудования вследствие ограниченного тока короткого замыкания. Это увеличение числа обратных зажиганий было связано, очевидно, с искажением кривой напряжения и увеличением скачка обратного анодного напряжения под влиянием повышенной индуктивности цепи переменного тока (см. статью авторов, Электричество, № 1, 1947, рис. 12).

Другое замечание рецензента, касающееся возникновения колебательного процесса, не имеет отношения к вопросу о характере функциональной связи между величиной скачка обратного анодного напряжения  $U_o$  и рассмотренными параметрами цепи, так как амплитуда колебаний пропорциональна величине  $U_o$ . Кроме того, этот вопрос также является более сложным, чем он представлен в трактовке рецензента. Возникновение колебаний ведет не только к увеличению амплитудного значения скачка обратного напряжения, но и к некоторой задержке в наступлении этого амплитудного значения, так как напряжение нарастает по закону  $\Delta U_o(1 - \cos \omega_0 t)$ , где  $\omega_0$  — частота собственных колебаний контура. Это обстоятельство должно сказываться благоприятно на снижении вероятности обратных зажиганий. Вопрос о связи вероятности обратных зажиганий с параметрами электрической цепи является, по мнению авторов, весьма актуальным, особенно в отношении высоковольтных вентиляй, и в настоящее время представляет предмет специальных исследований авторов.

Член-корр. АН СССР, проф. М. П. КОСТЕНКО

Доктор техн. наук, проф. Л. Р. НЕЙМАН



## Защита сборных шин

(Обзор)

Неоднократно имевшие место на практике случаи коротких замыканий на сборных шинах электростанций и подстанций побудили эксплоатационные и проектные организации заняться разработкой специальных видов защит шин. В литературе имеются указания о том, что дифференциальная защита шин в одной из американских систем была установлена еще в 1924 г. [Л. 1]. Однако, если не считать отдельных случаев применения дифференциальных защит шин, практически более широкое внедрение их в эксплуатацию следует отнести в основном к началу тридцатых годов. В Советском Союзе одной из первых энергосистем, осуществивших дифференциальную защиту шин, была система Мосэнерго. Первоначальная схема защиты шин, выполненная Мосэнерго в 1934 г., была спроектирована применительно к защите от замыканий на землю. В дальнейшем дифференциальная защита шин стала применяться в СССР с охватом всех видов замыканий [Л. 13].

К настоящему времени в СССР разработаны и широко внедрены в энергосистемы различные другие виды дифференциальных защит шин, которые достаточно полно описаны в отечественной литературе и включены в «Руководящие указания по релейной защите».

В международной практике наряду с дифференциальной защитой шин нашли применение также и другие типы защит шин, а именно: защита от замыканий на землю с применением специальной заземляющей шины, неполная дифференциальная защита и др.

Первый из указанных типов защит, получивший распространение только в США, основан на использовании тока замыкания на землю, направляющегося по специальной заземляющей шине, к которой присоединяются все металлические части распределительных, подлежащих заземлению. Заземляющая шина имеет связь с землей через трансформатор тока, во вторичной цепи которого включено реле максимального тока мгновенного действия (производящее отключение).

Второй тип защиты применяется, главным образом, на шинах электрических станций или распределительных подстанций, причем дифференциальная защита приключается только к трансформаторам тока питающих элементов. При коротких замыканиях на отходящих фидерах защита шин

не действует, благодаря отстройке по времени или благодаря применению импедансных реле, отстроенных по уставке от коротких замыканий за фидерными реакторами (в случае наличия последних).

В 1939 г. Комитетом защитных устройств Американского института инженеров-электриков был проведен опрос 34 электроустановок, и на основе полученных ответов подтверждены статистические данные, сведенные в табл. 1, 2 и 3. Из числа опрошенных АИЕЭ предприятий одиннадцать, имевших 483 комплекта защит шин, не принимали никаких мер против токов небаланса, вызываемых насыщением сердечников трансформаторов тока, так как дифференциальные реле, применяемые ими, были индукционного типа. Что касается предприятий, обладавших дифференциальными реле мгновенного действия, то ими в той или иной форме проводились мероприятия по снижению токов небаланса, искусственно замедлению защиты или применению торможения от высших гармонических. Наиболее крупная система, в составе которой имелось 182 комплекта быстродействующих защит шин, практиковала выбор трансформаторов тока с коэффициентом отношения номинального тока к току короткого замыкания не менее 1 : 10. Это в некоторой степени гарантировало от чрезмерного насыщения сердечников трансформаторов тока при внешних коротких замыканиях. Наряду с проблемой насыщения на практике возник вопрос об отстройке от внешних коротких замыканий при максимальных режимах в тех случаях, когда по условиям минимальных режимов при коротких замыканиях в зоне требовалось значительное повышение чувствительности дифференциальных реле. В связи с этим были разработаны специальные конструкции трансформаторов тока, не насыщающиеся под влиянием апериодических составляющих. Однако, их габариты, веса и стоимости могли быть оправданы только на наиболее ответственных установках.

Для устранения неправильного действия дифференциальной защиты шин при использовании трансформаторами тока были разработаны дифференциальные реле с большим числом тормозных катушек [Л. 2, 8], допускающие минимальную уставку первичного тока трогания порядка 1% от максимального значения тока при внешнем коротком замыкании.

Таблица 1

### Американские статистические данные об установках, оборудованных защитой шин

| Тип защиты                             | Число комплектов защит |                 | Гип установки |            | Тип распределительных устройств |         | Напряжение кВ |       |       |         | Режим заземления нулевой точки |                        |         |                             |
|--|------------------------|-----------------|---------------|------------|---------------------------------|---------|---------------|-------|-------|---------|--------------------------------|------------------------|---------|-----------------------------|
|  | Установлено            | Запроектировано | Станция       | Подстанция | Открыты                         | Закрыты | 2—9           | 11—22 | 33—88 | 110—220 | Глухое заземление              | Активное сопротивление | Реактор | Изолированная нулевая точка |
| А. Дифференциальная . . . . .          | 803                    | 38              | 172           | 667        | 543                             | 294     | 100           | 338   | 252   | 153     | 415                            | 333                    | —       | 87                          |
| Б. С заземляющей шиной . . . . .       | 197                    | 5               | 132           | 70         | 37                              | 165     | 6             | 165   | 24    | 5       | 62                             | 121                    | 8       | —                           |
| В. Неполная дифференциальная . . . . . | 132                    | 37              | 62            | 107        | 71                              | 98      | 32            | 104   | 4     | 29      | 92                             | 33                     | 4       | 10                          |
| Всего . . . . .                        | 1 132                  | 80              | 366           | 844        | 651                             | 557     | 138           | 607   | 280   | 187     | 569                            | 493                    | 12      | 97                          |

Американские статистические данные о типах защит шин

Таблица 2

| Тип защиты                               | Виды повреждений, охватываемых защитой |          |          | Типы реле      |                    |             |                         | Типы трансформаторов тока |           |            |                 | Число случаев действия за- щит |                 |    |             |                         |
|--|--|----------|----------|----------------|--------------------|-------------|-------------------------|---------------------------|-----------|------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|----|-------------|-------------------------|
|  |  |          |          | Токовые        |                    |             | Импедансные             |                           | Бушиновые |            | Продольные      |                                | Многовитко- вые |    | Общее число | В том числе неправильно |
|  | Междудо- зовные                        | На землю | Все виды | Индук- ционные | Электро- магнитные | Обоих типов | Балансные с торможением | Импедансные               | Бушиновые | Продольные | Многовитко- вые | Разные                         |                 |    |             |                         |
| А. Дифференциальная                      | 266                                    | 47       | 484      | 258            | 386                | 41          | 150                     | 4                         | 613       | 121        | 52              | 30                             | 155             | 32 |             |                         |
| Б. С заземляющей шиной . . . . .         | —                                      | 193      | —        | 14             | 91                 | 94          | —                       | —                         | 39        | 51         | 97              | 3                              | 55              | 15 |             |                         |
| В. Неполная диффе- ренциальная . . . . . | 53                                     | 24       | 90       | 53             | 25                 | 4           | 47                      | 19                        | 69        | 37         | 37              | —                              | 4               | 1  |             |                         |
| Всего . . .                              | 319                                    | 269      | 574      | 325            | 502                | 139         | 197                     | 23                        | 721       | 209        | 186             | 33                             | 214             | 48 |             |                         |

кции. Время действия такой защиты 0,05—0,06 sec. В случае сборных шин с большим числом отходящих линий количество потребных тормозных катушек может возрасти настолько, что конструктивное оформление дифференциальных реле практически окажется крайне затруднительным. В связи с этим разработка быстродействующих дифференциальных защит шин пошла в основном по двум путям: а) по линии использования принципа торможения высшими гармоническими [Л. 6, 14] и б) по линии искусственного уменьшения токов небаланса в цепях дифференциальных защит [Л. 3—5, 8—12].

В настоящее время еще не имеется подробных сведений об опыте эксплуатации дифференциальных защит, использующих принцип торможения. Следует полагать, что практическое применение этого принципа встретит ряд трудностей в связи с отсутствием точных данных относительно процентного содержания высших гармонических в токах, протекающих в дифференциальных цепях при всевозможных аварийных режимах.

В 1942 г. фирмой Westinghouse была выпущена дифференциальная защита сборных шин, основанная на применении взамен обычных трансформаторов тока—катушек взаимоиндукции (Linear Couplers), насаживаемых на втулки выключателей. Иначе говоря, для дифференциальной защиты были применены одновитковые трансформаторы тока, имеющие воздушные сердечники [Л. 8—12]. Благодаря отсутствию железных сердечников исключались явления, связанные с насыщением, и обеспечивалась почти линейная зависимость между первичным током и вторичным напряжением. Как видно из однолинейной схемы соединений катушек взаимоиндукции (рис. 1), последние в отличие от трансформаторов тока соединены последовательно, образуя замкнутый контур с включенной в него обмоткой дифференциального реле. В указанном контуре индуктируется э. д. с., пропорциональная алгебраической сумме токов всех линий, охваченных данной дифференциальной защитой. При нормальном режиме или внешнем коротком замыкании в соответствии с первым законом Кирхгофа, означенная сумма токов равна нулю и соответствующая э. д. с. в контуре отсутствует. При коротком замыкании на шинах в контуре наводится э. д. с., пропорциональная суммарному току короткого замыкания, и дифференциальное реле действует на отключение выключателей всех линий, присоединенных к поврежденным шинам. Таким образом, результатирующая э. д. с. в цепи дифференциальной защиты при одинаковых коэффициентах взаимоиндукции катушек равна:

$$E = j \omega M \cdot \Sigma I$$

и соответственно ток в дифференциальном реле

$$I_p = \frac{j \omega M \cdot \Sigma I}{Z}.$$

Таблица 3

## Причины неправильных действий защиты шин

| Число неправильных действий | Причины  |
|-----------------------------|--|
| 8                           | Ошибка в монтаже   |
| 4                           | Ошибка при плановых испытаниях   |
| 1                           | Неисправность дифференциального реле   |
| 5                           | Погрешности проекта  |
| 3                           | Конструктивные недочеты  |
| 2                           | Неисправности бушиновых трансформаторов тока                                     |
| 2                           | Заземление цепи дифференциального реле   |
| 1                           | Неисправность промежуточного реле  |
| 8                           | Неисправность изоляции заземляющих шин   |
| 14                          | Прочие причины, в том числе токи небаланса, вызванные апериодическими слагающими |

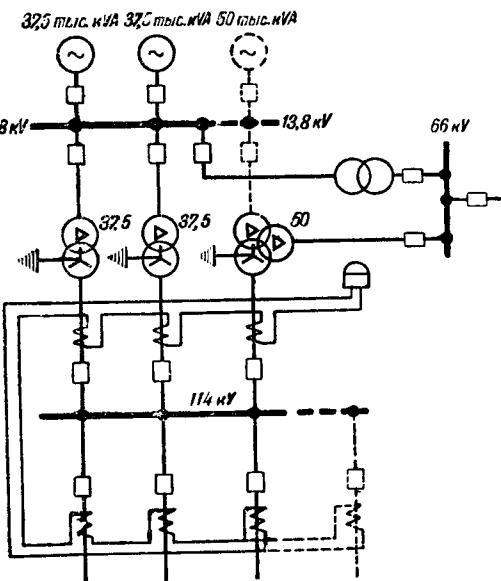


Рис. 1. Дифференциальная защита шин подстанций Middletown с применением катушек взаимоиндукции.

Здесь  $\Sigma I$  представляет собой сумму первичных токов, а  $Z$  — суммарное сопротивление цепи дифференциальной защиты.

В процессе разработки этой защиты в числе прочих вопросов встало задача наиболее эффективного использования малой мощности катушек взаимоиндукции и создания катушек, обладающих одинаковыми коэффициентами взаимоиндукции и не подверженными влияниям внешних полей. В результате проведенных исследований катушка взаимоиндукции была выполнена в виде тороида с немагнитным сердечником. Ток, протекающий в катушке, создает при этом магнитный поток, почти полностью скомпенсированный с проводником, проходящим через отверстие катушки. При этом способе выполнения катушки влияние обратного (внешнего) проводника получается минимальным, и положение катушки относительно прямого (внутреннего) проводника не оказывает заметного влияния на величину индуктируемой э. д. с. Таким образом, катушка тороидальной формы имеет определенный коэффициент взаимоиндукции по отношению к первичному (внутреннему) проводнику и индуктивно почти не связана с проводниками, расположеннымными вблизи. Что касается идентичности отдельных катушек, то удалось обеспечить точность коэффициента взаимоиндукции в пределах  $\pm 1.5\%$ . Если исходить из расчета установленвшегося режима, то при возможных отклонениях величины  $M$  от среднего значения на  $\pm 1.5\%$  максимальная погрешность может быть получена в предположении, что коэффициенты взаимоиндукции катушек на линиях с подтекающими и оттекающими от шин токами разняются друг от друга на  $3\%$ . При этом э. д. с., наводимая в контуре, равна:

$$j_\omega 1,015 M \dot{I}_{\text{св}} - j_\omega 0,985 M \dot{I}_{\text{св}} = j_\omega M \cdot 0.03 \dot{I}_{\text{св}}.$$

где  $\dot{I}_{\text{св}}$  — суммарный ток, подтекающий (или оттекающий от шин) при сквозном коротком замыкании. С учетом коэффициента запаса, равного 2, максимально допустимая чувствительность дифференциального реле соответствует 6% от суммарного тока, подтекающего к сборным шинам (или оттекающего от них), при внешнем коротком замыкании, например, на линии, в непосредственной близости от шин. Таким образом, ток трогания дифференциального реле должен быть выбран, исходя из условия

$$i_{p.m} = 0,06 \frac{\omega M \dot{I}_{\text{св max}}}{Z}$$

или, что то же,

$$i_{p.m} = 0,06 \cdot \dot{I}_{\text{св max}}.$$

В зависимости от точности изготовления катушек соотношение между уставкой дифференциального реле и расчетным (вторичным) максимальным суммарным током сквозного короткого замыкания (равное  $i_{p.m} / \dot{I}_{\text{св max}}$ ), может изменяться в широких пределах (табл. 4).

Таблица 4

Соотношение между уставкой и расчетным (вторичным) током

| Точность в % | $i_{p.m} / \dot{I}_{\text{св max}}$ | Примечание                         |
|--------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| ± 5          | 1: 5                                | Коэффициент запаса принят равным 2 |
| ± 2,5        | 1: 10                               |                                    |
| ± 1,5        | 1: 17                               |                                    |
| ± 1,0        | 1: 25                               |                                    |
| ± 0,25       | 1: 100                              |                                    |

По данным фирмы при токе короткого замыкания на шинах 1 000 А в цепи защиты индуцируется напряжение 5 V, т. е. полное сопротивление взаимоиндукции при 60-периодном токе составляет  $\omega M = 0,005 \Omega$ . Отсюда коэффициент взаимоиндукции катушки  $M = 0,0133 \text{ мН}$ . Для обеспечения максимальной отдачи мощности в реле сопротивление последнего должно быть согласовано с суммарным сопротивлением катушек взаимоиндукции. Для этой цели предусмотрен согласующий трансформатор с отпайками (рис. 2). При сопротивлении реле  $z_p$  и сопротивлении

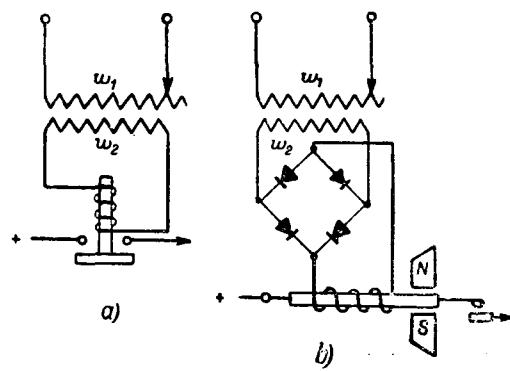


Рис. 2. Схемы дифференциальных реле.

а) — электромагнитное реле (плунжерного типа); б) — поляризованное реле, всей остальной части цепи  $z_p$  коэффициент трансформации определяется по формуле:

$$\frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{z_p}{z_q}}.$$

По данным фирмы электромагнитное реле плунжерного типа (рис. 2, а) надежно действует при минимальных токах короткого замыкания на шинах 1 500 А — в случае 6 линий и 2 000 А — в случае 10 линий.

