

В Е С Т Н И К  
ЭЛЕКТРО-  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ  
1948

Год  
издания  
19-й

# ВЕСТНИК ЭЛЕКТРО- ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ЯНВАРЬ  
1  
1948

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Орган Министерства электропромышленности СССР

Адрес редакции: Москва, Красная пл., ГУМ, III линия, пом. 165 (I этаж), тел. Б.1-19-58

## СОДЕРЖАНИЕ

### Электропривод

С. З. Барский — Асинхронный привод с дроссельным управлением . . . . .	1
Е. Л. Эттингер — О коэффициентах усиления амплитуды в схемах регулирования электропривода . . . . .	13

### Электрические машины и трансформаторы

М. С. Михайлов-Микulinский — К вопросу о размагничивающем действии поперечной реакции якоря в машинах постоянного тока . . . . .	18
Н. С. Сиунов — Анализ характеристик сварочных трансформаторов . . . . .	20

### Электрическая изоляция

Я. Л. Шугал — Способы защиты бумажно-бакелитовых вводов от увлажнения . . . . .	23
---	----



## ЭЛЕКТРОПРИВОД

### Асинхронный привод с дроссельным управлением

Канд. техн. наук С. З. БАРСКИЙ

*Всесоюзный электротехнический институт им. В. И. Ленина*

С появлением дросселя насыщения техника современного электропривода обогатилась новым и весьма совершенным аппаратом, значительно расширяющим возможности автоматического регулирования и увеличивающим эффективность этого процесса.

Свойственные дросселю насыщения: простота устройства, эксплуатационная надежность, легкость изготовления, высокий к. п. д. и большая перегрузочная способность, делают его серьезным конкурентом по отношению к существующим типам машинных и ионных усилителей.

Наконец, возможность непрерывного и плавного регулирования индуктивности дросселя насыщения в большом диапазоне открывает широкие возможности автоматического регулирования и управления непосредственным воздействием на мощные цепи переменного тока.

Благодаря сочетанию перечисленных свойств открываются перспективы применения дросселей насыщения в самых разнообразных областях

техники сильных токов. В качестве областей перспективного применения дросселей насыщения можно назвать: автоматическое регулирование и управление всевозможных процессов, измерительную технику, регулирование процессов в установках с преобразованием электрической энергии в тепловую, защиту, электрический привод и др.

В технике электрического привода создаются широкие возможности применения дросселя насыщения в качестве элемента схем автоматического регулирования и управления, в качестве пускового и реверсирующего устройства, а также для целей ограничения сверхтоков и защиты электрических машин, для регулирования приводных и тормозных характеристик электрических машин.

В настоящей статье рассматриваются лишь основные направления применения дросселей насыщения для целей регулирования и управления электроприводов с асинхронными бесколлекторными двигателями.

**Дроссель насыщения как элемент автомата, зированного электропривода.** Дроссели насыщения, применяемые как электромагнитные усилители в схемах автоматизированного электропривода, могут быть классифицированы по ряду признаков. В конструктивном отношении они различаются как по типу сердечника, так и по способу расположения и соединения обмоток между собой. Наибольшее распространение получили усилители с двумя двухстержневыми сердечниками, однако применяются трехстержневые сердечники и сердечники специальной конструкции (например, четырех- и даже пятистержневые).

По способу соединения обмоток переменного тока следует различать усилители с последовательным, параллельным и смешанным соединением, а также с мостовыми и специальными схемами соединения обмоток.

По способу возбуждения следует различать усилители с одной обмоткой и с многими обмотками возбуждения, алгебраически суммирующими импульсы различных узлов схемы автоматического регулирования.

По роду обратной связи дросселя насыщения усилители могут быть:

с последовательной (по току) обратной связью; с параллельной (по напряжению) обратной связью;

со смешанной (по току и напряжению) обратной связью;

со специальной обратной связью.

На рис. 1, а изображена простейшая схема магнитного усилителя с последовательной обратной связью. В этой схеме катушка  $D$  переменного тока включена последовательно с нагрузкой  $Z$  и регулирует величину нагрузочного тока. Возбуждение дросселя осуществляется двумя катушками  $I$  (тонкого сечения и с большим числом витков) с независимым питанием и сериесной катушкой  $II$ , включенной через купроксный выпрямитель  $K$  в рассечку главной цепи.

Сериесная катушка выполняется обычно большого сечения и с небольшим числом витков. Усилитель с токовой обратной связью может быть выполнен и без дополнительной сериесной обмотки, причем в этом случае обратная связь осуществляется путем использования обмоток переменного тока; такая схема изображена на рис. 1, б. Последовательно с нагрузкой  $Z$  включены два параллельно соединенных между собой дросселя, рассчитанных каждый на половину нагрузки главной цепи.

Обмотки переменного тока дросселей соединены между собой параллельно через купрокс-

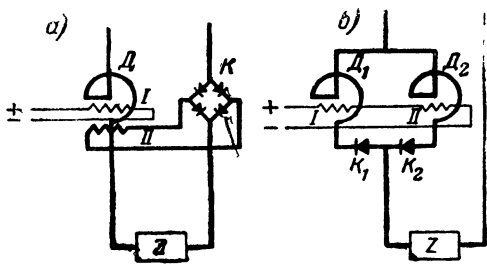


Рис. 1.