Чувствительность защиты может быть повышена применением реле с малым потреблением мощности. С этой точки зрения представляет преимущества вариант с поляризованным реле, питаемым через выпрямители (рис. 2, б). Благодаря наличию постоянных магнитов поляризованное реле действует при меньшей мощности, чем обычное электромагнитное.

В системах с малым током замыкания на землю (например, при наличии импидоров) наряду с тремя дифференциальными реле в фазах предусматривается также чувствительное дифференциальное реле в нулевом проводе.

Следует заметить, что вариант с параллельным соединением катушек взаимоиндукции имеет определенные преимущества и недостатки по сравнению с вариантом последовательного включения катушек. Преимущество параллельного включения состоит в том, что оно обеспечивает действие защиты при коротком замыкании на шинах в случае, если катушка какого-либо из отключенных выключателей отсоединенна. Недостатком параллельного включения является большая подверженность температурным влияниям (разность температур в 30° С между подтекающими и отходящими линиями может обусловить протекание через реле тока, пропорционального 8% от тока сквозного короткого замыкания) и неудобство контроля цепей. Кроме того, при параллельном включении катушек получаются нежелательные переходные процессы во вторичной цепи. В случае последовательного соединения катушек процесс во вторичной цепи мало отличается от процесса в первичной цепи. Поэтому расчет защиты может быть произведен, с большей степенью точности.

Первая установка описанной выше защиты была осуществлена в системе Metropolitan Edison Company на подстанциях 114 kV Middletown и York [Л. 11]. К шинам 114 kV подстанции Middletown приключены 6 линий, а к шинам подстанции York — 5 линий. Максимальные и минимальные токи короткого замыкания составляют 6 250 и 1 400 А на первой подстанции и 4 500 и 1 050 А — на второй. Нуевые точки замыкания наглухо и токи замыканий между фазами примерно такие же, как и при замыканиях на землю. Постоянные времена первичной цепи при коротких замыканиях на указанных подстанциях составляют соответственно 0,12 и 0,06 сек.

Расчеты и последующие опыты показали, что постоянные э. д. с., наводимые в цепи защиты, получаются значительно меньшими тех э. д. с., при которых защита действует при условии, что вторичная цепь каждой фазы образует петлю из прямого и обратного проводов, выполненных в виде скрученного кабеля. Принципиальная схема кабельной проводки (на фазу) показана на рис. 1. Шестижильный кабель, выходя из панели защиты, обходит все выключатели. Общая протяженность кабеля 236 м.

Собственное время действия защиты порядка одного периода.

Согласно статистическим данным, опубликованным в английской литературе [Л. 15], в течение 1933, 1941 и 1942 гг., в Единой британской высоковольтной системе (Grid), включающей в себе около 500 сборных шин, число замыканий на шинах составляло соответственно 14; 17 и 12. Таким образом, в среднем за год происходило около 14 коротких замыканий на шинах.

Из указанного выше числа коротких замыканий 18 случаев имели место на открытых установках, а 28 — в закрытых установках. В 8 случаях повреждения принимали значительные размеры (2 в открытой, 6 в закрытой частях), а в 32 случаях следы повреждений были мало заметны.

Короткие замыкания делились по видам следующим образом: 40 замыканий на землю (в том числе 27 однофазных и 13 двухфазных замыканий на землю) и 3 трехфазных к. з. (включение на закоротку). Защиты шин находились в работе только в двух случаях (защита действовала правильно, размеры повреждений и недоотпуск электроэнергии были незначительны).

В остальных 41 случаях к. з. шины отключались линейными и резервными защитами, причем число правильных действий было 21.

Малое количество комплектов защит шин в системе Grid следует, повидимому, отнести за счет применения схем коммутации многоугольниками.

В английской литературе [Л. 15] описаны схемы защиты шин, основанные как на применении дифференциального принципа, так и на использовании органов направления мощности нулевой последовательности и реле типа «транслей» (с постоянным контролем или без него). Последние схемы отличаются сложностью.

### Литература

1. AIEE—EEI Committee Report: Bus Protection. El. Eng., № 5, 1939.

2. W. K. Sonnemann, G. B. Dodds. Considerations

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, СТАНЦИИ, СЕТИ И ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ

Электроснабжение Италии. Engineering, стр. 90, № 4202, т. 162, 26 июля 1946.

За годы войны имело место серьезное ухудшение электроснабжения Италии. Общий электробаланс страны уменьшился с 18,1 млрд. kWh в 1941 г. до 11,3 млрд. kWh в 1945 г., т. е. почти на  $\frac{2}{5}$  (таблица).

#### Динамика электроснабжения в годы войны (млн. kWh).

| Районы и виды электростанций             | Годы   |        |        |           |       |
|--|--------|--------|--------|-----------|-------|
|  | 1941   | 1944   | 1945   | I квартал |       |
|  |        |        |        | 1945      | 1946  |
| Северная Италия . . .                    | 12 377 | 9 395  | 8 863  | 2 198     | 2 409 |
| Центральная Италия . .                   | 3 264  | 1 262  | 1 045  | 198       | 419   |
| Южная Италия . . . .                     | 1 843  | 830    | 1 059  | 269       | 320   |
| Острова Италии . . . .                   | 432    | 303    | 329    | 93        | 96    |
| Всего . . .                              | 17 916 | 11 795 | 11 296 | 2 757     | 3 244 |
| В том числе: гэс . . .                   | 16 969 | 11 243 | 10 951 | 2 691     | 3 068 |
| тэс . . .                                | 948    | 552    | 344    | 7         | 177   |
| Общий электробаланс с учетом импорта . . | 18 148 | 11 826 | 11 303 | 2 764     | 3 248 |

Наибольшее снижение выработки имело место в Центральной и Южной Италии (соответственно — на 63 и 40%). Существенно понизилась выработка и в Северной Италии

и. Applying Ratio Differential Relays for Bus Protection. Tr. AIEE, Т. 58, June Section, 1938.

3. E. C. Wentz, W. K. Sonnemann. Current Transformers and Relays for High-Speed Differential Protection, with Particular Reference to Offset Transient Currents. El. Eng., № 8, 1940.

4. L. F. Kennedy, A. T. Sinks. New Current Transformer for Bus Differential Protection. Tr. AIEE, Т. 60, 1941.

5. C. Concordia, C. N. Weygandt, H. S. Shott. Transient Characteristics of Current Transformers During Faults. El. Eng., № 5, 1942.

6. L. F. Kennedy, C. D. Hayward. Harmonic-Current Restraint Relay for Bus Differential Protection. El. Eng., № 5, 1938.

7. G. Steeb. Bus Protection Independent of Current-Transformer Characteristics. El. Eng., № 9, 1941.

8. E. L. Harder, J. C. Cunningham. Relay and Circuit Breaker Application. Westinghouse Transmission and Distribution Reference Book, 1943.

9. E. L. Harder, E. H. Klemmer, W. K. Sonnemann, E. C. Wentz. Linear Couplers for Bus Protection. El. Eng., № 5, 1942.

10. W. K. Sonnemann. Linear Couplers Used for Bus Protection. El. World, July 10, 1943.

11. E. L. Harder, E. H. Klemmer, R. E. Neidig. Linear Couplers, Field Tests and Experience at Yock and Middletown. El. Eng., № 3, 1946.

12. E. L. Harder. Air Core Couplers Simplify Bus Protection. West Eng., May, 1942.

13. И. И. Соловьев. Защита шин подстанций 110 и 220 кВ. Сборник «Релейная защита и системная автоматика Мосэнерго», 1946.

14. А. С. Тулин, С. И. Залогин. Дифференциальная защита с торможением высшими гармоническими. Вестник электропромышленности, № 9, 1942.

15. M. Kaufmann, W. Szwander. Busbar Protection. A Critical Review of Methods and Practice. ЛЕЕ, в. 90, Р. II, № 17, 1943.

Доктор техн. наук, проф. Г. И. АТАБЕКОВ

(на 30%) и на островах (на 20%). Падение производства электроэнергии вызвано в основном повреждениями электростанций в период войны и недостатком топлива. Снижение выработки в северных районах вызвано было также повреждениями системы электропередач, по которым электроэнергия поступала в Центральные районы. В Центральных и Южных районах также были серьезно повреждены подстанции и распределительная сеть.

Основу электроснабжения Италии составляют гэс, установления мощность которых достигала примерно 6 млн. kW, а выработка составила в 1941 г. около 17 млрд. kWh (95% всей выработки электроэнергии в стране). Наиболее значительные по мощности гэс расположены в северных промышленных районах и мало пострадали в годы войны. Вышедшая из строя мощность составила менее 10% полной мощности этих гэс, тогда как по районам Центральной и Южной Италии за время войны вышло из строя около  $\frac{1}{2}$  всей мощности.

В течение последнего года проведены некоторые мероприятия по восстановлению и ремонту поврежденных гэс. Тэс Италии пострадали в результате военных действий значительно сильнее гэс. Мощность тэс в различных районах снизилась на 40—75%, выработка упала почти на  $\frac{2}{3}$ .

Повреждения электростанций коснулись в значительной степени многих крупных итальянских энергосистем. Поставленные компаниями, как Сочетта Электрическая Вальдорми, Романа ди Электрическая, Терни, Меридиональ ди Электрическая и др., повреждено от 60 до 94% всей мощности электростанций. К концу войны имело место значительное сокращение промышленной нагрузки. С другой стороны, повысилось потребление электроэнергии для целей электротехники и транспорта, что вызвано общим недостатком топлива в стране. Затруднения с топливом ограничивают выработку энергии на сохранившихся тэс, что в свою очередь обуславливает повышенный спрос на гидроэнергию.

В таблице приведены также данные о выработке электроэнергии за I квартал 1945 и 1946 гг., показывающие некоторый прирост потребления электроэнергии.

Помимо роста промышленного электропотребления ожидается рост нагрузки электрифицированного транспорта.

Трудности топливоснабжения являются основным стимулом дальнейшей электрификации железных дорог. Государственное управление электрифицированных железных дорог наметило электрификацию участков: Венеция—Турин, Падуя—Болонья, Домодоссола—Генуя и Флоренция—Пиза.

Ожидаемый общий объем электропотребления Италии в 1947 г. — около 16 млрд. kWh в год, по сравнению с нынешним уровнем — 14 млрд. kWh. Рост нагрузки в связи с восстановлением и электрификацией хозяйства страны, а также топливный дефицит и маловодье 1945—1946 гг. определили дополнительные трудности электроснабжения. Ожидается общий дефицит электротягов в ближайшие годы около 4 млрд. kWh. Для покрытия дефицита Управление национального распределения электроэнергии наметило мероприятия по развертыванию гидроэнергостроительства. Предположено строительство новых гЭС, обеспечивающих выработку в 1947 г. около 1 млрд. kWh, в 1948 г. около 2 млрд., в 1949 г. около 2,5 млрд. и в 1950 г. — при полном вводе мощности — до 4,5 млрд. kWh. Возможна также получение дополнительной гидроэнергии за счет повышения зарегулированности водохранилищ на р. Аидже.

Электрокомпании, ссылаясь на необходимость больших капитальных вложений при осуществлении указанной программы, развернули кампанию за увеличение тарифов на электроэнергию.

Кандидат техн. наук Б. Л. ЭРЛИХМАН

Энергосхема нового гидроэнергостроительства в Швейцарии. *El. Review*, стр. 566, № 3 568, 1946.

В настоящее время вновь выдвинута схема сооружения ряда мощных гЭС на Верхнем Рейсе в долине Урдерен, впервые намеченная более десятилетия тому назад. В этой схеме осуществлена строительством лишь одна гЭС мощностью 60 тыс. kW с напором в 288 м, построенная для питания электрической железной дороги в районе Сен-Готтарда.

Предусматривается сооружение в три очереди в течение 8 лет пяти гЭС на общую мощность 1,27 млн. kW с затратой около 1,1 млрд. швейцарских франков. Наиболее мощная из этих гЭС — Пфаффенштрунг (744 тыс. kW) проектируется с двумя подземными машинными залами с 16 агрегатами по 46,5 тыс. kW. Используемый напор составит 823 м. Годовая выработка энергии составит 1,7 млрд. kWh, причем станция будет работать лишь в период с октября по май. Энергия с генераторного напряжения 13 kV будет трансформироваться на напряжение 150 kV и после передачи кабелем до Эрстфельда будет вновь трансформироваться на 380 kV для передачи в систему.

Вторая по мощности гЭС — Эрстфельд (345 тыс. kW) запроектирована с установкой 6 вертикальных турбин Френсиса по 57,5 тыс. kW при 428 об/мин; они также размещаются в двух подземных машинных залах. Используемый напор — 339 м. Среднегодовая выработка энергии составит около 850 млн. kWh, однако распределение выработки и по этой гЭС крайне неравномерно (около 95% энергии будет получено в течение 7 зимних месяцев). Для передачи в общешвейцарскую энергосистему генераторное напряжение также будет трансформироваться на 380 kV.

Остальные три гЭС проектируются значительно меньшей мощности; это — гЭС Госхенен с 3 турбинами Пельтона мощностью по 24 тыс. kW при использованием напора в 546 м и среднегодовой выработке 180 млн. kWh, гЭС Вассен с 2 турбинами Френсиса по 24 тыс. kW при напоре 277 м и гЭС Амтег. Общая энергоотдача трех последних гЭС — 470 млн. kWh, из которых около 87% будет получено в зимние месяцы.

Вследствие неравномерного режима энергоотдачи гЭС намечено сооружение трех насосных установок — Гуфи, Госхенен и Седрун — общей мощностью около 93 тыс. kW. Гидроактивные установки будут работать, главным образом, в теплое время года и накоплять полезную емкость водохранилищ на зимние месяцы. Схема частичного дублирования гЭС гидроактивными установками запроектирована ввиду отсутствия топлива и серьезных перспектив развития тепловых электростанций в Швейцарии.

Кандидат техн. наук Б. Л. ЭРЛИХМАН

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ТРАНСФОРМАТОРЫ

C. W. H. Minchin. Компенсированный синхронный генератор с самовозбуждением. *IEEE*, ч. II, стр. 373—379, август 1946.

Одним из главных недостатков малых синхронных генераторов является трудность получения простейшим путем устойчивого неизменного напряжения переменного тока на его зажимах, при различных нагрузках, без применения специальных регуляторов напряжения. За последнее время на малых синхронных генераторах применялось много различных встроенных компенсаторов, но все они оказывались слишком сложными и дорогими. Применение отдельных регуляторов напряжения, несмотря на их усовершенствование за последнее время, в большинстве случаев для малых генераторов нерентабельно или слишком громоздко. В рефрижераторной статье описывается компенсированный синхронный генератор с самовозбуждением, который генерирует неизменное напряжение без применения регуляторов напряжения. Автором приводятся сведения о результатах испытаний, поверочные расчеты и некоторые приближенные сведения по теории компенсированного синхронного генератора.

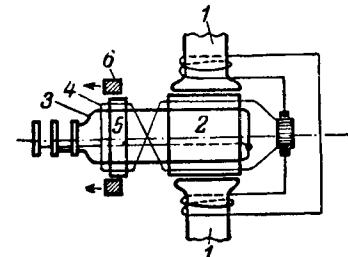


Рис. 1. Принципиальная схема компенсированного синхронного генератора с самовозбуждением.

1 — электромагниты основного поля; 2 — якорь; 3 — обмотка переменного тока; 4 — обмотка постоянного тока; 5 — дополнительный якорь; 6 — магнитопровод.

Установлено, что малые синхронные генераторы конструктивно наиболее экономичны при вращающемся якоре. Синхронный генератор переменного тока с самовозбуждением устроен таким образом, что в одних и тех же пазах якоря уложены две обмотки — переменного тока и постоянного тока. Концы обмоток переменного тока выведены к контактным кольцам, а обмотка постоянного тока имеет коллектор (рис. 1). Обмотка постоянного тока служит для создания поля возбуждения генератора.

Известно, что для получения от синхронного генератора постоянного на его зажимах напряжения при постоянном числе оборотов вне зависимости от нагрузки и  $\cos \varphi$  необходимо при изменении нагрузки или  $\cos \varphi$  изменять ток возбуждения. Для того, чтобы ток возбуждения синхронного генератора изменялся пропорционально изменению полного тока нагрузки, в компенсированном генераторе имеется дополнительное компенсирующее устройство.

Компенсатор. На вал якоря генератора насыщается второй короткий якорь с тем же числом пазов, что и основной. Вокруг этого дополнительного якоря установлен отдельный замкнутый магнитопровод, могущий смещаться в осевом направлении. Как обмотка переменного тока основного якоря, так и его обмотка постоянного тока удлиняются и проходят по пазам дополнительного якоря. При многофазном синхронном генераторе реакция дополнительного якоря от обмотки переменного тока создает в замкнутом магнитопроводе неподвижный по отношению к главным полюсам и постоянный во времени поток. Когда, например, генератор несет нагрузку при  $\cos \varphi = 0$  (отстающий), то поток реакции дополнительного якоря направлен прямо противоположно потоку якоря главного генератора. Обмотка постоянного тока на якоре компенсатора смещается по отношению к основному якорю на один полюсный шаг. Эта часть обмотки компенсатора создает дополнительную э. д. с. постоянного тока  $E_2$ , направление которой всегда противоположно, а величина равна э. д. с. от дополнительных ампервитков, создаваемых активным или реактивным током нагрузки. Для получения прямой пропорциональности между намагничивающим током компенсатора и его потоком, маг-

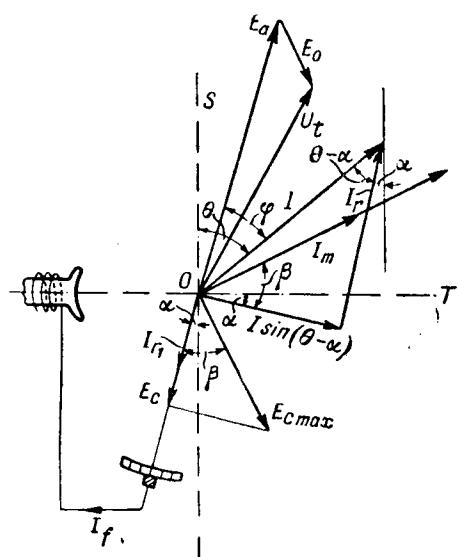


Рис. 2. Векторная диаграмма компенсированного синхронного генератора с самовозбуждением.