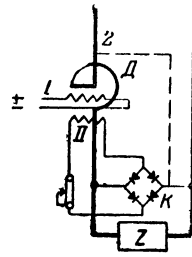


Рис. 2.

ные выпрямители  $K_1$  и  $K_2$ , что обеспечивает образование в каждой из этих катушек м. д. с. неизменного направления, складывающейся с м. д. с. обмотки возбуждения или вычитающейся из нее (в зависимости от того, осуществляется ли соответственно положительная или отрицательная обратная связь).

На рис. 2 изображена схема электромагнитного усилителя с параллельной обратной связью. Как и в предыдущих схемах, нагрузка  $Z$  включена последовательно с рабочей обмоткой дросселя.

Возбуждение осуществляется двумя катушками, из которых одна ( $I$ ) питается от независимого источника, а вторая ( $II$ ) подключена через купроксный выпрямитель параллельно нагрузке. Параллельная обратная связь может быть также осуществлена путем подключения катушки  $II$  обратной связи через купроксный выпрямитель  $K$  к зажимам катушки переменного тока дросселя, как это изображено пунктиром.

Смешанная или специальная обратная связь осуществляется по изложенным выше принципам. Все перечисленные обратные связи могут быть как положительными, так и отрицательными.

При введении в усилитель положительной обратной связи значительно возрастает его коэффициент усиления и снижается порог чувствительности. Одновременно увеличивается ток холостого хода и усилитель становится более чувствительным к колебаниям напряжения и частоты.

Следует иметь в виду, что по мере возрастания коэффициента положительной обратной связи уменьшается устойчивость усилителя. Поэтому предельный коэффициент положительной обратной связи определяется условиями устойчивости работы усилительной схемы.

При введении отрицательной обратной связи условия носят совершенно противоположный характер. Значительно уменьшается коэффициент усиления и одновременно усилитель становится менее чувствительным к колебаниям напряжения и частоты. Кроме того, введение отрицательной обратной связи способствует затуханию колебательных процессов в регулируемой системе, а следовательно, увеличению ее устойчивости. Поэтому подавляющее большинство магнитных усилителей, применяемых в схемах автоматизированного привода, снабжается именно отрицательной обратной связью.

Коэффициент обратной связи электромагнитного усилителя может быть регулируемым в широких пределах путем шунтирования омическим сопротивлением обмотки обратной связи (при последовательной обратной связи) или же включением в эту же обмотку регулируемого сопротивления (параллельная обратная связь).

У современных магнитных усилителей коэффициент усиления лежит в пределах от нескольких десятков до нескольких сот. Каскадные соединения усилителей позволяют осуществить

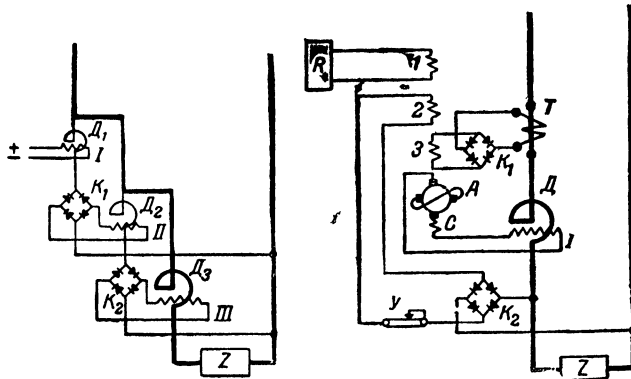


Рис. 3.

Рис. 4.

весьма большие коэффициенты усиления, равные произведениям коэффициентов усилителей, составляющих каскад. Так, при каскаде из трех ступеней можно получить коэффициент усиления порядка  $10^7$ .

На рис. 3 изображена схема трехступенчатого усиления. Мощность входа подается в виде постоянного тока в обмотку возбуждения  $I$  дросселя  $D_1$ , который соединен через купроксный выпрямитель  $K_1$  с обмоткой возбуждения  $II$  дросселя  $D_2$ . В свою очередь катушка переменного тока дросселя  $D_2$  соединена с обмоткой возбуждения  $III$  дросселя  $D_3$ , который и регулирует мощность выхода. При такой схеме соединения дросселей требуемые характеристики усилителя обеспечиваются введением соответствующих внутренних обратных связей.

Каскадное соединение возможно и при равных типах усилителей, например, магнитном и машинном (типа амплидин, рототрол и др.).

Схема соединения в каскад магнитного усилителя с амплидином изображена на рис. 4. Амплидин снабжен четырьмя обмотками возбуждения — обмоткой управления  $I$ ; обмотками обратных связей: по току  $3$  и по напряжению  $2$ , а также компенсационной обмоткой  $C$ . Такая схема может представить интерес в установках, где дроссель является элементом, регулирующим процесс в мощной цепи переменного тока.

Кроме магнитного усиления дроссели насыщения могут выполнять и другие функции, как, например, преобразователей фаз, нелинейных индуктивностей со специальными характеристиками, измерительных элементов в схемах автоматики.

Заслуживает внимания применение дросселя насыщения в качестве трансформатора с регулируемым с помощью постоянного тока коэффициентом трансформации. В конструктивном отношении такой трансформатор отличается от обычного дросселя насыщения лишь тем, что кроме основной (первичной) обмотки переменного тока он снабжен еще вторичной обмоткой с требуемым числом витков. Схема такого трансформатора изображена на рис. 5. Первичная обмотка  $I$  соединяется последовательно с нагрузкой  $Z_1$ , которая в основном и определяет ток в цепи. Регулированием тока в обмотке возбуждения  $B$  трансформатора достигается различная степень насыщения железа, а следовательно, и различная электромагнитная связь между обмотками.

Такой аппарат является, по существу, сериес-трансформатором с регулируемым в широких пределах коэффициентом трансформации.

Обратная связь по току и по напряжению воздействует через регулятор  $R$ .

На рис. 6 изображена потенциометрическая схема с дросселями насыщения для регулирования весьма больших мощностей и напряжений переменного тока. Обмотки переменного тока двух дросселей соединены последовательно между собой и подключены к источнику переменного тока. Выход делается от средней и одной из крайних точек. Регулирование выходного напряжения  $V_2$  создается перераспределением подмагничивающих ампервитков обмоток возбуждения, что осуществляется при помощи маломощного потенциометра  $P$  постоянного тока. По этому же принципу может быть создан потенциометр трехфазного тока.

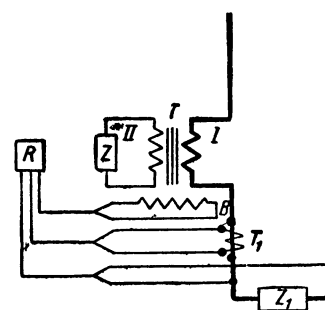


Рис. 5.

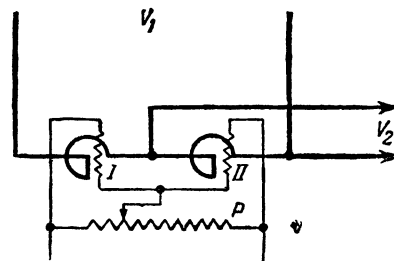


Рис. 6.

**Пусковые и защитные схемы с дросселями насыщения. Регулирование пусковых характеристик.** По сравнению с известными схемами запуска асинхронных машин пусковые схемы с дросселями насыщения обладают рядом существенных преимуществ благодаря своей простоте, надежности и совершенству, а также ряду других свойств, как, например:

1. Непрерывность процесса управления запуском с возможностью автоматического регулирования его; оперирование при пуске ничтожными мощностями постоянного тока.
2. Широкие пределы изменения и регулирования пусковых моментов и токов.
3. Возможность ограничения энергетического режима привода; экономия активной и реактивной энергии при пуске.
4. Частичное или полное исключение релейно-контакторной автоматики.

Указанные преимущества проявляются различно, в зависимости от типа двигателя и характеристики привода в целом.

**Пусковые схемы для асинхронных короткозамкнутых машин.** В простейших схемах запуска, предназначенных для ограничения пусковых

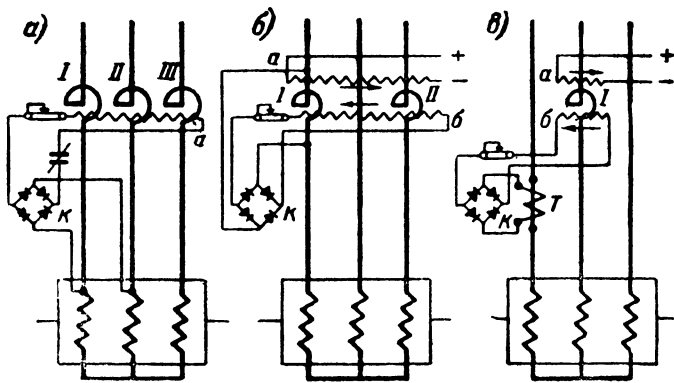


Рис. 7.

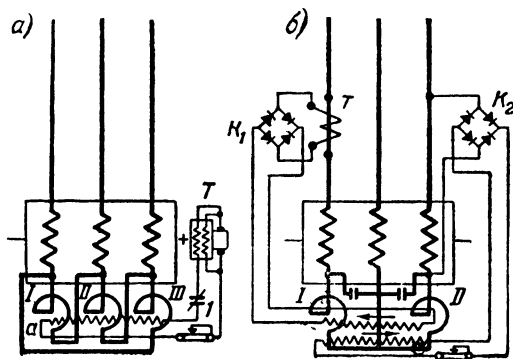


Рис. 8.

токов и моментов или регулирования пусковых характеристик по определенным законам, предусматривается включение дросселей в рассечку статорной цепи (рис. 7 и 8).