$I$  — ток нагрузки;  $I_m$  — относительный ток возбуждения;  $I_f$  — ток возбуждения;  $I_r$  — намагничивающий ток компенсатора;  $\Phi_c$  — магнитный поток компенсатора;  $E_c$  — э. д. с. постоянного тока компенсатора;  $E_a$  — э. д. с. якоря;  $E_0$  — дополнительная э. д. с.;  $U_t$  — напряжение на зажимах генератора;  $\alpha$  — угол сдвига щеток;  $\beta$  — угол между  $E_c$  и  $I_r$ .

нитная цепь замкнутого магнитопровода компенсатора рассчитывается на работу с малым насыщением при любой нагрузке. Степень компенсации, т. е. значение  $E_c$  регулируется радиальным смещением кольцевого магнитопровода компенсатора.

Проведенные испытания компенсированного синхронного генератора с самовозбуждением показали, что колебания напряжения на его зажимах не превышают  $\pm 3\%$  от номинального значения при  $\cos \varphi$  от 0,9 (емкостный) до 0 (индуктивный).

Генератор дает менее стабильное напряжение при емкостной нагрузке от  $\cos \varphi = 0,9$  и ниже.

Однофазный синхронный генератор с самовозбуждением может быть компенсирован так же, как и трехфазный. В этом генераторе поток в магнитопроводе компенсатора, обусловленный м. д. с. реакции якоря компенсатора, может быть представлен двумя потоками — одним неподвижным относительно полюсов главного генератора, а вторым вращающимся с двойной угловой скоростью в ту же сторону, что и якорь. Следовательно, э. д. с., наведенная в обмотке постоянного тока компенсатора, будет состоять из двух компонент: постоянной и переменной. Постоянная э. д. с., обусловленная постоянным потоком, аналогична  $E_c$  для многофазного генератора и стабилизирует напряжение на зажимах генератора. Переменная э. д. с., обусловленная вращающимся потоком, имеет двойную частоту. Результирующая э. д. с. компенсирующей части обмотки постоянного тока является пульсирующей. Так как поток реакции якоря генератора вызывает в обмотке постоянного тока э. д. с., которая сдвинута относительно переменной составляющей в компенсаторе почти на  $180^\circ$ , то искрения щеток на коллекторе не наблюдалось.

Параллельная работа компенсированных генераторов с самовозбуждением. Если два указанных генератора работают параллельно и их э. д. с. хотя бы немного отличны, то по их якорям будет протекать выравнивающий ток, который для одного генератора является отстающим, а для другого опережающим. В генераторе с опережающим током напряжение будет понижаться, а в генераторе с отстающим током напряжение будет повышаться, и, следовательно, разность э. д. с. возрастет, а это в свою очередь поведет к еще большему увеличению выравнивающего тока и т. д. Чтобы предотвратить такое явление, следует включить параллельно также и цепи возбуждения. В случае параллельной работы генераторов, имеющих различные напряжения возбуждения, цепь воз-

буждения генератора с большим напряжением возбуждения следует включать через потенциометр.

В заключение следует отметить, что габариты и стоимость компенсированного генератора не превышают габаритов такого же не компенсированного генератора с возбудителем. Простота эксплуатации и надежность работы указанных генераторов делают их весьма подходящими для использования на сельских и передвижных электростанциях небольшой мощности.

Инж. С. П. ИНОЗЕМЦЕВ

T. W. Dietz, G. M. Stein. Расчет сварочного трансформатора для сварки по методу разряда конденсатора. *El. Eng.*, стр. 154, № 3, 1946.

Для точечной сварки легких металлов и нержавеющих сталей, где требуются мгновенные большие сварочные токи строго определенного значения, была разработана система сварки с применением конденсатора. Конденсатор включается в первичную цепь сварочного трансформатора, вторичная обмотка которого питает сварочную цепь. Порядок зарядки конденсатора в статье не разбирается. Выбор основных конструктивных данных трансформатора, работающего в таких условиях, представляет известные трудности. Для расчета трансформатора необходимо знать индуктивность и сопротивление самой сварочной цепи, определяемые посредством измерений при нормальной частоте на готовом агрегате. При этом необходимо учитывать, что принимаемое в расчет сопротивление должно быть откорректировано, если длина полуволны тока при сварке отличается от нормальной. Кроме того, из предшествующего опыта сварки аналогичным способом должны быть известны время  $T_m$  до первого максимума тока и значение  $I_{2a}$  первой амплитуды вторичного тока.

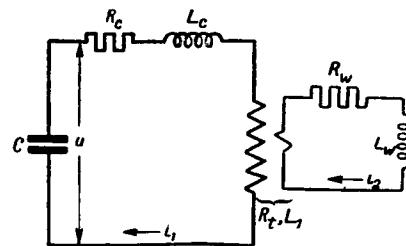


Рис. 1.

Решая систему дифференциальных уравнений для приведенной на рис. 1 цепи и получив искомые функции  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$ , авторы рассматривают отдельно случаи апериодического разряда и периодического разряда и условия перехода от первого вида разряда ко второму. Интегрируя затем  $i(t)$  в пределах от  $t=0$  до  $t=T_c$ , получаем суммарное изменение потока:

$$\Phi_T = \frac{1}{N_2} \cdot I_{2a} \cdot L_2 \cdot 10^8 \cdot \lambda(\tau_0) [M], \quad (1)$$

где  $N_2$  — число вторичных витков трансформатора;  $R_2$  — суммарное, отнесенное к вторичной стороне, сопротивление в омах ( $R_2 \approx R_t + R_w$ );  $L_2$  — суммарная, отнесененная к вторичной стороне, индуктивность в генри ( $L_2 \approx L_1 + L_2$ );  $\lambda(\tau_0)$  — функция  $\tau_0$ ;  $\tau_0 = \frac{T_0}{\pi} \cdot \frac{R_2}{2L_2}$ ;  $T_0$  — время до первого прохождения тока через нулевое значение ( $T_0$  вводится вместо  $T_m$  для облегчения решения приведенного уравнения).

Определив, таким образом, значение потока  $\Phi_T$ , необходимо учесть остаточный магнетизм, возникающий после сварки первой же точки, значение которого зависит от конструкции магнитопровода и сорта применяемой трансформаторной стали. Этот остаточный магнетизм необходимо компенсировать, так как в противном случае потребовалось бы слишком большое сечение сердечника. Устранение влияния

остаточного магнетизма может быть достигнуто либо введением воздушного зазора в магнитную цепь, либо путем подмагничивания постоянным током после каждой сварки, либо, наконец, путем реверсирования направления разряда конденсатора через сварочный трансформатор после каждого разряда. Последний способ является наиболее экономичным. Опыт показывает, что в рассматриваемых трансформаторах остаточный магнетизм равен примерно 6 500 Г. Если принять максимальную индукцию в 17 000 Г, то максимально допустимое изменение индукции будет  $6500 + 17200 = 23700$  Г. Таким образом, необходимое активное сечение сердечника получается путем деления вычисленного по уравнению (1) потока на эту индукцию. Напрежом от потерь в железе можно пренебречь, так как даже при самых больших возможных в настоящее время скоростях сварки получается лишь несколько перемагничиваний в 1 сек.

Далее необходимо определить сечение проводов обмоток трансформатора. Ввиду того, что математически строгое определение эффективного тока для цепи  $R$ ,  $L$  и  $C$  при апериодическом и периодическом процессе сложно, можно исходить из того, что вся энергия, запасенная в конденсаторе, отдается через трансформатор и сварочную цепь, т. е.

$$W = \frac{1}{2} C U^2 [J \text{ на точку}],$$

причем

$$C = L_2 \cdot \left[ \frac{I_{2a}}{U} \cdot \lambda(\tau_0) \right]^2 \cdot 10^6 [\mu F], \quad (2)$$

где  $C$  — емкость конденсатора. Мощность

$$P = \frac{1}{2} C U^2 \cdot \frac{s}{60}, \quad (3)$$

где  $s$  — средняя скорость сварки (количество точек в минуту).

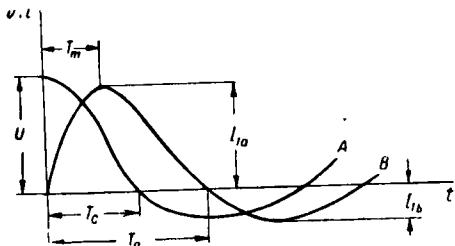


Рис. 2.

Отношение мощности, отводимой в трансформаторе, к суммарной мощности равно отношению сопротивления трансформатора, отнесенного к его вторичной стороне, к активному сопротивлению всей цепи. Выбирая определенное значение для  $\eta = \frac{R_w}{R_w + R_t}$ , находим  $R_t = R_w \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)$ ,

что дает возможность определить сечение меди. Вместе с сечением магнитной цепи оно определяет размеры и конструкцию трансформатора в целом. Зная потери, можно вычислить перегрев обмоток, который может потребовать водяного охлаждения вторичной обмотки, представляющей собой, как правило, один виток.

Коэффициент трансформации может быть вычислен из уравнения

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{2 U \cdot k(\tau_0)}{I_{2a} \cdot R_2}, \quad (4)$$

где  $k(\tau_0)$  — функция  $\tau_0$ ;  $N_1$  и  $N_2$  — числа витков первичной и вторичной обмоток.

При проектировании серии сварочных трансформаторов оптимального типа необходимо на основании первого расчета построить опытный образец, испытание которого должно уточнить ряд исходных величин.

Из осциллограмм первичного тока и напряжения на конденсаторе можно определить индуктивность  $L_1$  и сопротивление  $R_1$  первичной цепи, а также  $T_m$ ,  $T_0$  и  $I$ , с

помощью которых на основании уравнения (1) можно уточнить значение потока  $\Phi_T$ , равного сумме остаточного потока  $\Phi$ , и максимального потока  $\Phi_m$ , до которого железо фактически намагничивается. В статье указан метод, позволяющий определить одну из величин  $\Phi$ , или  $\Phi_m$ , поскольку непосредственное измерение дает лишь значение суммарного потока  $\Phi_T$ .

Инж. А. Г. КРАЙЗ

## ЭЛЕКТРОПРИВОД

W. R. Harris. Применение рототрольных регуляторов в промышленности. *El. Eng.*, № 3, 1946.

Наряду с амплидином рототрольный регулятор (рототрол) нашел широкое применение для автоматического регулирования производственных процессов. Рототрол прост и надежен в эксплоатации и доступен для понимания обслуживающему персоналу, не имеющему специальной квалификации. По устройству и принципу действия рототрол является обычным генератором постоянного тока, имеющим несколько обмоток возбуждения. Регулировочные свойства рототрола определяются взаимодействием этих обмоток. Рототрол приводится во вращение, как правило, небольшим короткозамкнутым асинхронным двигателем. Обычно рототрол снабжен тремя обмотками возбуждения: одной обмоткой самовозбуждения (серийной или шунтовой) и двумя обмотками управления. Одна из обмоток управления является задающей и возбуждается от источника постоянного напряжения. Другая обмотка управления измеряет регулируемую величину и может быть названа регулирующей. Обычно эти обмотки управления действуют встречно. Разность ампервитков обмоток в зависимости от соотношения этих ампервитков заставляет рототрол самовозбудиться с той или другой полярностью. Рототрол при этом регулирует таким образом, что разность ампервитков обмотки управления уменьшается, и восстанавливается почти прежнее значение регулируемой величины. Для повышения точности регулирования, т. е. уменьшения разности ампервитков обмоток управления, обмотка самовозбуждения рассчитана так, что при отсутствии действия управляющих обмоток рототрол находится на пороге самовозбуждения и сам возбуждаться не может. Другими словами, сопротивление цепи самовозбуждения рототрола несколько больше критического. Чтобы свести к минимуму эффект гистерезиса, применяется специальная сталь, или стандартная сталь специальной обработки. Современный рототрол имеет э. д. с. от остаточного магнетизма только  $\sim 0.4\%$  номинального напряжения по сравнению с 5% -ным значением остаточной э. д. с. для стандартного генератора постоянного тока. Следует отметить, что ВЭИ предложил остроумную схему точного регулирования со стандартным генератором постоянного тока, работающим на пороге самовозбуждения так же, как и рототрол <sup>1</sup>.

В рототроле возможно применение большего числа обмоток управления, чем две. Например, в схемах регулирования скорости можно применить третью обмотку управления, позволяющую ограничивать якорный ток главной цепи как в двигательном режиме регулируемой машины, так и в тормозном (генераторном). Такая обмотка целесообразна для регулирования систем с большой механической инерцией, где период времени перехода с одной скорости на другую значителен. Рототрол применяется с успехом в системах с замкнутым циклом регулирования, особенностью которого является использование отклонения регулируемой величины от идеального значения для регулирования потока энергии с целью уменьшения этого отклонения. В таких системах возможны колебания регулируемых величин. Как показывает опыт, при тщательном учете всех факторов, влияющих на устойчивость системы, рототрол может быть применен в большинстве случаев без внешних стабилизирующих устройств. Ниже приведены примеры промышленного использования рототрола.

<sup>1</sup> А. А. Фельдбаум. Вестник электропромышленности, № 9, 1946.

Рототрол как регулятор скорости, действующий на принципе противо-э. д. с., нашел наибольшее применение. Особенно эффективен этот принцип, где требуются широкие пределы регулирования, особенно на низких скоростях. Специального тахогенератора для измерения скорости в этой схеме не требуется. Схема применяется для привода с широкой регулировкой напряжения, металлообрабатывающих станков, самолетного привода, привода скривых подъемников и прокатных станов. Схема рототрольного регулятора на принципе противо-э. д. с. изображена на рис. 1. Рототрол снабжен тремя обмотками. Благодаря включению серийной обмотки само-возбуждения 1 в плечи мостика она выполняет также функции задающей обмотки.

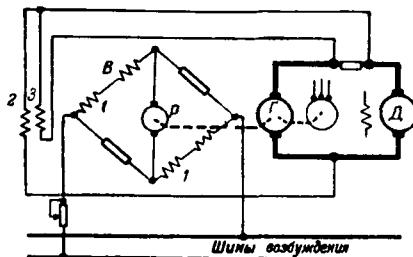


Рис. 1. Схема рототрольного регулятора, действующего по принципу противо-э. д. с.  
Р—рототрол; В—возбуждение генератора.

Как известно, скорость двигателя постоянного тока выражается формулой

$$n = \frac{U - IR}{k\Phi} = \frac{E}{k\Phi}.$$

При независимом питании обмотки возбуждения двигателя, его магнитный поток  $\Phi$  может быть принят постоянным. Следовательно, скорость  $n$  двигателя будет пропорциональна его противо-э. д. с.  $E$ . Последняя равна напряжению  $U$  на зажимах двигателя минус падение напряжения ( $IR$ ) в якорной цепи. Как следует из схемы, обмотка управления 2 рототроля измеряет напряжение двигателя, а обмотка управления 3 — падение напряжения ( $IR$ ). Обе обмотки включены встречно, так что разность их ампервитков пропорциональна противо-э. д. с.  $E$ .

Обмотка возбуждения генератора Леонарда и обмотка само-возбуждения рототроля разделены каждой на две параллельные ветви и включены в плечи моста (рис. 1). Плечи моста схемы уравновешены. Ток  $I_B$ , текущий от шин возбуждения, является задающим током для обмотки возбуждения генератора и для обмотки управления 1 рототроля. Падение напряжения от этого тока в цепи якоря рототроля отсутствует. Ток  $I_p$ , протекающий от якоря рототроля, обуславливающий, с одной стороны, само-возбуждение рототроля и, с другой стороны, регулирующий ампервитки возбуждения генератора Леонарда, не вызывает падения напряжения на зажимах, присоединенных к шинам возбуждения. Ампервитки обмотки 1 рототроля от тока  $I_B$  направлены навстречу действующей разности ампервитков обмоток 2 и 3 рототроля. Если разность ампервитков не равна нулю, то рототрол будет регулировать возбуждение генератора, а следовательно, и скорость двигателя в схеме Леонарда до тех пор, пока не восстановится равновесие ампервитков.

Типичным применением этой схемы является широкодиапазонное регулирование скорости привода суперкаландр в бумажной промышленности. Диапазон регулирования лежит в пределах от 600 до 15 м/мин. Ранее применявшимся способы регулирования каландров значительно уступают описанной схеме регулирования.

Точный регулятор скорости с применением таходинами позволяет еще больше уменьшить отклонения скорости от регулируемой величины. Примером такого точного регулирования являются приводы бумагоделательной машины, аэродинамической трубы и т. п.