В симметричной схеме (рис. 7,а) три одинаковых дросселя включены в статорную цепь и остаются в ней (в насыщенном состоянии) и по окончании периода запуска. Для уменьшения пускового тока вдвое, а начального момента — вчетверо потребная суммарная модельная мощность дросселей при этом составит 10—12% от номинальной мощности двигателя.

Второй вариант симметричной схемы запуска изображен на рис. 8,а. В этой схеме дроссели соединены между собой в треугольник и включены в нулевую точку обмотки статора. При такой схеме включения значительная часть высших гармоник тока (и в особенности третья) замкнется внутри треугольника, минуя обмотки двигателя и сеть. Во всем остальном схема идентична схеме рис. 7,а.

Схема рис. 7,б предусматривает включение двух дросселей в рассечку цепи статора. Такая схема весьма эффективна и экономична; недостатком ее является возникающая при пуске асимметрия токов.

Наконец, схема рис. 7,в с одним пусковым дросселем является наиболее простой, хотя и разрешает задачу только частично. В рассмотренных схемах потребная модельная мощность пускового дросселя определяется схемой включения его и условиями регулирования пускового режима привода.

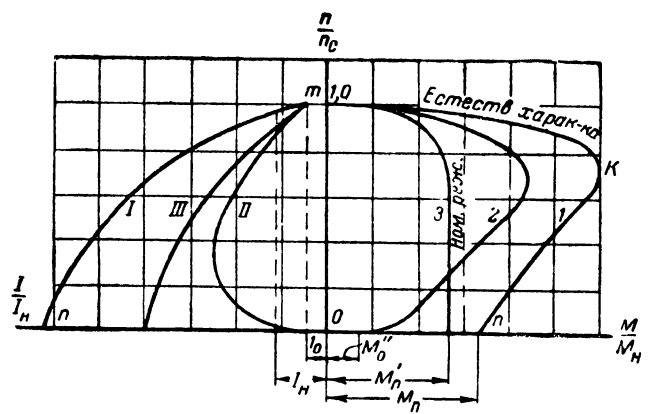


Рис. 9.

Дальнейшее уменьшение потребной модельной мощности пусковых дросселей может быть достигнуто шунтированием их при помощи контакторов, по окончании пускового режима. Такая схема изображена на рис. 8,б.

Потребная суммарная модельная мощность дросселей по этой схеме уже составит 5—6% от номинальной мощности двигателя. Габаритные размеры пусковых дросселей в схемах с шунтированием могут быть еще уменьшены путем погружения дросселей в масло.

Мощность постоянного тока, потребная для намагничения дросселя до полного насыщения, составляет для рассмотренных пусковых схем 0,1—0,3% от номинальной мощности двигателя.

Регулирование тока возбуждения дросселя в период запуска должно производиться преимущественно автоматически. При этом динамика процесса регулирования должна быть подчинена требованиям электромеханического и энергетического характера.

На рис. 9 приведены типовые характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя с глубоким пазом (кривые I, II). Этот же двигатель, запускаемый при помощи дросселей насыщения (схемы рис. 7 и 8) с автоматическим регулированием тока возбуждения, может приобрести механическую характеристику с постоянным пусковым моментом  $M_n$  (кривая 3) и токовую согласно кривой III. Такие характеристики желательны в приводах, где необходимо обеспечить неизменное пусковое усилие и ускорение. Наконец, соответствующим регулированием тока возбуждения дросселя можно получить механическую характеристику (кривая 2) с малым начальным моментом,  $M''_0$ , плавно нарастающим, как это бывает желательно для некоторых приводов.

Практически в пределах площади, ограниченной естественной механической характеристикой I и координатными осями, можно получить любой формы искусственную механическую характеристику двигателя путем соответствующего регулирования тока возбуждения пусковых дросселей.

При выборе параметров и схем автоматического регулирования тока возбуждения дросселей необходимо учитывать электромеханическую постоянную времени привода, закономерность

изменения статического момента и маховых масс привода и электромагнитную постоянную времени обмоток возбуждения дросселей.

Простейшая схема подмагничивания дросселей в функции от напряжения на зажимах статора двигателя изображена на рис. 7,а. По этой схеме обмотка возбуждения дросселей подключается через купроксный выпрямитель  $K$  к двум фазам двигателя. Ток возбуждения возрастает со скоростью вращения привода, причем при полной скорости имеет место полное насыщение дросселей.

На рис. 7,б показана вторая схема запуска по напряжению; согласно этой схеме дроссели снабжены двумя системами обмоток возбуждения — одной, питаемой от постороннего источника постоянного тока, а второй, подключенной через купроксный выпрямитель  $K$  к зажимам пускового дросселя.

Схема запуска по току изображена на рис. 7,в. Согласно этому принципу пусковой дроссель имеет две обмотки возбуждения — одну с неизменными ампервитками, питающуюся от независимого источника постоянного тока, и вторую, включенную навстречу первой и питающуюся через купроксный выпрямитель  $K$  от трансформатора тока  $T$ . Параметры схемы выбираются такими, чтобы в начале запуска ампервитки обеих обмоток возбуждения уравнивались, а по мере разгона их разность увеличивалась.