Далее автор рассматривает схемы точного рототрольного регулятора скорости и регулятора напряжения ленты на мотальных барабанах. Остановимся на возможности применения рототроля для автоматиче-

ского регулирования напряжения генераторов. На рис. 2 изображена принципиальная схема рототрольного регулирования напряжения синхронного генератора. Для получения высокой чувствительности регулирования цепь шунтовой обмотки 2 самовозбуждения рототроля настраивается регулировочным реостатом так, чтобы обе обмотки самовозбуждения 2 и 3 рототроля обеспечивали работу последнего только на прямолинейной части кривой намагничивания. Благодаря этому достигается быстрое изменение ампервитков возбуждения генератора. Обмотка управления 1 рототроля питается разностью напряжений: задающего и регулируемого генераторного. Задающее напряжение подается через трансформатор и выпрямитель от источника переменного тока с постоянным значением напряжения (принципиально возможно от источника посто-

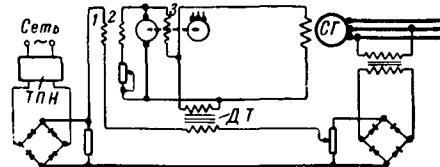


Рис. 2. Схема регулирования напряжения синхронного генератора.  
ТПН — трансформатор постоянного напряжения; ДТ — демпфирующий трансформатор.

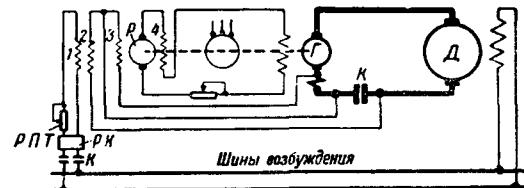


Рис. 3. Схема управления привода большими маховыми массами.

РПТ — реостат для регулировки пускового тока; РК — реверсивный контактор; Р — рототрол.

янного тока). Генераторное напряжение подается в цепь управляющей обмотки 1 рототроля также через трансформатор и выпрямитель. Для повышения устойчивости системы применяется в цепи управления противоколебательный демпфирующий трансформатор, подключенный к зажимам обмотки возбуждения генератора.

Рототрольное регулирование по постоянству ускорения привода с большими маховыми массами показано на схеме рис. 3. В этой схеме рототрол фактически регулирует постоянство якорного тока управляемого двигателя. Обмотка 1 является задающей. При помощи реостата, включенного в ее цепь, устанавливается требуемое значение якорного тока двигателя. Обмотка 3 рототроля является регулирующей и питается от падения напряжения в серийных обмотках генератора. После достижения требуемой скорости двигатель привода отключается контактором  $K$  от питаемого генератора. Вследствие этого обмотка 3 рототроля, включенная на разность э. д. с. генератора и управляемого двигателя, заставляет регулировать рототрол на поддержание равенства э. д. с. Такое регулирование желательно, так как двигатель в любое время может быть вновь включен из генератора.

Та же схема рис. 3 может быть применена для регулирования двигателя или двигателей на постоянство врачающегося момента. В этом случае обмотка 3 рототроля не нужна.

Наконец, рототрольный регулятор с успехом применяется в сочетании с электронными приборами. В качестве примера в статье приводится упрощенная схема рототрольно-электронного регулятора для регулирования и согласования подачи стола большого сверлильного станка. Кроме рототроля и электронного сервоусилителя схема содержит синхронизирующие элементы, угловые отклонения которых от синхронизма вызывают разность напряжений, действующую на сервоусилитель.

Кандидат техн. наук Ф. А. ГОРЯНОВ

## ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

W. B. Buchanan, G. D. Floyd. Испытания в сети отключающей способности масляного выключателя на 138 kV. *El. Eng., Tr.*, стр. 199—204, № 4, 1946; L. R. Ludwig, W. M. Leeds. Многощелевая дугогасящая камера для высоковольтных масляных выключателей. *El. Eng., Tr.*, стр. 199—125, № 3, 1943; A. W. Hill, W. M. Leeds. Следующий шаг в разрывной мощности—5 000 000 kVA. *El. Eng., Tr.*, стр. 317—323, № 6, 1945.

Возрастание токов короткого замыкания с развитием систем заставляет прибегать либо к секционированию, либо к увеличению отключающей способности выключателей.

В схемах 25 Hz Гидроэлектрической силовой компании (Hydro-Electric Power Commission) в Канаде были проведены испытания однобакового выключателя фирмы Westinghouse на 138 kV, 1 500 000 kVA с целью подтверждения прописанной при 60 Hz разрывной мощности, а также проверки возможности увеличения отключающей способности. Нормальный выключатель снабжен деионными решетками, каждая из которых заключена в толстостенный изолирующий цилиндр, играющий роль барьера между расположеными в одном баке полюсами выключателя. При испытаниях этот выключатель отключал токи 2 700, 4 700 и 7 700 A при 110 kV, что соответствует наибольшей разрывной мощности 1 480 000 kVA. При последнем опыте треснул изолирующий цилиндр камеры и имело место значительное потемнение масла, но без уменьшения его диэлектрической прочности. Сравнивая результаты испытаний этого выключателя в сети с прежними испытаниями в лаборатории разрывных мощностей, авторы приходят к выводу, что для 25 Hz отключаемая мощность должна быть несколько снижена. Для увеличения отключающей способности в одном выключателе деионные решетки были заменены многощелевыми камерами масляного дутья (рис. 1). При испытаниях выключатель с многощелевыми камерами отключал 7 250 и 13 100 A при 110 kV, что соответствует наибольшей разрывной мощности 2 580 000 kVA. По мнению авторов, выключатель способен отключать большое число коротких замыканий при 2 500 000 kVA без необходимости осмотра. Таким образом, применение многощелевой камеры позволило повысить разрывную мощность однобакового масляного выключателя в 1,7 раза.

Многощелевая камера масляного дутья в применении к трехбаковым масляным выключателям высокого напряжения схематически показана на рис. 1. При отключении промежуточный контакт 3 первоначально отходит от неподвижного 2 вместе с подвижным контактом 4. Возникающая между контактами 2 и 3 дуга 7 создает в камере 6 давление, которое вызывает поток масла через канал 8 к щелям 10. Этот поток продувают вторую дугу 9 сквозь выходные каналы 11, расположенные против щелей, обеспечивая быструю деионизацию дугового промежутка при проходе тока через нуль. Для выравнивания напряжения между последовательными разрывами параллельно каждой камере включено сопротивление в виде графитовых блоков, запрессованных в фибрковые трубы (для 287 kV—360 000  $\Omega$ ).

Выключатели с многощелевыми камерами масляного дутья изготавливаются для напряжений до 287 kV, причем им приписывается способность отключать короткие замыкания при разрывной мощности до 5 000 000 kVA, при напряжениях 138, 161 и 230 kV, с полным временем отключения в три и пять периодов. Так как непосредственно получить соответствующие токи короткого замыкания при полном напряжении в лаборатории разрывных мощностей не представляется возможным, были применены частичные испытания:

однополюсные и половинки полюса (одной камеры). При этом одной половиной полюса отключались токи до 12 200 A при 66 kV, что, по мнению авторов статьи, соответствует для всего выключателя трехфазной разрывной мощности 4 800 000 kVA; пятипериодный выключатель на 230 kV был испытан при 132 kV на полюс при токе 9 400 A, что, по мнению авторов, дает трехфазную разрывную мощность 3 700 000 kVA; наконец, одной камерой отключался ток 18 700 A при 66 kV (т. е. при половине фазового напряжения 230-kV системы), что, по мнению авторов, соответствует трехфазной разрывной мощности 7 400 000 kVA!

Если даже не согласиться с авторами испытаний, делающими далеко идущие выводы на основании испытаний одной только камеры при повышенных напряжениях, все же приведенные в статьях материалы показывают, что многощелевая камера масляного дутья является, несомненно, дальнейшим усовершенствованием дугогасящих устройств масляных выключателей. Применение ее для усиления существующих масляных выключателей позволяет значительно увеличить их отключающую способность.

Кандидат техн. наук А. М. МЕЛЬКУМОВ

L. J. Linde B. W. Wyman. Магнитный воздушный выключатель на 15 kV. *El. Eng.*, № 3, 1944.

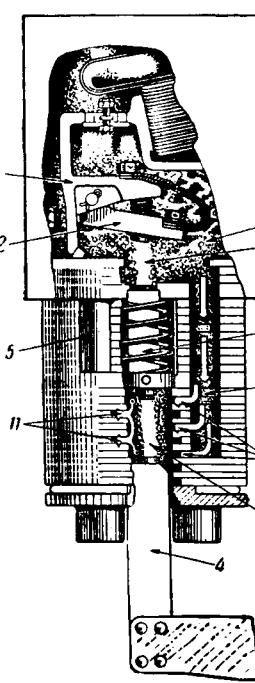
R. C. Dickinson, R. Frink. Снижение размеров и расширение параметров магнитного воздушного выключателя до 500 000 kVA, 15 kV. *El. Eng.*, № 4, стр. 220—223, 1946.

Американскими фирмами GE и Westinghouse разрабатываются новые выключатели с магнитным гашением дуги. В последнее время описаны конструкции с разрывной мощностью до 500 тыс. kVA при напряжениях до 15 kV.

Основной принцип этих выключателей заключается в том, что под действием сильного магнитного поля дуга, возникающая при отключении между контактами выключателя, втягивается в решетку из электроизоляционного материала, которая имеет перегородки, заставляющие дугу сильно увеличивать свою длину. Большая длина дуги и деионизирующее действие близко расположенных поверхностей перегородок и магнитного поля, выдувающего ионизированные частицы из зоны дуги, приводят к ташению ее.

Различие выключателей GE и Westinghouse в основном заключается в форме перегородок на пути дуги: в то время, как Westinghouse применяет сплошные перегородки между боковыми щеками камеры, снабженные пазами, GE использует перегородки, выступающие попарно из каждой боковой щеки камеры, образуя загзагообразную щель. Для дугогасящей решетки обе фирмы применяют огнеупорный керамический материал, достаточно стойкий при больших температурных перепадах, не выделяющий газов и химически устойчивый при высоких температурах дуги и имеющий высокую диэлектрическую прочность. Эффективность действия выключателя зависит от размеров пластин, расположения между ними и силы магнитного поля. Чрезмерное увеличение силы поля может привести к отрицательным результатам. Оптимальные соотношения этих величин установлены многочисленными экспериментами.

При совпадении на фазе магнитного потока с током дуги он исчезает в момент нуля тока, следовательно, магнитное дутье прекращается. Чтобы сохранить магнитное дутье в момент нуля тока и тем самым ускорить деионизацию дугового промежутка, добиваются отставания потока по отношению к току. Это может быть выполнено шунтированием магнитной катушки сопротивлением. В выключателе Westinghouse тот же эффект достигается применением экранирующей катушки, состоящей из одного витка вокруг сердечника катушки магнитного дутья и прилегающего к ней так, что он охватывает весь поток. Так как магнитное поле создается отключаемым током, то при отключении малых токов сила его невелика и гашение дуги затрудняется. Для облегчения гашения малых токов применяется дополнительное воздушное дутье, создаваемое в процессе отключения. На рис. 1 приведено сравнение длительности горения дуги с воздушным дутьем и без него (пунктирная кривая), показывающее большую эффективность воздушного дутья. Резкий рост сопротивления дуги в последний период гашения ограничивает величину тока, уменьшает сдвиг его по



Вологодская областная универсальная научная библиотека  
www.booksite.ru

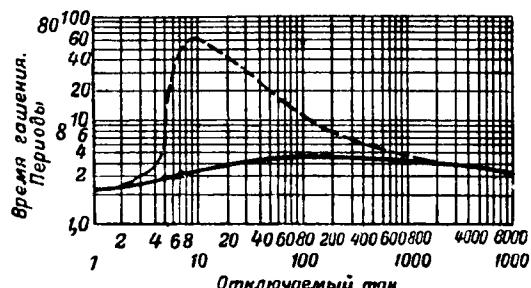
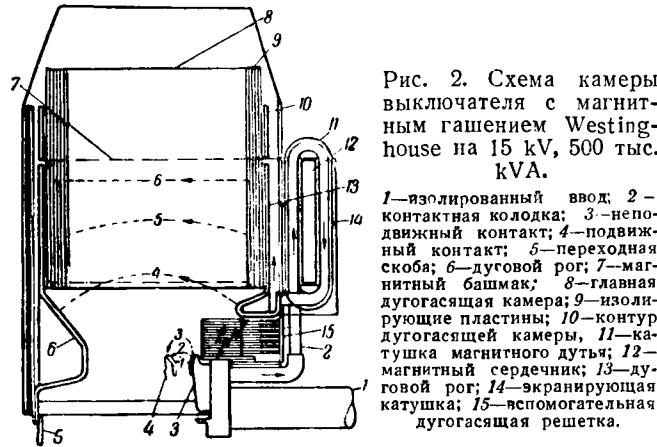


Рис. 1. Зависимость времени горения дуги от отключающего тока.



отношению к напряжению и снижает скорость восстановления напряжения до величины, не превышающей 300  $V_{\mu sec}$ , независимо от собственной частоты цепи.

На рис. 2 приведена схема последней модели камеры выключателя Westinghouse на 15 кВ, 500 тыс. кВА. Действие ее происходит следующим образом: при размыкании контактов 3 и 4 возникает дуга, которая, вытягиваясь, переходит на рога 6 и 13 (положение 4). Переход этот, однако, затруднен, так как при этом должна включиться катушка магнитного дутья 11, на которой возникает реактивное напряжение в несколько сот вольт. Чтобы облегчить переход дуги на рог 13 и включение катушки, применена вспомогательная решетка с втягивающим железом, гасящая дугу между контактом 3 и рогом 13. Эта решетка сравнима с выключателем большой мощности низкого напряжения. После включения катушки магнитного дутья дуга быстро затягивается на изолирующие пластины 9 и гаснет.

Габариты выключателя Westinghouse на 15 кВ, 500 тыс. кВА лишь немногим превышают габариты прежнего выключателя на 5 кВ 100 тыс. кВА. Обе фирмы изготавливают магнитные выключатели применительно к комплектным выдвижным ящикам.

Выключатели с магнитным гашением дуги имеют ряд преимуществ перед другими типами выключателей: отсутствует какая бы то ни было дугогасящая среда, кроме атмосферного воздуха, отсутствует газообразование, связанные с повышением давления, они способны многократно и надежно отключать токи коротких замыканий, без существенного износа контактов. По описаниям после нескольких сот отключений тока до 14 000 А, контактная система такого выключателя не имела существенных повреждений. Для уменьшения износа контактов применяются искрогасительные наконечники из сплава серебра с вольфрамом. Вероятно, предел частоты операций ставится нагревом керамических элементов камеры, ухудшающим демпливацию и электрические свойства материала. Возможно, что выключатели с магнитным гашением дуги смогут удовлетворить жестким требованиям печных установок.

Повидимому, одной из трудных проблем этих выключателей является проблема изоляции, ограничивающая верхний предел рабочих напряжений.

Кандидат техн. наук А. М. МЕЛЬКУМОВ

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

C. F. Dodson. Проблемы координации защиты сельских линий. *El. Light and Power*, стр. 80—82, июнь, 1946.

В первые годы развития электрификации сельского хозяйства США сельские линии в большинстве случаев представляли собой короткие радиальные ответвления от городских электрических сетей. Мощность сельских потребителей была мала, и селективность работы защиты обеспечивалась плавкими предохранителями. С развитием сельскохозяйственной нагрузки возросли требования к селективности работы защиты и бесперебойности электроснабжения. Повышение надежности питания сельскохозяйственных линий за последнее время обеспечивается плавкими предохранителями многоократного действия, т. е. с автоматическим повторным включением. Дальнейшее улучшение работы защиты заключается в применении выключателей с АПВ. Перерывы в питании в летнее время происходят из-за перегорания предохранителей у потребительских трансформаторов вследствие грозовых перенапряжений. От 60 до 85% случаев перегорание этих предохранителей имело место по причине перенапряжений, хотя они устанавливаются на ток, в 3—10 раз превышающий номинальный ток трансформаторов. Учитывая, что при правильном выполнении заземления и защиты от перенапряжений аварии трансформаторов очень редки, автор считает целесообразным совсем не ставить предохранителей у потребительских трансформаторов либо значительно увеличить пределы их срабатывания. Тем самым может быть устранена причина перерывов питания многих отдельных потребителей.

Кандидат с.-х. наук И. А. БУДЗКО

## АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА, ТЕХНИКА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И НИЗКОВОЛЬТНАЯ АППАРАТУРА

Трансформаторы тока с малым вторичным током. *El. Eng.*, Tr., № 10, стр. 649—650, 1946.

По вопросу о трансформаторах тока с вторичными токами, меньшими 5 А, имеется мало информации и она несит описательный характер. Применение этих трансформаторов в значительной степени связано с релейной защитой, вследствие чего подкомитет AIEE по реле выделил рабочую группу для изучения этой проблемы, чтобы в результате дать определенные практические рекомендации. Трансформаторы тока с малыми вторичными токами выгодно применять при значительных расстояниях от места их установки до щита управления и в случаях необходимости параллельного соединения вторичных обмоток трансформаторов тока. С уменьшением номинального вторичного тока потерии в проводах вторичной коммутации уменьшаются пропорционально квадрату тока, однако соответствующее уменьшение сечения не всегда возможно вследствие необходимости обеспечения достаточной механической прочности проводов. Поскольку устройства, присоединяемые к трансформаторам тока, требуют для обеспечения своего действия определенной мощности, с уменьшением вторичного номинального тока увеличивается их сопротивление и, следовательно, увеличивается напряжение на зажимах. Если, например, в настоящее время американские стандарты на измерительные трансформаторы классифицируют точность работы реле при напряжениях на зажимах 800 В при токе 100 А (20 кратный ток), то в случае применения трансформаторов тока с номинальным вторичным током 1 А это напряжение достигает 4 000 В. Есть основания предполагать, что при разрыве вторичной цепи трансформатора тока с номинальным вторичным током 1 А и больших первичных токах амплитуда напряжения во вторичной обмотке может достигнуть 25 000 В. Однако, полагают, что изоляцию вторичной обмотки и аппаратуры достаточно испытывать на напряжение 12 500 В относительно земли в течение одной минуты. При отсутствии во вторичной цепи реле можно предусмотреть устройства, закорачивающие вторичную обмотку при сверхтоках. Следует также рассмотреть целесообразность применения трансформаторов тока с большой постоянной времени. Рабочая группа считает, что применение трансформаторов тока с малым вторичным током имеет специальную

ограниченную область и что в настоящее время пока еще нельзя сообщить определенных данных для стандартизации.

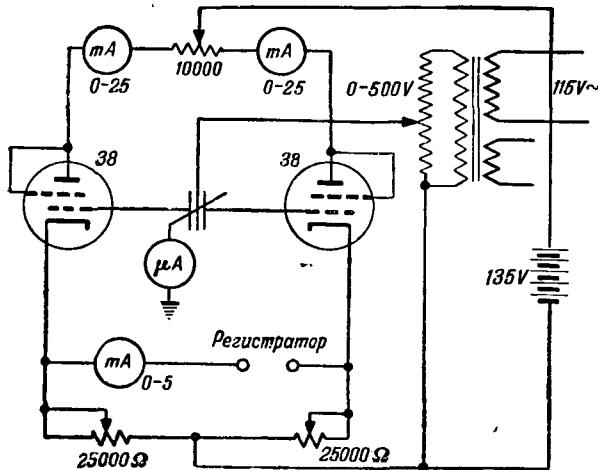
В сообщении АИЕЕ не упоминается о существенных преимуществах использования трансформаторов тока с пониженным вторичным током для дистанционных защит с переключением токовых цепей.

Инж. А. Б. ТИМОФЕЕВ

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

E. L. Deeter. Регулирование и регистрация с помощью электронных ламп со свободной сеткой. *Electronics*, № 1, стр. 172, 1946.

Если на управляющую сетку лампы через конденсатор малой емкости подавать переменное напряжение, то при изменении величины емкости будет изменяться анодный ток лампы. Поскольку требуемая величина емкости составляет доли  $\mu\text{F}$  (например, 0,2  $\mu\text{F}$ ), то сеточный конденсатор может быть воздушным с малой площадью пластина. Это позволяет управлять анодным током лампы с помощью гальванометра, между стрелкой которого в виде тонкой



алюминиевой трубочки и неподвижной пластиной, представляющей собой проволочку, параллельную стрелке, образуется сеточная емкость. Так как наибольшая эффективность достигается при минимальной утечке между сеткой и катодом, то было найдено, что наилучший результат дает лентод 38, у которого сетка выводится на верхний колпачок. Если лентод 38 включен на постоянное анодное напряжение 90 V (экранная сетка соединена с анодом) и на сетку через конденсатор 0,2  $\mu\text{F}$  подается переменное напряжение 60 V, то изменение емкости вызывает линейное изменение анодного тока на 5 mA, при среднем анодном токе 12 mA. Во избежание влияния емкости посторонних предметов устройство должно быть экранировано. Для постоянства величины утечки должна поддерживаться неизменная влажность. Изменение сеточной емкости может производиться путем сближения пластин, путем введения стрелки гальванометра между пластинами конденсатора или путем приближения средней пластины трехпластинчатого конденсатора к той или другой внешней пластине. Была осуществлена схема релейного действия с введением стрелки гальванометра между двумя пластинами, которая путем применения ламп 954 («жолудь»), 6С5 тиатрона 2050 и реле давала при управляющем токе 5 mA мощность на выходе 1 kW. Другое, наиболее совершенное устройство, основанное на описанном принципе, было осуществлено для регистрации показаний температуры по мостовой схеме, показанной на рис. 1. В этой схеме изменение влажности действует на обе лампы приблизительно одинаково и компенсируется. Стрелка гальванометра колебается между сеточными выводами двух ламп 38. В диагональ моста был включен регистрирующий миллиамперметр Эстерлейн-Ангус со шкалой от 1 mA. Была получена линейная характеристика схемы; время отклонения на всю шкалу 1 sec.

Кандидат техн. наук С. А. ГИНЗБУРГ

L. S. Flotz. Определение параметров цепей по осциллограммам. *El. Eng.*, № 10, стр. 490—492, 1946.

Осциллограф обычно используется для анализа явлений, происходящих в электрических цепях. Ниже приведены примеры определения параметров электрических цепей на основании осциллограмм включения (на постоянную э. д. с.).

1. Включение активного сопротивления  $R$  и самоиндукции  $L$ . Осциллограмма тока  $i$  в зависимости от времени  $t$  показана на рис. 1. Точки кривой выбираются из условия  $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ . При этом можно показать, что

$$R = \frac{E[2i_2 - (i_2 + i_1)]}{i_2^2 - i_1 i_2} \quad \text{и} \quad L = \frac{-Rt_2}{\ln\left(1 - \frac{Rt_2}{E}\right)},$$

где  $E$  — приложенная э. д. с.

2. Включение активного сопротивления  $R$ , самоин-

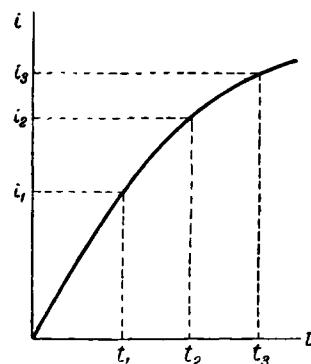


Рис. 1.

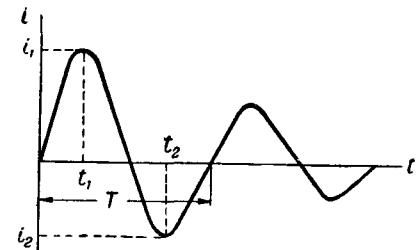


Рис. 2.

дукции  $L$  и емкости  $C$  при  $R^2 < \frac{4L}{C}$ . Осциллограмма показана на рис. 2. При этом имеют место соотношения:

$$L = \frac{ET}{\pi i_1} \cdot e^{-\frac{1}{2} \ln \frac{i_2}{i_1}}, \quad R = \frac{-2 + \ln \frac{i_2}{i_1}}{T},$$

$$C = \frac{T^2}{\pi^2 L + \left(\frac{RT}{2\sqrt{L}}\right)^2}.$$

здесь  $T$  — период колебаний цепи;  $e$  — основание натуральных логарифмов.

Анализ кривых, полученных с помощью осциллографа типа S011D370, дал следующую точность определения: активного сопротивления — 0,5%, самоиндукции — 3% и емкости — 1,5%.

Описанный метод анализа осциллограмм может быть использован, в частности, для проверки осциллографа.

Инж. А. Б. ТИМОФЕЕВ



## В Техническом совете Министерства электропромышленности СССР

### РАБОТА ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ ПО ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИЮ в 1946 г.

Экспертная комиссия по электромашиностроению при Техническом совете МЭП СССР (председатель комиссии—А. И. Бергинов) утвердила ряд технических заданий на проектирование новых серий электрических машин. В основу этих технических заданий были положены: надежность машин в эксплоатации; снижение потерь в машинах длительного режима; возможность осуществления совершенных технологических процессов и массового выпуска; широкая номенклатура исполнений по роду защиты, монтажа и электрическим характеристикам при максимальной унификации деталей.

**Шкала диаметров.** Приняты следующие величины внешних диаметров железа статоров машин переменного тока и якорей машин постоянного тока: 102, 120, 145, 167, 182, 210, 245, 280, 327, 368, 423, 493, 560, 650, 740, 850 и 990 мм. Припуск на штамповку на обе стороны принят от 5 до 10 мм (в зависимости от диаметра).

Для всех диаметров (кроме 560 и 650 мм) обеспечивается безотходный раскрой при условии добавления в стандарте на электротехническую сталь (ГОСТ 802-41) листов размеров  $860 \times 1720$  мм<sup>2</sup>.

Размеры внешних диаметров статоров и якорей, меньшие 100 мм, должны обеспечивать безотходный раскрой из листов  $750 \times 1500$  и  $1000 \times 2000$  мм<sup>2</sup>. При расчете раскроя принимается допуск на штамповку 4 мм.

**Изоляция машин.** Утверждены руководящие указания по выбору изоляции, которые базируются на новых видах изоляции.

Предусматривается широкое применение проводов с эмалевой изоляцией повышенного качества, стекловолокнистых материалов, нагревостойких синтетических пленок. Для каждого рода машин в зависимости от напряжения, мощности, режима и условий работы указаны конкретные виды изоляционных материалов и толщины изоляции.

**Серия асинхронных электродвигателей с тяжелым режимом работы.** Эти электродвигатели предназначаются для привода кранов, подъемных механизмов, вспомогательных механизмов металлургических агрегатов и др. Новая серия должна заменить существующие серии КТ, КТК и КТС, которые имеют существенные недостатки (резкое снижение мощности в режимах выше 40% ПВ; повышенное время разгона; отсутствие ряда модификаций, необходимых потребителю). Машины новой серии—закрытые с внешним обдувом (старые серии имеют естественное охлаждение) на напряжение 220/380 и 500 В. Предусматривается одно- и многоскоростное исполнение.

Шкала мощностей и скоростей двигателей односкоростного исполнения должна примерно соответствовать табл. 1.

**Изоляция электродвигателей** должна быть класса В.

Кратность максимального момента односкоростных электродвигателей должна быть не менее 2,2 при мощности до 8 kW и не менее 2,75 для электродвигателей большей мощности.

Постоянная времени разгона должна быть не более 0,09 сек. при мощности до 20 kW и 0,12 сек для двигателей большей мощности. Кратность пускового тока для короткозамкнутых двигателей не должна превышать 4,5. Двигатели должны быть рассчитаны на число оборотов, равное 2,5-кратному синхронному при моменте не более номинального. Должна быть обеспечена надежность работы при частоте включений до 1 200 в час при наложении электрического и механического торможения, как и для аналогичных двигателей переменного тока.

Серия электродвигателей постоянного тока с тяжелым режимом работы. Эта серия должна заменить серии КПД, КПДН, КПДМ, а также ПН повторно-кратковременного режима работы с повышенными моментами. Недостатками серии КПД, КПДН, КПДМ являются: пониженная кратность перегрузочных моментов; неудовлетворительное использование активных материалов малых габаритов (в связи с применением изоляции класса А); завышенная шкала оборотов у машин габаритов от I до VI и связанное с этим ухудшение динамических показателей; недостаточная тепломощность шунтовых обмоток, не допускающая длительного включения; отсутствие разъемного остава. Серия ПН, запроектированная в основном для продолжительного режима работы, не приспособлена к требованиям повторно-кратковременной нагрузки.

Предусматриваются исполнения по роду защиты и охлаждения: закрытое с естественным охлаждением, закрытое с независимой вентиляцией (продуваемое) и защищенное, а по роду монтажа: горизонтальное на лапах, горизонтальное фланцевое (до 15 kW) и вертикальное (для моделей, не имеющих разъема остава). Разъемный остав предусматривается у электродвигателей весом свыше 600 kg.

Двигатели мощностью до 35 kW будут запроектированы на напряжения 110, 220 и 440 V. Для двигателей большей мощности предусматриваются напряжения 220 и 440 V.

Шкала мощностей и оборотов двигателей 220 V закрытого исполнения (при серийном возбуждении) должна примерно соответствовать табл. 2.

Кроме основного исполнения (табл. 2) предусматриваются более быстроходные модификации двигателей первых шести габаритов.

**Изоляция двигателей—класса В.**

Кратность максимального пускового момента (при скорости вращения до 50% от номинальной и при номинальной) двигателей на 110 и 220 V должна соответствовать следующим данным (табл. 3).

Двигатели должны быть рассчитаны на 3,5-кратное число оборотов с моментом 0,7 от номинального при электрическом торможении и с двухкратным моментом при механическом торможении. Должна быть обеспечена надежность работы при частоте включений до 1 200 в час при наложении электрического и механического торможения, как и для аналогичных двигателей переменного тока.

**Серия асинхронных электродвигателей общего применения (закрытых).** Существующие серии АД, МА-200, МА-8—9, МК-МКМ и др. в силу своих недостатков, неоднократно освещавшихся в печати, заменяются новой серией мощностью от 1 до 100 kW. Основное исполнение электро-

Таблица 1

| Синхронное число оборотов в минуту | Мощность в kW при 25 % ПВ | Количество моделей в данном диапазоне | Средний коэффициент нарастания мощности |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---|
| 1 000                              | 2 ÷ 30                    | 9                                     | 1,4                                     |
| 750                                | 10 ÷ 40                   | 5                                     | 1,41                                    |
| 600                                | 30 ÷ 200                  | 9                                     | 1,27                                    |

Таблица 2

| Число оборотов в минуту | Мощность при 25% ПВ | Число оборотов в минуту | Мощность при 25% ПВ |
|-------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| 900                     | 2                   | 550                     | 26                  |
| 900                     | 3                   | 550                     | 35                  |
| 850                     | 4                   | 500                     | 50                  |
| 825                     | 5                   | 500                     | 68                  |
| 725                     | 6                   | 450                     | 85                  |
| 725                     | 8,5                 | 400                     | 110                 |
| 650                     | 13                  | 400                     | 140                 |
| 600                     | 17                  |                         |                     |

Таблица 3

| Тип двигателя                                | Кратность при скорости вращения до 50% | Кратность при номинальной скорости вращения |
|--|--|---|
| Серийный . . . . .                           | 5                                      | 4   |
| Компаундный . . . . .                        | 4,5                                    | 3,5   |
| Шунтовой с форсированием при пуске . . . . . | 3,6                                    | 3,0   |
| Шунтовой . . . . .                           | 2,8                                    | 2,5   |

двигателей новой серии—защищенное, горизонтальное с короткозамкнутым ротором для продолжительного режима работы.

Предусматриваются все необходимые исполнения по монтажу: горизонтальное со станиной на лапах; горизонтальное с фланцевым щитом и станиной на лапах; горизонтальное с фланцевым щитом и станиной без лап; вертикальное с фланцевым щитом и станиной без лап; пакеты ротора и статора с обмоткой (для встройки в механизмы). Напряжения 127/220 (при мощности 15 kW и выше), 220/380, 500 V.

Рекомендуются 16 габаритов с коэффициентом нарастания от 1,5 (на меньших габаритах) до 1,25 (на больших габаритах).

Предусматриваются следующие модификации: двигатели с нормальным пусковым моментом, с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, с ротором с контактными кольцами (при мощности 25 kW и выше) и многоскоростные. Исполнение с нормальным пусковым моментом должно обеспечить кратность пускового момента и пускового тока по отношению к номинальным данным для длительного режима работы.

Таблица 4

| Мощность, kW | Кратность момента (не ниже) | Кратность тока не (выше) |            |
|--------------|-----------------------------|--------------------------|------------|
|              |                             | 2p = 2 и 4               | 2p = 6 и 8 |
| 1 ÷ 25       | 1,25                        | 6,5                      | 6,0        |
| 25 ÷ 100     | 1,0                         | 6,5                      | 6,0        |

Исполнение с повышенным пусковым моментом должно иметь кратность пускового момента не ниже 2.

Устанавливаются значения числа оборотов в минуту (синхронного): 1 500, 1 000 и 750, а для исполнения с нормальным пусковым моментом, кроме того, 3 000.

Коэффициент полезного действия двигателей новой серии должен быть не ниже установленного ГОСТ 186-41, а значение  $\cos \varphi$  повышенено на 1—3% против значений по

ГОСТ. Обращается внимание на необходимость повышения к. п. д. и  $\cos \varphi$  при  $1/2$  и  $3/4$  номинальной нагрузки.

Изоляция двигателей—класса А.

Серия асинхронных электродвигателей в закрытом исполнении. Новая серия охватывает двигатели мощностью от 1 до 100 kW при 1 500 об/мин. Предусматривается закрытое исполнение с внешним обдувом на всем диапазоне серии и закрытое с естественным охлаждением для мощности от 1 до 20 kW. Требования к исполнениям по роду монтажа и по электрическим характеристикам в основном совпадают с указанными выше для серии защищенных асинхронных электродвигателей.

Серия машин постоянного тока общего применения. Машины новой серии предназначаются для замены серий ПН и МП-540. Недостатками электродвигателей серии ПН являются: недостаточная унификация деталей внутри серии; неудовлетворительная коммутация в ряде исполнений; отсутствие увязки шкалы оборотов со шкалой для асинхронных двигателей; ограниченный диапазон числа оборотов; неудовлетворительное исполнение двигателей с широкой регулировкой; отсутствие обдуваемого исполнения. Генераторы серии ПН имеют основные недостатки двигателей этой серии, а именно неудовлетворительную коммутацию и снижение в связи с этим числа оборотов на больших габаритах.

Новая серия охватывает нормальные электродвигатели и генераторы общего применения мощностью от 1 до 250 kW при 1 500 об/мин. Основное исполнение—защищенное, горизонтальное, для продолжительного режима работы.