Схема пуска по току и напряжению приведена на рис. 8,б; она является сочетанием двух ранее рассмотренных принципов. Наконец, схема запуска по скорости приведена на рис. 8,а и отличается тем, что обмотка возбуждения дросселя питается от тахогенератора  $T$ , сидящего на одном валу с двигателем.

Требуемая динамика возбуждения дросселей обеспечивается соответствующим подбором параметров последовательной и параллельной обмоток возбуждения тахогенератора  $T$ .

Возможно осуществить различного рода пусковые схемы, основанные и на других принципах регулирования процесса возбуждения пусковых дросселей.

**Пусковые схемы для асинхронных машин с фазными роторами.** В такого рода схемах дроссели насыщения могут применяться лишь для решения специальных задач, некоторые из них рассматриваются ниже.

На рис. 10,б изображена пусковая схема для получения весьма ограниченного начального момента с плавным дальнейшим нарастанием. С этой целью в роторную цепь последовательно с основным пусковым сопротивлением включаются три дросселя, соединенных между собой в звезду. В начале пуска посредством командоаппарата  $K$  постепенно увеличивают ток возбуждения дросселей, чем и регулируется начальный момент от значения  $M_0$  при токе возбуждения, равном нулю, до значения  $M'_0$ , соответствующего полному насыщению дросселей; далее пуск протекает обычным образом, путем выключения отдельных ступеней пускового сопротивления, как это изображено графически на рис. 11. Такой способ уменьшения начального

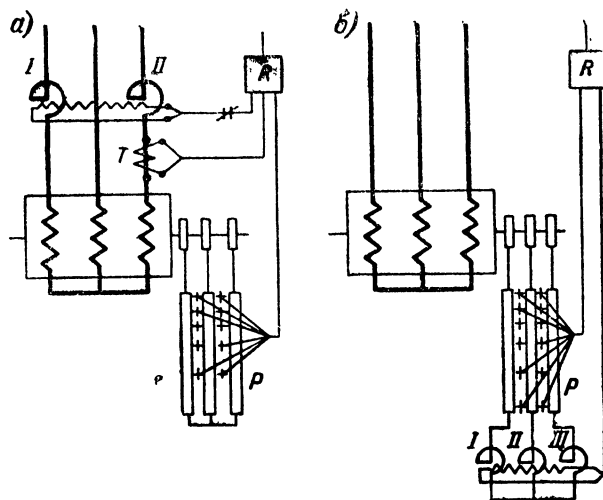


Рис. 10.

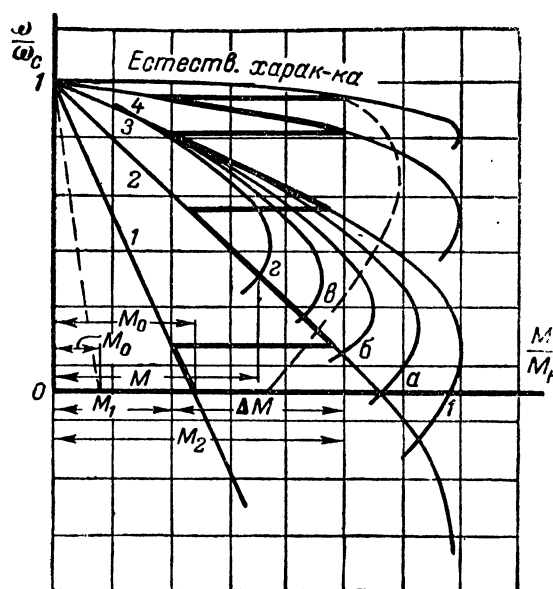


Рис. 11.

момента весьма эффективен, так как с введением индуктивности в роторную цепь имеет место одновременное уменьшение тока  $I_2$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi_2$ , а момент вращения пропорционален произведению этих величин.

Такая схема значительно экономичнее и совершеннее обычной, требующей большого числа ящиков сопротивлений и контакторов. Кроме того, достоинством рассмотренной схемы является плавность и бесступенчатость нарастания начального момента.

В зависимости от условий регулирования начального момента и частоты включений модельная мощность пусковых дросселей может составить от 5 до 12% от номинальной мощности двигателя.

На рис. 10,а изображена схема запуска асинхронного двигателя с активным сопротивлением и контакторным управлением в роторной цепи, обеспечивающей постоянство пускового момента и тока. Сглаживание толчков, обычно имеющих место при переключении активных сопротивле-

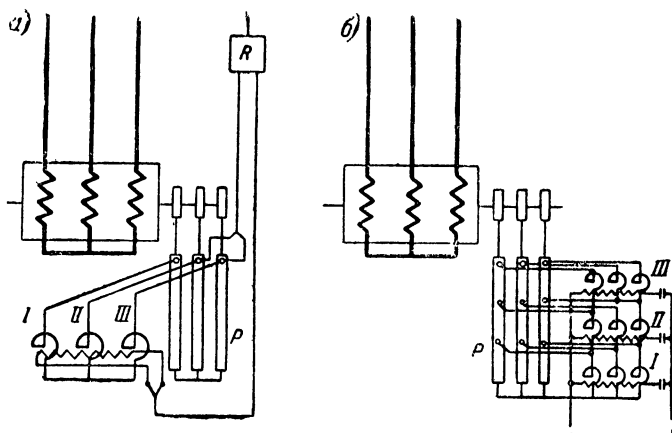


Рис. 12.

ний, осуществляется небольшими дросселями насыщения, включенными в статорную цепь. На каждой ступени одновременно с включением очередной ступени активного сопротивления снижается ток возбуждения дросселей, а ватем медленно повышается по мере разгона привода.

Рис. 11 иллюстрирует этот способ запуска. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют нормальному контакторному запуску с среднепусковым моментом  $M_{cp}$  и моментом переключения  $M_2$ . Запуск по рассмотренной схеме с помощью дросселей обеспечивает получение ряда промежуточных механических характеристик между соседними ступенями, чем и обеспечивается постоянство пускового момента и тока. На рис. 11 показаны промежуточные характеристики *a, б, в, г* между ступенями 2 и 3, обусловленные наличием пускового дросселя. Управление контакторами и током возбуждения дросселей производится аппаратом  $\kappa$ , действующим вручную или автоматически.

Значительный интерес представляет схема бесконтакторного запуска асинхронной машины с активным и реактивным сопротивлениями в роторной цепи (рис. 12,а). По мере разгона привода увеличивается ток возбуждения дросселей и к концу запуска дроссели оказываются полностью насыщенными, шунтируя активное пусковое сопротивление  $P$ . Такая схема запуска дает примерно тот же эффект, что и схема Бушера. Автоматическое подмагничивание дросселей осуществляется аппаратом  $\kappa$ . Механическая характеристика такого привода изображена на рис. 11 пунктиром. В схеме рис. 12,б дроссели насыщения выполняют роль контакторов, шунтируя ступени сопротивления пускового реостата. Управление запуском может быть сосредоточено в командо-аппарате или в каком-нибудь автоматическом устройстве, обеспечивающем очередность подачи постоянного тока в обмотки возбуждения дросселей.

Такая схема запуска представляет значительный интерес для приводов подземных лебедок, в которых по причинам верьвоопасности применение контакторов недопустимо.

В большинстве рассмотренных пусковых схем дроссели насыщения могут выполнять также защитные функции. При этом защита осуществляется быстрым гашением поля постоянно-

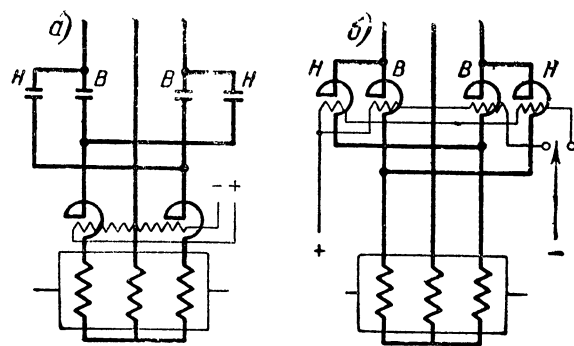


Рис. 13.

го тока дросселя; с этой целью предусмотрены, например, нормально замкнутые контакты в цепях возбуждения дросселей, в схемах рис. 7, 8 и 10.

**Схемы реверсирования.** Реверсирование асинхронных приводов относится к категории наиболее тяжелых операций, выполняемых электродвигателями и коммутационной аппаратурой. Режим реверса многих приводов оказывается настолько частым и тяжелым, что даже специальные машины и коммутационные аппараты, применяемые для этой цели, работают неудовлетворительно, в особенности при изменении нагрузки и маховых масс в широких пределах.

Возникающие при реверсировании явления термического и электродинамического характера сопровождаются одновременно значительными коммутационными перенапряжениями, как следствие коммутирования значительных токов, преимущественно реактивного характера.

Применение различных схем реверсирования, содержащих дроссели насыщения или комбинации их со стандартными аппаратами, может намного облегчить режим реверсирования приводов.

На рис. 13,а изображена комбинированная схема реверсирования с двумя дросселями насыщения и с двумя реверсирующими контакторами. В стационарном режиме оба дросселя насыщены посредством тока, от постороннего источника. В начале периода реверсирования ток возбуждения дросселей быстро отключается, что вызывает значительное увеличение индуктивности дросселей и резкое падение тока в двигателе. В этом режиме и производится переключение реверсирующих контакторов, после чего вновь замыкается цепь подмагничивания дросселей; на этом режим реверса заканчивается.

В такой схеме реверсирование происходит без тока в обмотках двигателя, что позволяет применять нормальные контакторы вместо более дорогих аппаратов с искрогашением.

В схеме рис. 13,б все операции реверсирования производятся одними дросселями насыщения, без разрыва тока. При отсутствии постоянного тока в обмотках возбуждения дросселей ( $B-B$  и  $H-H$ ) двигатель обесточен. Пуск вперед или назад осуществляется подачей постоянного тока в соответствующую обмотку возбуждения.