Предусматриваются исполнения электродвигателей: по роду защиты и охлаждения: защищенное, продуваемое, закрытое с естественным охлаждением, закрытое с внешним обдувом, а по роду монтажа: горизонтальное со станиной на лапах, горизонтальное с фланцевым щитом и станиной на лапах или без лап, вертикальное с фланцевым щитом и станиной без лап; пакеты ротора и статора с обмоткой (для встройки в механизмы).

Генераторы предусмотрены в защищенном исполнении, горизонтальные.

Напряжения электродвигателей 110, 220 и 440 V, генераторов—115, 230 и 460 V.

Шкала мощностей до 100 kW аналогична шкале асинхронных двигателей общего применения.

Предусматривается фиксированная шкала скоростей вращения, совпадающая со шкалой для асинхронных двигателей, а именно: 2 850, 1 450, 960, 720 и 580 об/мин. Шкала мощностей электродвигателей с широкой регулировкой оборотов значительно расширяется по сравнению с серией ПН.

Возбуждение двигателей—шунтовое со стабилизирующей серийной обмоткой, а генераторов—компаундное. При достаточной устойчивости скоростной характеристики двигателей (8—10% снижения оборотов от холостого хода до номинальной нагрузки) техническое задание допускает шунтовое возбуждение.

Изоляция машин новой серии—класса А и для закрытого и закрытого с внешним обдувом исполнения—класса В.

Серия ПНО и ПНТ развита из четырехполюсных машин постоянного тока серии ПН; применение почти всех основных деталей машин ПН вплоть до штампов полюсов, а в некоторых случаях и штампов якорей, значительно облегчает и удешевляет производство этих машин. Так как серии ПНО и ПНТ являются устаревшими и имеют основные конструктивные недостатки серии ПН, необходимо спроектировать новую серию синхронных генераторов, сохранив в ней тот же принцип применения деталей машин постоянного тока.

Инж. Я. С. ГУРИН

◊ ◊ ◊

## ДИССЕРТАЦИИ

## Грузинский индустриальный институт им. Кирова

В ученом совете ГИИ защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук за период с 1939 г. по апрель 1946 г.:

Д. Г. Туманишивили защитил 29 июня 1939 г. диссертацию на тему «Дополнительный нагрев трансформаторов прямыми лучами солнца на открытых подстанциях».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. И. Диедебулидзе и кандидат техн. наук, доц. В. В. Бурсадорф.

Теоретически и экспериментально обосновано, что дополнительный нагрев трансформаторов прямыми лучами солнца на открытых подстанциях, особенно в южных широтах, необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации подстанций. Это имеет специальное значение для подстанций таких производств, на которых нагрузка мало меняется в течение суток.

Г. А. Сисоян защитил 27 июня 1940 г. диссертацию на тему «Оптимальный режим мощных ферросплавных печей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. И. Диедебулидзе и кандидат техн. наук, доц. Д. Г. Туманишивили.

Рассмотрен мощный печной агрегат, как приемник электрической энергии, и дан вывод основных уравнений печного контура методом симметричных составляющих с учетом полного сопротивления трансформатора. На этой основе показаны оптимальные условия работы печи.

Рассмотрена рудно-термическая печь как регулятор энергосистемы и определены допустимые по технико-экономическим условиям пределы работы печного агрегата в режиме потребителя—регулятора.

Г. М. Махарадзе защитил 2 июля 1940 г. диссертацию на тему «Синхронный генератор с ослабленной реакцией».

Официальные оппоненты: проф. А. Я. Тер-Хачатуров и доц. Л. Д. Хизанишивили.

Приведен подробный теоретический анализ реакции якоря операционным методом и обоснована целесообразность применения синхронного генератора особой конструкции со слабой реакцией.

К. Ф. Баканидзе защитил 24 июня 1941 г. диссертацию на тему «Работа короткозамкнутых асинхронных электродвигателей с повышенным скольжением при высокой частоте включения».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. И. Диедебулидзе и кандидат техн. наук, доц. Д. Г. Туманишивили.

Приведен анализ работы короткозамкнутых асинхронных электродвигателей с нормальным скольжением. Рассмотрены вопросы пуска и торможения короткозамкнутых электродвигателей и сопоставлена работа двигателя с нормальным скольжением с работой двигателя с повышенным скольжением в режимах пуска и торможения, а также в режиме установившегося движения.

Р. И. Караев защитил 23 октября 1942 г. диссертацию на тему «Вопросы технико-экономических расчетов электрических сетей».

Официальные оппоненты: проф. А. Я. Тер-Хачатуров и кандидат техн. наук, доц. Д. Г. Туманишивили.

Предложен новый метод технико-экономических расчетов электрических сетей, основанный на непосредственном учете расхода экономических ресурсов, взамен применяемых в настоящее время технико-экономических расчетов, основанных на стоимостных показателях.

Г. Н. Тер-Газарян защитил 14 мая 1943 г. диссертацию на тему «Эффект быстродействующего возбуждения при работе синхронного генератора на асинхронную нагрузку».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. Н. Шедрин и кандидат техн. наук, доц. Г. И. Атабеков.

Исследовано влияние параметров возбудителя генератора и времени отключения короткого замыкания на динамическую устойчивость асинхронной нагрузки. Исследование проведено с учетом электромагнитных переходных процессов в генераторе и изменения скольжения асинхронных двигателей. На основе разработанной методики предложен упрощенный расчет динамической устойчивости синхронных машин с учетом изменения скольжения асинхронной нагрузки, а также уточненный сравнительно с принятым расчет поведения двигателей собственных нужд электростанций при коротких замыканиях в системе собственного расхода.

Н. В. Габашвили защитил 28 мая 1943 г. диссертацию на тему «Дополнительный критерий автоматического регулирования частоты объединенных энергосистем».

Официальные оппоненты: проф. А. Я. Тер-Хачатуров и кандидат техн. наук, доц. Г. И. Атабеков.

Вопросы автоматического регулирования частоты и активной мощности современных энергетических систем и объединений в настоящее время вылились в форму весьма сложной задачи, требующей соответствующего анализа и решений как в области поведения самих энергетических систем, так и в области аппаратуры регулирования. Анализ соответствующих способов автоматического регулирования, произведенный в диссертации, на базе эксплуатационного опыта и литературных источников показал, что наиболее качественное регулирование частоты получается при осуществлении комбинированного регулирования по критериям — мгновенного отклонения частоты ( $\Delta f$ ), ускорения системы ( $\frac{df}{dt}$ ) и интегральному углу ( $\delta = \int_0^t \Delta f dt$ ).

В работе предложена новая схема и конструкция индикатора, реагирующего на величину  $\Delta P$ ; регулятор состоит из двух органов — одного, замеряющего электрическую мощность, и второго, замеряющего механическую мощность агрегата. Первый из них представляет собой ламповый ваттметр, второй — потенциометр, связанный со штоком поршня сервомотора; в работе дан подробный анализ работы лампового ваттметра, приспособленного для целей регулирования. Для измерения продолжительности регулирующих импульсов с целью настройки регулятора на ту или другую скорость регулирования предложена новая схема электронного реле времени, преобразующего импульсы тока определенной длительности в импульсы кратной длительности.

М. И. Диидзе защитил 16 июля 1943 г. диссертацию на тему «К теории электропривода промышленных центрифуг».

Официальные оппоненты: кандидат техн. наук, доц. Д. Г. Туманишивили и кандидат техн. наук, доц. Г. А. Сисоян.

В результате анализа и критики существующих методов расчета мощности электродвигателя центрифуг периодического действия, способов пуска и торможения двигателя, а также автоматизации процесса работы центрифуг даны упрощенные методы расчета мощности асинхронного двигателя центрифуг периодического действия по среднему пусковому моменту и выбора мощности асинхронного двигателя центрифуги периодического действия по нагреву (по средним эффективным джоулевым потерям в обмотке ротора). Описаны рациональные способы электрической автоматизации технологического процесса работы центрифуг периодического действия, основанные на применении струйного реле, и способы пуска и торможения асинхронного двигателя полным и пониженным напряжением.

И. С. Курдиани защитил 21 июля 1944 г. диссертацию на тему «Новый орган направления энергии».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. И. Диедебулидзе и проф. А. Я. Тер-Хачатуров.

Установлена принципиальная возможность замера направления энергии на магистральных линиях передачи по новому методу, основанному на сравнении фаз линейного тока устанавливающегося и предшествующего режимов и позволяющему отказаться от использования напряжения системы, благодаря чему предложенное устройство свободно от недостатков, присущих обычно применяемым ваттметровым реле, и, в частности, не работает ложно при качаниях в системе, не имеет мертвых зон по направлению и обеспечивает высокий момент в реле при коротких замыканиях, так как подводимая к реле мощность всегда активна и зависит только от величины тока в линии. Работа устройства основана на использовании двухполупериодного выпрямителя во вторичной цепи линейного трансформатора тока с последующим преобразованием пульсирующего напряжения. Рассмотрены переходные процессы, имеющие место при изменении направления энергии, и установлено существование некоторых явлений, не отмеченных в существующей литературе.

Г. К. Ткешелавиши защищил 23 февраля 1945 г. диссертацию на тему «Некоторые вопросы расчета электрических параметров воздушных линий электропередач».

Официальные оппоненты: проф. А. Я. Тер-Хачатуров и доц. Л. Д. Хизанишвили.

Рассмотрено влияние наличия защитного троса на емкость и индуктивность воздушной линии при нормальном и аварийных режимах. Особо рассмотрены тросы из ферромагнитного материала и дан метод подсчета распределения обратного тока между землей и ферромагнитным тросом. Детально рассмотрен вопрос распределения обратного тока при заземлении троса на всех опорах в случае линии конечной длины. Специально исследован вопрос о влиянии линии сильного тока на линии связи; для расчета влияния предложена эмпирическая формула. В приложении приведен расчет электромагнитного поля одиночного провода при произвольном порядке изменения тока во времени.

Г. Г. Костянин защищил 19 февраля 1946 г. диссертацию на тему «Коммутационные процессы и резонансные явления в цепях постоянного тока на электростанциях и подстанциях».

Официальные оппоненты: проф. А. Я. Тер-Хачатуров и кандидат техн. наук, доц. Г. М. Махарадзе.

Выполнен количественный и качественный анализ электрических явлений, возникающих в цепях оперативного (постоянного) тока, и дана оценка этим явлениям с точки зрения их способности повредить изоляцию цепи или вызвать ложное срабатывание электромагнитных механизмов. На базе теоретических и экспериментальных исследований установлены максимально возможные значения токов и на-

пряжений в цепи при переходных процессах и резонансных явлениях в одиночных и связанных контурах. Предложено глухое заземление отрицательного полюса батареи в цепях, обладающих значительной индуктивностью и емкостью, и выдвинут ряд мероприятий, повышающих надежность их эксплуатации.

Б. Б. Тимофеев защищил 5 апреля 1946 г. диссертацию на тему «Электродинамические приборы высокой чувствительности с малыми углами поворота».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. И. Дицебуладзе, кандидат техн. наук, доц. Н. В. Габашвили и кандидат техн. наук Г. К. Ткешелавиши.

Рассмотрено действие оптического отсчитывающего приспособления с многократным отражением от двух плоских зеркал, из которых одно связано с вращающейся частью электродинамического чувствительного элемента. Приведены расчетные формулы и построенные автором графики, необходимые при практическом осуществлении электродинамических измерительных приборов высокой чувствительности с малыми углами поворота.

А. К. Котия защищил 25 апреля 1946 г. диссертацию на тему «Резонанс в несимметричных трехфазных цепях и уравновешивание трехфазных систем».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. И. Дицебуладзе и кандидат техн. наук, доц. Г. М. Махарадзе.

Рассмотрены вопросы анализа явлений резонанса в несимметричных трехфазных цепях и уравновешивания трехфазных систем посредством реактивных сопротивлений. Разобраны явления резонанса в трехфазных и многофазных системах с числом фаз больше трех, соединенных звездой и треугольником, а также в трехфазной системе, соединенной звездой с нейтральным проводом, имеющим сопротивление. Разобрана схема трехфазного конденсаторного трансформатора, дан подробный анализ системы и произведено сравнение с однофазной схемой Бушера. Исследовано применение теоретических выводов к разрешению практических задач по уравновешиванию трехфазных систем посредством реактивных сопротивлений. Описаны отрицательные последствия, вызываемые токами обратной последовательности несимметричного приемника в генераторах, сетях и приемниках. Выведены уравнения, устанавливающие зависимость токов обратной последовательности от параметров несимметричных приемников, соединенных звездой и треугольником, и даны уравнения для расчета уравновешивающих реактивных сопротивлений.

Доц. И. К. ЩУКЛИН  
Ученый секретарь Ученого совета ГИИ.



## Московский энергетический институт им. Молотова

В Московском энергетическом институте им. Молотова за период с декабря 1945 г. по декабрь 1946 г. защищены следующие диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук:

А. В. Нетушли защищил 28 декабря 1945 г. диссертацию на тему «Анализ триггерных элементов в электронных счетных схемах».

Официальные оппоненты: действительный член Академии наук УССР, проф. С. А. Лебедев и кандидат техн. наук А. А. Фельдбаум.

Рассмотрены триггерные схемы, нашедшие применение в различных областях электронной техники, различные типы релейных триггерных и электронных схем и намечены общие принципы их построения. Некоторые из рассмотренных схем являются оригинальными. Произведен анализ дифференциальных уравнений системы с одним и двумя нелинейными элементами и на основании полученных общих выводов дана оценка качества ряда конкретных схем триггеров.

С. Л. Попков защищил 28 декабря 1945 г. диссертацию на тему «Однофазные индукционные передачи синхронного поворота на переменном токе постоянной частоты».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. В. Горюхов и доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов.

В работе установлены принципиальные связи, определяющие электромагнитные процессы в элементах однофазных передач синхронного поворота при несимметрии первичных и вторичных цепей. В результате определены характеристики однофазной передачи синхронного поворота, получены в простой форме соотношения для токов и момента нормальной однофазной передачи синхронного поворота с учетом полного сопротивления первичной цепи и дан простой метод расчета характеристик однофазной передачи синхронного поворота для малых углов рассогласования при использовании нормальных асинхронных двигателей. Точность предлагаемого метода расчета проверена экспериментально.

Л. М. Биберман защитил 22 февраля 1946 г. диссертацию на тему «Диффузия излучения в газовом разряде».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. С. Л. Мандельштам и кандидат техн. наук, доц. Б. М. Яворский.

Рассмотрены вопросы, связанные с прохождением резонансного излучения сквозь электрически-нейтральные газы, и дана количественная теория излучения резонансных линий в разряде низкого давления. Разработан приближенный метод расчета, пригодный для технических целей.

Д. А. Виккер защитил 22 февраля 1946 г. диссертацию на тему «Автоматическое регулирование частоты и активной мощности электрических систем».

Официальные оппоненты: действительный член Академии наук УССР, проф. С. А. Лебедев и кандидат техн. наук Л. С. Гольдфарб.

Изучены основные проблемы автоматического регулирования частоты и активной мощности в системах с синхронными турбо- и гидрогенераторами. Даны общие сведения о регуляторах скорости первичных двигателей, о регулировочных характеристиках и о способах их смещения. Систематизированы методы и системы автоматического регулирования частоты и приведено описание некоторых наиболее распространенных типов автоматических регуляторов частоты различных фирм. Рассмотрена кинетика процесса автоматического регулирования частоты при изолировании работающим генераторе, при нескольких параллельно работающих агрегатах и кинетика процессов совместного автоматического регулирования частоты и активной мощности в случае двух связанных между собой электрических систем.

Д. П. Ледянкин защитил 22 февраля 1946 г. диссертацию на тему: «Статическая устойчивость автоматического регулирования напряжения синхронного генератора».

Официальные оппоненты: действительный член Академии наук УССР, проф. С. А. Лебедев и проф. П. Г. Грудинский.

Целью исследования явилось изучение статической устойчивости автоматического регулирования напряжения синхронного генератора в конкретных условиях работы его на шине бесконечной мощности. Рассмотрены системы регуляторов различных заграничных фирм и отечественного производства. Дано линейное уравнение регулирования, отображающее настройку демпфера, статизм регулятора и влияние компаундингования. Установлено, что в зоне естественной устойчивости допустима статическая и астатическая работа регуляторов, а в зоне искусственной устойчивости — только статическая. Установлены зависимости качества работы регулятора от его настройки и компаундингования. Все основные положения работы иллюстрированы числовыми примерами.

С. Н. Ляндрес защитил 22 февраля 1946 г. диссертацию на тему «Методика исследований и испытаний некоторых элементов тяговых подстанций и тяговых сетей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. К. Г. Марквардт и инженер-майор тяги В. Г. Гурвич.

На основании анализа аварий на тяговых подстанциях трамвая и метрополитена и работы релейной защиты установлены номенклатура и объем профилактических, монтажно-аварийных и эксплуатационных испытаний элементов тяговых подстанций и тяговых сетей. Разработана методика и схемы испытаний ртутных выпрямителей и быстродействующих автоматических выключателей. Дано оригинальное решение вопроса по установлению оптимального режима загрузки агрегатов тяговой подстанции и разработаны методы автоматического контроля этого режима.

Н. А. Староскольский защитил 22 февраля 1946 г. диссертацию на тему «Трехпроводная система питания в электрической тяге».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. К. Г. Марквардт и доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд.