Цепи возбуждения должны быть при этом так сблокированы, чтобы исключить возможность од-

новременного подмагничивания обеих систем дросселей.

Приведенные схемы реверсирования (рис. 13) представляют практический интерес для подъемных машин, лебедок, экскаваторов, и особенно для подземных лебедок, где применение нормальных аппаратов недопустимо по условиям взрывобезопасности.

Заслуживает внимания схема реверсирования (рис. 14, а), включающая дроссель насыщения, реактор и активное сопротивление. Реактор *A* и активное сопротивление *C* служат для такого искажения звезды напряжений, при котором меняется порядок чередования фаз и происходит реверсирование двигателя. Параметры реактора *A* и активного сопротивления *C* выбираются такими, чтобы падения напряжения в них были одинаковыми, как это показано на векторной диаграмме рис. 14, б (вверху).

При отсутствии тока возбуждения реактивное сопротивление дросселя насыщения столь велико, что поглощает почти полностью напряжение фазы *C*<sub>3</sub>; при этом двигатель работает как однофазный.

Если в этом режиме соединить фазу *C*<sub>3</sub> с средней точкой *m* активного сопротивления *C* и реактора *A*, то звезда напряжений исказится, как это показано на рис. 14, б (внизу), изменяется порядок чередования фаз и двигатель реверсируется.

При подаче тока возбуждения в дроссель насыщения *B* потенциал фазы *C*<sub>3</sub> начинает восстанавливаться; по мере уменьшения индуктивности дросселя насыщения, точка *C*<sub>3</sub> перемещается вправо, звезда напряжений восстанавливается в своем первоначальном виде и двигатель вновь реверсируется.

Эта схема представляет практический интерес для крановых двигателей, так как обеспечивает, кроме того, возможность получения специальных приводных и тормозных характеристик.

В заключение укажем на возможность создания мостовых реверсивных схем. В одной из таких схем (рис. 14 в), предназначенной для реверсирования двухфазных машин, фаза *I* подключается к двум фазам сети; фаза *II* включается диагонально в мост Уитстона, образуемый из четырех дросселей насыщения (*A*, *B*, *A*<sub>1</sub> и *B*<sub>1</sub>). Питание обмоток возбуждения дросселей осуществляется от потенциометра. При передвижении движка потенциометра вверх (от *a* к *б*) вектор напряжения фазы *II* постепенно поворачивается; в крайнем положении движка вектор напряжения фазы *II* поворачивается на 90° и двигатель реверсируется. По этому же принципу могут быть созданы схемы реверсирования трехфазных машин.

**Регулирование скоростных характеристик.** При неизменном моменте сопротивления на ва-

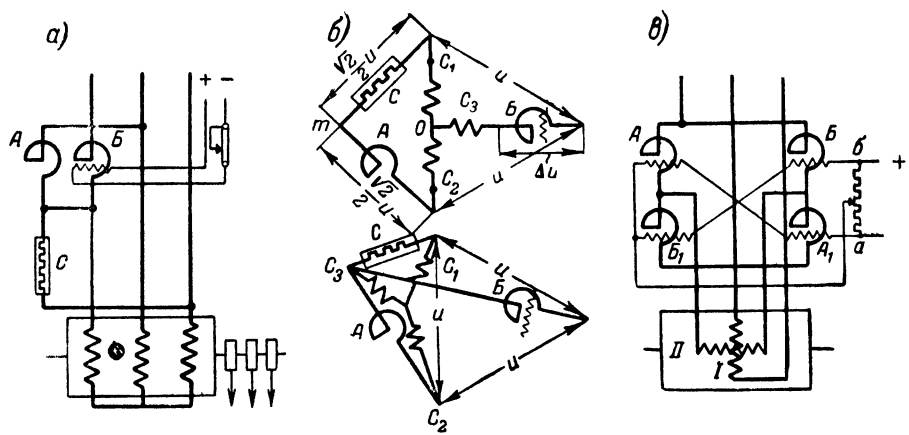


Рис. 14.

лу короткозамкнутого асинхронного двигателя скорость вращения последнего, регулируемая вручную путем изменения тока возбуждения последовательно соединенных с ним дросселей, может изменяться лишь в незначительных пределах, ограничиваемых условиями устойчивости привода и нагрева обмоток двигателя. Так, при неизменных значениях момента сопротивления в пределах от 40 до 100% от номинального и номинальном скольжении двигателя порядка 0,03 ручное управление может обеспечить регулирование скорости двигателя лишь в пределах  $6 \div 8\%$  от синхронной.

Пределы ручного регулирования скорости вращения короткозамкнутых асинхронных машин при помощи дросселей насыщения расширяются с увеличением номинального скольжения; так, для двигателя повышенного скольжения ( $S_n = 0,10 \div 0,12$ ) скорость вращения может регулироваться при указанных выше условиях в пределах  $12 \div 20\%$  от синхронной.

Наконец, для двигателей с фазными роторами, при наличии неизменного сопротивления в роторной цепи, при ручном регулировании дросселей насыщения, пределы регулирования скорости могут составить 20—30% от синхронной.