Анализируется преимущество трехпроводной системы питания постоянным током контактных сетей трамвая, метрополитена, пригородных дорог и подъездных путей по сравнению с двухпроводной системой питания. Рассмотрены способы поперечного и продольного секционирования сети

с чередованием участков различной полярности. Экспериментальное исследование опытного участка казанского трамвая показало, что при трехпроводной системе средняя нагрузка отсасывающих фидеров снизилась от 1,5 до 8 раз, потери энергии — в 8,5 раза, а рабочее напряжение на токоиземлителях вагонов повысилось на 4%. Даны оценка стоимости переоборудования подстанций и сетей на трехпроводную систему и показано, что расходы на переоборудование окупаются через 1—1½ года.

Ю. М. Галонен защитил 8 марта 1946 г. диссертацию на тему «Экспериментальные исследования и эксплуатационные характеристики и динамические показатели современных троллейбусов и трамваев».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. К. Минов и доктор техн. наук, проф. В. Е. Розенфельд.

Даны сжатые систематизированные сведения о состоянии и развитии троллейбусного хозяйства СССР и других стран мира и их столиц. Приведена подробная методика как стационарных, так и ходовых исследований троллейбусов по определению максимальных и эксплуатационных скоростей, пусковых ускорений, тормозных замедлений и проверке скоростных характеристик и теплового режима двигателей. Рассмотрены специальные исследования в области влияния искрообразования на радиосвязь, по проверке освещенности, шума и пр. Приведены сведения о трамвайном транспорте СССР и других стран и столиц мира. Рассмотрена методика специфических экспериментальных исследований трамваев. На основании сравнительных экспериментальных исследований подвижного состава с компаундными и серийными двигателями показано, что при существующей длине перегонов и ходовой скорости трамвай с компаундными двигателями оказывается менее выгодным по удельному расходу энергии. Предложена методика учета электроэнергии непосредственно в вагонах трамвая и троллейбуса и указаны требования к конструкциям электродинамических счетчиков энергии для этих целей.

Ю. С. Быков защитил 22 марта 1946 г. диссертацию на тему «Расчет самолетных каналов связи без внутренних помех».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. Г. Дрейzen и доктор техн. наук, проф. С. Н. Ржевкин.

Изложен метод расчета радиотелефонных каналов связи без внутренних помех и при наличии сильного акустического шума, приводящий к выбору частотной характеристики канала и уровня звукопередачи в нем. Установлена наиболее рациональная методика изучения и оценки самолетных акустических шумов, дающая возможность быстро оценить качество шумозаглушения на любом самолете. Рассмотрена методика расчета оптимальных параметров канала с учетом перегрузки уха. Проведен детальный расчет нескольких важных для практики случаев.

А. А. Григорьева защитила 22 марта 1946 г. диссертацию на тему «Прохождение радиосвязи на частотах, весьма близких к максимальному расчетным».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Н. Шукин и доктор техн. наук, проф. В. Н. Кесених.

Произведен анализ прохождения радиосвязи на частотах, превышающих максимальные расчетные, на коротких линиях, расположенных вблизи ионосферных станций. Учет влияния магнитного поля земли относительно увеличивается, особенно ночью, максимальную расчетную частоту. Экспериментальные исследования показывают возможность увеличения связи на частотах, превышающих на 15—20% максимальные расчетные, и позволяют сделать вывод, что максимальные расчетные частоты не являются максимальными возможными частотами.

Г. И. Цедербаум защитил 22 марта 1946 г. диссертацию на тему «Вопросы эксплуатации селеновых вентилей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов и кандидат техн. наук, доц. В. Г. Комар.

Дана развернутая критика простых математических методов расчета твердых выпрямителей и методики табулярного решения при шомощи норм нагрузки. Принципиаль-

ный недостаток такой методики — затушевывание закономерностей существующих между разными параметрами выпрямительной схемы и режима. Указаны ошибочные положения, принятые в нормативах. Рекомендован графо-аналитический метод расчета селеновых вентиляй для пропускного и запорного включения вентиляй. При помощи рекомендованного метода исследованы вопросы эксплуатации селеновых вентиляй в однофазных схемах питания с нагрузкой в виде чистой противоэлектродвижущей силы, без учета активного и реактивного сопротивлений источника питания. В результате исследования схемы классифицированы на четыре основные группы по принципу подобия с точки зрения работы селеновых вентиляй.

**Г. А. Ривкин** защитил 31 мая 1946 г. диссертацию на тему «Вопросы режимов преобразовательной установки для электролиза алюминия».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. И. Л. Каганов и кандидат техн. наук, доц. М. Г. Чиликин.

Выведены формулы для определения электрических величин, характеризующих работу преобразовательной установки в различных режимах. Разработан графический метод определения электрических величин при различных режимах и построены расчетные диаграммы. Приведены основные соотношения и кривые для определения содержания высших гармонических в первичной сети и на стороне выпрямленного тока, а также основные соотношения для оценки влияния высших гармоник на генераторы питающей станции, на асинхронные двигатели, присоединенные к сети, и на линии связи. Выведены формулы и построены векторные диаграммы для эквивалентного многофазного режима. Даны рекомендации для выбора минимального числа фаз в различных условиях питания и для различных режимов. Определена допускаемая глубина сеточного регулирования, допускаемые коэффициенты мощности и величина катодного дросселя для уменьшения уравнительного тока между агрегатами. Метод иллюстрирован примерами расчетов.

**Н. Г. Рождественский** защитил 31 мая 1946 г. диссертацию на тему «Гидравлический виннротор».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Близняк и инж. Б. Б. Кажинский.

Дан расчет, конструкция и результаты работы мало-мощного агрегата с виннроторным двигателем для микроэнергоустановок. Пробный агрегат был использован для гидроэлектробакена. Агрегат состоит из трех основных элементов: свободнопоточного, роторного гидродвигателя — виннротора, электрического генератора и светосигнального прибора. Испытания агрегата были произведены сначала в лабораторных, а затем в эксплоатационных условиях. Определены все характеристические коэффициенты двигателя, выявлена рациональная его форма и проверена предложенная методика регулирования. На основании опытных данных сделаны обобщенные выводы, которые позволили указать на возможность использования этого рода гидродвигателя в различных случаях, в частности приводится схематическое описание пловучей гидростанции мощностью до 10 kW с виннроторным двигателем.

**Н. С. Комаров** защитил 31 мая 1946 г. диссертацию на тему «Теоретические и экспериментальные исследования протяженных заземлителей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. К. М. Поливанов и кандидат техн. наук А. И. Долгинов.

Предложен новый метод расчета протяженных заземлителей, пригодный для практического использования и разработанный, исходя из дифференциальных уравнений длинных линий. Метод обоснован опытными данными. В основу расчета протяженных заземлителей положены усредненные параметры: самоиндукция, емкость, активное сопротивление и проводимость утечки протяженных заземлителей. Усредненные параметры могут быть определены как опытным, так и расчетным путем. Емкость при удельном сопротивлении грунта меньше  $10^5 \Omega/\text{см}$  может не учитываться. Небольшое расхождение между расчетными данными и экспериментальными результатами подтверждает правильность предлагаемого метода.

**Н. И. Соколов** защитил 31 мая 1946 г. диссертацию на тему «Элементы расчета токов короткого

замыкания при внутренних повреждениях в асинхронных двигателях».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Д. А. Городской и кандидат техн. наук, доц. В. Л. Фабрикант.

Предложены методы расчета некоторых сложных случаев несимметрии в асинхронных двигателях. Случаи последовательной и параллельной несимметрии исследовались с применением матричной алгебры, с использованием приемов разложения сопротивления на симметричные составляющие и связи схем всех последовательностей через сопротивления взаимоиндукции. Метод иллюстрирован примерами аналитических расчетов и расчетов на столах постоянного тока. Рассмотрено определение реактивных сопротивлений двигателя для отсеченных частей обмотки. Выявлено возможность появления в кривой ампервитков воздушного зазора гармоник с длиной волны, равной полной длине расточки статора и гармоник, кратных ей.

Показано использование матричной алгебры для построения эквивалентных схем. Разработан метод учета дополнительных гармоник в многополюсных машинах и рассмотрено влияние ротора на гармоники рассеяния в воздушном зазоре.

**Ф. М. Курковский** защитил 14 июня 1946 г. в совете электромеханического факультета диссертацию на тему «Основы теории изолирования кабеля бумагой лентой на изолировочных машинах».

Официальные оппоненты: проф. В. А. Привезенцев и кандидат техн. наук, доц. А. М. Антовиль.

Исследованы механические процессы наложения бумажных лент на кабель на изолировочных машинах, геометрические условия движения бумажной ленты от ролика до кабеля и условия движения ролика. В результате получены формулы, по которым должны устанавливаться направляющие пальцы в изолировочных машинах. Дан подробный кинематический и динамический анализ относительного движения роликов изолировочных машин и получены соотношения между скоростями ролика, ленты, кабеля и головки. Данна формула, связывающая силу натяжения ленты, ширину ленты, диаметр кабеля, угол подъема ленты по кабелю и введенную автором величину удельного давления ленты на кабель. Исследованы процессы самовыравнивания силы натяжения ленты. Разработана теория регулирования силы натяжения ленты и предложены два типа автоматических регуляторов. Работа указывает пути усовершенствования существующих и проектирования новых изолировочных машин.

**Е. Г. Комар** защитил 14 июня 1946 г. диссертацию на тему «Эксплопатация турбогенераторов».

Официальные оппоненты: проф. П. Г. Грудинский и кандидат техн. наук Н. А. Поляк.

Рассмотрены режимы работы турбогенератора при длительном отклонении от нормы напряжений, частоты, температуры входящего охлаждающего воздуха и коэффициента мощности. На основании теоретических исследований и экспериментальных данных приводятся рекомендации методов эксплуатации турбогенераторов в аномальных режимах. Исследованы физические процессы, приводящие к авариям и неполадкам в работе турбогенераторов, связанным с активным железом, обмоткой статора и системой охлаждения машин. Работа дает содержательный материал для составления эксплуатационных инструкций и противоаварийных рекомендаций.

**Л. А. Бессонов** защитил 14 июня 1946 г. диссертацию на тему «Расчет электрических цепей, содержащих дроссели со сталью, с учетом гистерезиса».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Г. С. Аронзон и кандидат техн. наук А. А. Фельдбахум.

Предложены способы аналитического выражения гистерезисного шлейфа, в применении к расчетам цепей постоянного и переменного тока. Исследована применимость различных методов интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений, к которым приводятся задачи расчета электрических цепей, содержащих дроссели со сталью, с учетом гистерезиса. Показано, что приближенное интегрирование таких уравнений может производиться прямыми вариационными методами, методом коллокации, методом наименьших квадратов и методом сравнения коэффициентов.

Произведено интегрирование всеми этими методами уравнений для цепи, содержащей сопротивление, емкость, индуктивность рассеяния и дроссель со сталью. Предложенным методом исследованы критические условия при феррорезонансе напряжений и найдены аналитическая зависимость изменений критического напряжения от частоты. Даны формулы для приближенного расчета потерь на гистерезис при кесинусоидальном токе.

А. А. Дубенский защитил 14 июня 1946 г. диссертацию на тему «Некоторые вопросы теории и применения асинхронного генератора переменной частоты с самовозбуждением».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Ю. С. Чечет и доктор техн. наук Д. А. Городской.

Исследована работа асинхронной машины с самовозбуждением в качестве генератора токов переменной частоты, применяемого для питания асинхронных двигателей, требующих плавного регулирования скорости. Произведен общий анализ условий самовозбуждения и работы асинхронного генератора переменной частоты и дана эквивалентная схема для самого общего случая работы асинхронного генератора. Определена зависимость частоты, напряжения и токов генератора от параметров схем, в которых работает генератор. Установлено, что при возбуждении генератора при помощи конденсаторов возможно регулирование частоты генератора путем изменения активных и реактивных сопротивлений системы. Асинхронный генератор рекомендуется для питания асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, требующих плавного регулирования скорости.

Б. М. Каган защитил 14 июня 1946 г. диссертацию на тему «Индикаторные бесконтактные сельсины».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук Д. А. Городской и доктор техн. наук, проф. Н. В. Горохов.

Разработана теория сельсинской схемы передачи угла и вращения с передатчиком и приемником, имеющими различные параметры. Изложена теория системы синхронной передачи угла с индикаторными бесконтактными сельсинами и дан анализ влияния отдельных параметров датчика и приемника на основные характеристики сельсинной схемы. Выведены формулы для расчета синхронизирующего момента при работе в схеме передачи угла от одного датчика нескольким приемникам. Исследовано влияние различных факторов на точность передачи угла, в частности, влияние несинусоидальности кривой взаимоиндукции в функции угла поворота сельсина. Произведена опытная проверка выведенных формул и результатов сельсинных схем.

Е. С. Бессонова защитила 21 июня 1946 г. диссертацию на тему «Вопросы установления амплитуды в резонансных и полосовых системах».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. Н. Щукин и лауреат Сталинской премии инж. Ю. Б. Кобзарев.

С помощью метода Ван-дер-Поля получено общее решение системы, состоящей из любого числа резонансных контуров, обладающих любыми затуханиями и расстройкой относительно поступающего сигнала. Для частных случаев: резонансного, полосового и трехконтурного усилителей, получены расчетные формулы и построены кривые для определения зависимости нестационарного процесса в различных схемах от настройки, числа контуров и формы резонансной кривой. Дано сравнение рассмотренных типов усилителей.

А. М. Утевский защитил 4 октября 1946 г. диссертацию на тему «Теория и методика расчета Р-фазных выпрямителей с емкостным фильтром».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Г. И. Бабат и кандидат техн. наук, доц. В. В. Ясинский.

Дан метод расчета выпрямителей с емкостным фильтром, применяющихся для питания анодных цепей, цепей сеточного смещения, пиковых вольтметров, детекторов и других устройств радиотехнических и радиолокационных установок. Приведено теоретическое и экспериментальное обоснование разработанного метода и показана недопустимость пользования упрощенными методами расчета, в которых обычно пренебрегают влиянием сопротивлений трансформатора и вентиля.

Я. В. Зильберблат защитил 4 октября 1946 г. диссертацию на тему «Зеркальные светильники ши-

рокого светораспределения для освещения улиц и площадей».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. В. Мешков и кандидат техн. наук Г. И. Длуженский.

Дан аналитический метод расчета профилей симметричных, несимметричных и составных рефлекторов. Предложены методы расчета распределения силы света зеркальных светильников и освещенности, создаваемой несимметричными осветительными приборами. Приведены схемы установок для исследования характеристик зеркальных светильников, рассеивающих свойств защитных стекол, степени блесткости и распределения температуры в светильниках различных типов. Сообщаются результаты проверки работы светильников на улицах города Москвы и дается сравнительная экономическая оценка установок с зеркальными светильниками и со светильниками прямого и рассеянного света.

В. В. Кузнецов защитил 22 ноября 1946 г. диссертацию на тему «Светооптические системы многостворчатых световых маяков».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. А. Каракин и кандидат техн. наук А. И. Грибанов.

Даны описания авиационных маяков и их технические характеристики по результатам испытаний. Показано влияние проблематической характеристики маяка на обнаружение сигналов и четкость распознавания их. Разобран вопрос о влиянии угла охвата диоптрической части профиля линз на величину фрепеллевских потерь светового потока, размеры оптической системы и структуру светового пучка линзовых прожекторов. Показано, что оптимальный угол охвата составляет  $30^\circ$ , а не  $38^\circ$ , как принято считать. Установлена зависимость между диаметром и фокусным расстоянием оптической системы и углом охвата диоптрической части профиля. Разработана методика расчета светового пучка линзовых маяков с источником света цилиндрической формы как для безабберационных, так и для аберрационных линз, причем показано, что замена цилиндрического источника света шаровым источником эквивалентных размеров не может производиться.

Л. Н. Балтианов и В. И. Тарасов защитили 20 декабря 1946 г. диссертации на темы «Электрооборудование электрических станций и подстанций и методика преподавания этого раздела в вузах» и «Некоторые вопросы коммутации электрических установок и методика их преподавания в вузах».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. А. А. Глазунов, проф. П. Г. Грудинский, проф. А. Я. Рябков и проф. Б. А. Телешев.

В качестве диссертаций представлен учебник «Электрооборудование электрических станций и подстанций», написанный Л. Н. Балтиановым и В. И. Тарасовым, и методические записки, в которых изложено обоснование содержания и расположения материала в учебнике, и даны рекомендации о методике преподавания соответствующих разделов на неэлектроэнергетических специальностях электротехнических и энергетических вузов. Л. Н. Балтиановым написаны 18 глав учебника, в том числе: «Общие сведения об электрических станциях, сетях и энергетических системах», «Токи короткого замыкания», «Электрические аппараты и токоведущие части», «Синхронные генераторы» и «Собственные нужды электрических станций и подстанций».

В. И. Тарасовым написаны 19 глав учебника, в том числе: «Схемы электрических соединений», «Распределительные устройства», «Релейная защита», «Силовые трансформаторы», «Измерительные приборы, сигнализация, блокировки, автоматическое включение и монтажные схемы; щиты управления» и «Общая компоновка электрических станций и подстанций».

И. А. Ленский защитил 20 декабря 1946 г. диссертацию на тему «Освещение территорий промышленных предприятий прожекторами залывающего света».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. В. В. Мешков и кандидат техн. наук М. С. Рябов.

Предложен оригинальный метод расчета освещенности, при помощи которого возможно непосредственное построение изолялок заданной освещенности на освещаемой поверхности.

ности. Рассмотрен метод выбора оптимального угла наклона, высоты установки, типа прожектора, способа размещения и мощности прожекторов. Изложены результаты экспериментальных исследований прожекторов, установленных на территории металлургического завода. На основе анализа результатов экспериментальных исследований разработаны рекомендации по нормальному режиму эксплуатации прожекторов. Установлено, что срок службы прожекторов не выше 6 месяцев. Приведены данные по исследованию принципа старения рефлектирующей поверхности прожекторов и установлено, что причиной старения является проникновение пыли из загрязненной атмосферы заводской территории. Несколько прожекторов типа П-3 были герметизированы, после чего работа лампы накаливания, защитного стекла и других элементов прожектора не ухудшилась, а срок службы увеличился в  $2\frac{1}{2}$ —3 раза.

О. А. Горянинов защитил 20 декабря 1946 г. диссертацию на тему «Основы анализа и теории кодо-импульсных устройств телеметрии».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Н. В. Горохов и кандидат техн. наук С. А. Гинзбург.

Предложена теория работы кодо-импульсных устройств телеметрии с комплектными кодами. Даны основы конструирования и указаны методы уменьшения погрешностей устройств. Разработаны оригинальные кодо-импульсные устройства телеметрии для различных применений.

Г. М. Бартенев защитил 20 декабря 1946 г. диссертацию на тему «О прогнозах радиосвязи».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Л. А. Жекулин и кандидат техн. наук К. М. Косяков.

На основании изучения статистических материалов об активности солнечной деятельности, каталогов магнитных бурь, результатов измерения критических частот ионосферы земли, а также результатов эксплуатации магистральных радиосвязей Союза дана расчетная формула для прогноза вольфовых чисел. Определена корреляция между числами Вольфа, с одной стороны, и полуденными, полуночными и минимальными значениями критических частот слоя  $F$ , полуденными значениями критических частот слоя  $E$  и чис-

лами магнитных бурь, с другой стороны. На основании установленной корреляции даны уравнения для расчета прогноза критических частот, случаев магнитных бурь и ионосферных возмущений, сопровождающихся нарушениями радиосвязи. Рекомендуется применение ретрансляций, увеличение излучаемой мощности при магнитных бурях и переход на ультракороткие волны, или близкие к ним короткие волны при явлении Беллинджа, в качестве мер борьбы за обеспечение бесперебойности радиосвязи.

Ф. А. Майборода защитил 20 декабря 1946 г. диссертацию на тему «Теоретическое и экспериментальное исследование электроприводов вспомогательных механизмов реверсивных прокатных станов».

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, проф. Е. В. Нитусов, кандидат техн. наук М. Г. Чиликин.

Изложен теоретический и экспериментальный анализ электромеханических процессов электроприводов вспомогательных механизмов реверсивных прокатных станов. Разработана методика расчета параметров схем электроприводов малой мощности, управляемых по системе Леонарда, и дан пример расчета электропривода нажимного устройства. Приведено подробное экспериментальное исследование электроприводов ряда вспомогательных механизмов слябинга завода «Запорожсталь» и выявлены эксплуатационные показатели электроприводов в действительных условиях работы. Показано, что основной нагрузкой электроприводов рольгангов нажимного устройства и шнеков является динамическая нагрузка. Доказывается возможность переключения двигателей с параллельной работы на последовательную для некоторых электроприводов в целях уменьшения потерь энергии при сохранении производительности. Рекомендуется применение системы Леонарда с амплидиным управлением в качестве наиболее совершенного, экономичного и надежного электропривода для металлургических заводов.

Кандидат техн. наук, доц. Г. С. БОРЧАНИНОВ

Ученый секретарь Ученого совета МЭИ



## ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

# ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ

УЧЕБНЫЕ ТАБЛИЦЫ

инж. А. М. ГОЛЬДБЕРГ и инж. Л. И. ДВОСКИН

Серия из 25 таблиц в красках.

Цена 80 руб. в папке.

Первые две таблицы дают представление о столбовой подстанции и трансформаторном помещении.

Следующие 13 таблиц изображают общий вид и отдельные ячейки распределительных устройств с одной системой шин для кабельных и воздушных фидеров, двух-, трех- и четырехэтажных р. у. с двумя системами шин.

8 таблиц посвящены подробной характеристике открытых р. у. в 35 и 110 кв.

Заканчивается серия таблицами, изображающими щит управления и генеральный план подстанции 110/35/6 кв.

Серия может служить не только в качестве учебного пособия в техникумах и вузах, но и полезным руководством для эксплуатационного персонала.

**ЗАКАЗЫ НАПРАВЛЯТЬ ПО АДРЕСУ: Ленинград, Невский проспект, 28. Ленинградское отделение Госэнергоиздата. Расчетный счет № 150997 в Центральном отделении Госбанка.**

# Библиография

## Новые книги по электротехнике и электроэнергетике<sup>1</sup> (издания 1946 г.)

Андианов К. А. и Грибанова О. И. Кремнийорганические полимерные продукты для промышленности, ч. II. ЦБТИ МЭП СССР, 56 стр., ц. 4 руб. 50 коп.

Арматура подстанционная контактная (МЭС СССР, Армсеть). Госэнергоиздат, 32 стр., ц. 2 руб. 50 коп.

Ахун А. И. Памятка по контактной электросварке. Машгиз, 60 стр., ц. 2 руб.

Богоявленский В. Н. Электрическая передача в гусеничных и колесных машинах. Машгиз, 207 стр., ц. 16 руб.

Вершинин. Применение маломощных ветроэлектрических агрегатов в сельском хозяйстве. Министерство земледелия и Министерство технических культур УССР, 34 стр., без цены.

Виноградов Н. В. Обмотки электрических машин. Утверждено в качестве учебника для ремесленных училищ. Госэнергоиздат, 200 стр., ц. 9 руб.

Винницкий А. С. Словарь твердоэлектрической терминологии на четырех языках. МАП СССР, НИИ № 1, 25 стр., ц. 3 руб.

Гельман А. С. Технология контактной сварки. Допущено в качестве учебника для техникумов. Машгиз, 213 стр., ц. 13 руб.

Глазер И. Б., Жирнов Н. И., Лезнов С. И., Шадрин А. К. Сборник предложений, премированных на всесоюзном конкурсе 1945 г. по экономии электрической и тепловой энергии. Под ред. А. А. Максимова (Госинспекция по променергетике и ВНИТОЭ). Госэнергоиздат, 192 стр., беспл.

Голован А. Т. Основные вопросы электрооборудования кузнечно-прессовых машин. МЭС СССР, Заочный институт усовершенствования ИТР, 71 стр., беспл.

Гольдберг А. М. и Двоскин Л. И. Трансформаторные подстанции. Учебные таблицы. Госэнергоиздат, 25 листов иллюстраций, ц. 80 руб.

Гребень И. И. Эксплоатация силовых трансформаторов, масляных выключателей и организация масляного хозяйства на электростанциях и электросетях, ч. 1. Министерство коммунального хозяйства УССР, 26 стр., без цены.

Дмитриевская Н. П. и Зайчикова В. А. Рациональное освещение прядильно-ткацких хлопчатобумажных и льняных фабрик. Гизлэгпром, 110 стр., ц. 6 руб.

Заведеев И. И., Кубланов Э. В., Проничев В. В., Руденко А. Т. Учебник торпедного электрика. Ч. 1. Принят в качестве учебника для школ ВМФ. Военное издательство, 190 стр., ц. 6 руб.

Зилитинкевич С. И. Новые системы и приборы для дистанционных измерений электрических и неэлектрических величин. Ленинградское газетно-журнальное и книжное изд-во, 80 стр., ц. 7 руб.

Иванов Н. А. Электроремонтные работы в США. МОНITOЭ, стр. 31, беспл.

Изоляторы линейные и подстанционные высоковольтные (МЭС СССР, Армсеть). Госэнергоиздат, 28 стр., ц. 2 руб. 50 коп.

Изюмов Н. М. Радиотехника. Военное издательство, 307 стр., ц. 7 руб.

Казакевич Б. М. Мероприятия по экономии расхода электроэнергии на собственные нужды электростанций. Ми-

нистерство коммунального хозяйства УССР, 46 стр., без цены.

Калинин В. И. Скоростная плавка металлов токами высокой частоты. Госплан СССР, ИТЭИН, 16 стр., ц. 2 руб. 30 коп.

Калитвианский В. И. Применение новых видов изоляции при ремонте электрооборудования. МОНITOЭ, 26 стр., беспл.

Калитвианский В. И. и Дегтев В. М. Высокочастотный нагрев неметаллических материалов (МЭП СССР, ЦБТИ). Госэнергоиздат, 52 стр., ц. 5 руб. 50 коп.

Каталог кранового электрооборудования. Вып. I. Крановые электродвигатели постоянного тока, 40 стр., ц. 3 руб. Вып. IV. Магнитные контроллеры постоянного и переменного токов, ц. 4 руб. 50 коп. Вып. VI. Тормозные электромагниты постоянного и трехфазного токов, ц. 2 руб. 20 коп. МЭП СССР, ЦБТИ.

Кравчик Э. Д. Расчет обмоток низковольтных асинхронных двигателей при ремонте. Под ред. Г. С. Паньюшева. ЦБТИ МЭП СССР, 48 стр., ц. 3 руб. 50 коп.

Красоткин В. Н. Сводный каталог кабельной продукции. Под ред. Н. Ф. Козырева (МЭП СССР, ЦБТИ). Госэнергоиздат, Вып. II. Обмоточные провода, 32 стр., ц. 7 руб. 50 коп. Вып. IV. Голые проволоки, провода, шины и ленты, 32 стр., ц. 6 руб. 50 коп.

Курадзе В. Я. Автоматизация конвейерных линий. Госплан СССР, ИТЭИН, 20 стр., ц. 2 руб. 80 коп.

Лазаренко Б. Р. и Лазаренко Н. И. Физика искрового способа обработки металлов. Под ред. Б. Н. Кабанова. ЦБТИ МЭП СССР, 76 стр., ц. 5 руб. 70 коп.

Лазаренко Б. Р. и Лазаренко Н. И. Электрическая эрозия металлов. Вып. II (МЭП СССР, ЦБТИ). Госэнергоиздат, 32 стр., ц. 3 руб. 75 коп.

Лайнер В. И. и Кудрявцев Н. Т. Основы гальванистии. Ч. II. Металлургиздат, 587 стр., ц. 35 руб.

Лившиц Б. Г. Физические свойства сплавов. Изд. 2-е, перераб. Металлургиздат, 320 стр., ц. 20 руб.

Ломоносов В. Ю., Поливанов К. М. Электротехника. Основные понятия. Утверждено в качестве учебника для подготовки рабочих кадров. Госэнергоиздат, 255 стр., ц. 11 руб.

Медведев С. Р. Строительство гидравлических электростанций на малых реках и энергоснабжение сельских потребителей. Министерство земледелия и Министерство технических культур УССР, 32 стр., без цены.

Научно-техническая сессия ВНИТОЭ по электрическим машинам (ноябрь 1946 г.). Тезисы докладов. ВНИТОЭ, 119 стр., беспл.

Николаев Г. А. Развитие электросварки в ближайшие годы. Изд-во Академии наук СССР, 126 стр., ц. 7 руб.

Пациора П. П. и Вильке Г. А. Руководство для электромехаников электрифицированных лесозаготовок. Электротропилы и кабельная сеть. Гослесстехиздат, 60 стр., ц. 3 руб. 50 коп.

Перлов И. С. и Ястребов П. П. Пособие для работников электросиловых цехов. Заготиздат, 62 стр., ц. 3 руб. 75 коп.

Петров И. А. и Розанов С. П. Электрооборудование текстильных предприятий. 2-е, переработанное издание. Допущено в качестве учебника для вузов текстильной промышленности. Гизлэгпром, 404 стр., ц. 26 руб.

<sup>1</sup> «Электричество», № 12, стр. 81—82, 1946.

**Попов В. К.** Электропривод. Пособие для механиков и технологов. Машгиз, 235 стр., ц. 15 руб.

**Правила безопасности при эксплоатации воздушных линий высокого напряжения** (МЭС СССР. Технический отдел). Госэнергоиздат, 80 стр., ц. 5 руб. 25 коп.

**Правила безопасности при эксплоатации электрических устройств городских и сельских сетей.** 5-е издание (МЭС СССР, Технический отдел). Госэнергоиздат, стр. 88, ц. 5 руб. 50 коп.

**Правила пользования электроэнергией в квартирах** (МЭС СССР, Энергосбыт Мосэнерго). Госэнергоиздат, 16 стр., ц. 50 коп.

**Применение электроискрового способа обработки металлов на заводах авиационной промышленности.** МАП СССР, 36 стр., беспл.

**Рабинович А. А.** Новые типы электромашин МЭП. МОНИТОЭ, 17 стр., беспл.

**Радар в СССР.** Официальная история. Советское радио, 63 стр., беспл.

**Рационализаторские предложения** (МЭС СССР, Орграс). Госэнергоиздат. Вып. 3, 44 стр., ц. 2 руб. 50 коп. Вып. 4, 40 стр., 2 руб. 75 коп. Вып. 7, 32 стр., ц. 2 руб. 25 коп.

**Руководство по обслуживанию кабельных сооружений городских телефонных сетей.** Связиздат, 119 стр., беспл.

**Руководство электромеханику и монтеру независимодействующей сигнализации жезловой системы.** 2-е изд. Трансжелдориздат, 212 стр., ц. 4 руб.

**Рыбкин П. А.** Установка опор для линий электропередачи сельской электрификации. Под ред. В. Бессонова. Челябгиз, 62 стр., ц. 1 руб. 40 коп.

**Сабельников Г. М.** Мероприятия по экономии электроэнергии и улучшению косинуса фи. Учет электроэнергии, потребляемой абонентами, не имеющими счетчиков. Изд. 2-е, переработанное, дополненное. Военное издательство, 136 стр., без цены.

**Сахаров П. В.** Новые типы пускорегулирующей аппаратуры. МОНИТОЭ, 19 стр. беспл.

**Сборник работ Института энергетики. Памяти академика В. М. Хрущева.** Изд-во Академии наук УССР, 184 стр., ц. 20 руб.

**Севбо П. и Патон В.** Новые сварочные автоматы Института электросварки. Изд-во Академии наук УССР, 32 стр., ц. 5 руб.

**Слоним Н. М.** Технология ремонта электродвигателей. МОНИТОЭ, 20 стр., беспл.

**Слэтер Дж.** Передача ультракоротких волн. Пер. с англ. под ред. С. Д. Гвоздовер. Гос. техн.-теорет. изд-во, 344 стр., ц. 14 руб. 50 коп.

**Справочник по труду и заработной плате на электростанциях, в сетях и на заводах** Министерства электростанций СССР (МЭС СССР, Отдел труда). Госэнергоиздат, 268 стр., ц. 25 руб.

**Сталь И. О.** Организация производства запасных частей для крупных электромашин. МОНИТОЭ, 14 стр., беспл.

**Сыркин Я. К. и Дяткина М. Е.** Химическая связь и строение молекул. Госхимиздат, 590 стр., ц. 30 руб.

**Сычев С. И.** Руководство по подготовлению и эксплоатации контактных электронагревателей для ускорения склейки авиацеталей из древесных материалов. Под ред. Н. Н. Чулицкого. Оборонгиз, 53 стр., беспл.

**Тайц А. А.** Анализ аварий электромашин. МОНИТОЭ, 26 стр., беспл.

**Тайц А. А.** Методика нормирования удельных расходов электроэнергии (МЭС СССР, Заочный институт усовершенствования ИТР). Госэнергоиздат, 150 стр., подписанное издание.

**Тайц А. А.** Организация электроремонтных работ в промышленных предприятиях. МОНИТОЭ, 26 стр., беспл.

**Тарлинский И. М.** Тарификация электроэнергии и работа энергосбыта на электростанциях и электросетях Главэнерго Министерства коммунального хозяйства УССР. Министерство коммунального хозяйства УССР, 28 стр., без цены.

**Титов Т. А.** Методы и нормы профилактических испытаний электрооборудования. МОНИТОЭ, 23 стр. беспл.

**Трейвас М. Д. и Корчагин Н. А.** Селеновые выпрямители для тяговой подстанции. Трансжелдориздат, 10 стр., беспл.

**Труды Военной электротехнической академии связи им. Буденного.** Вып. 13. Изд. ВЭТКАС, 136 стр., ц. 20 руб.

**Труды Института физики металлов.** Вып. 9. Электрообработка стали. Изд. Уральского филиала Академии наук СССР, 84 стр., ц. 8 руб.

**Хиlobченко Л. С.** Схема электрификации сельского хозяйства Киевской области. Министерство земледелия и Министерство технических культур УССР, 29 стр., без цены.

**Холмский В. Г. и Ходоров С. Я.** Пропускная способность электрических сетей, ее увеличение при помощи регулирования напряжения и мероприятий по улучшению коэффициента мощности. Министерство коммунального хозяйства УССР, 32 стр., без цены.

**Холодовская Р. С.** Современные методы сушки и пропитки электромоторов. МОНИТОЭ, 19 стр., беспл.

**Чечет Ю. С.** Улучшение энергетических показателей электродвигателей при ремонте. МОНИТОЭ, 35 стр., беспл.

**Шпунберг Я. Н.** Экономия электроэнергии при горячей прокатке черных металлов. ВНИТОЭ, 52 стр., ц. 6 руб.

**Щербаков Н. Н.** Испытание электромашин в процессе ремонта. МОНИТОЭ, 18 стр., беспл.

◆ ◆ ◆