На рис. 15 показано графическое построение для определения пределов устойчивого ручного регулирования скорости вращения  $\Delta\omega$  при заданном моменте сопротивления  $M_1$  на валу двигателя.

Как уже указывалось, изложенные соображения справедливы лишь при неизменном моменте сопротивления на валу двигателя. Пределы ручного регулирования скорости вращения при помощи дросселей насыщения могут значительно расширяться, если такое регулирование сопровождается одновременно надлежащим уменьшением момента сопротивления приводного механизма.

Если при этом на всем диапазоне регулирования момент сопротивления приводного механизма падает скорее, чем момент вращения двигателя, то устойчивые режимы работы при ручном регулировании возможны даже на неустойчивой части механической характеристики двигателя. К категории таких механизмов относятся машины с вентиляторной характеристикой и,



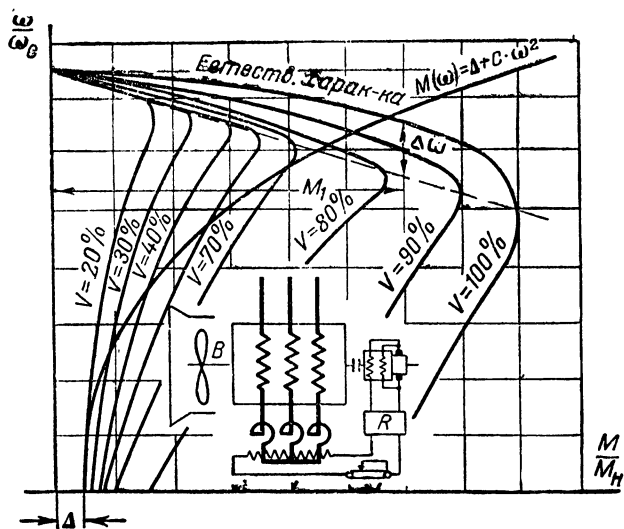


Рис. 15.

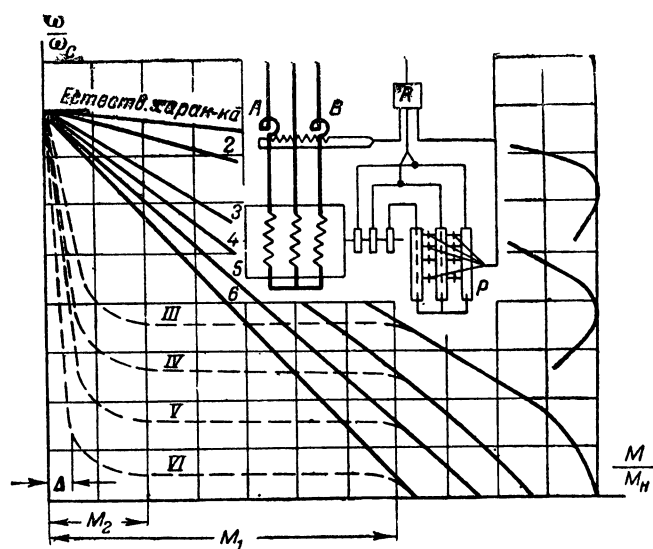


Рис. 17.

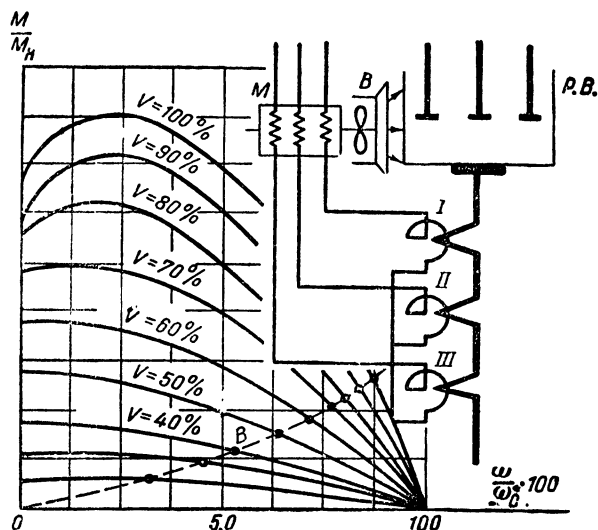


Рис. 16.

в частности, вентиляторы, воздуходувки, эксгаустеры электростанции и испытательные стенды.

На рис. 15 изображены: типовая естественная и семейство искусственных характеристик короткозамкнутого асинхронного двигателя, регулируемого вручную с помощью дросселей насыщения. На этом же рисунке представлена характеристика изменения статического момента вентилятора со скоростью. Сочетание этих характеристик обеспечивает устойчивое глубокое регулирование скорости. На рис. 15 показана также схема включения обмоток дросселей и цепей управления приводом.

Следует указать, что глубокое регулирование асинхронного привода с вентиляторной нагрузкой обеспечивает также благоприятный характер изменения греющих потерь и нагрева двигателя.

В качестве другого примера может служить привод вентилятора системы охлаждения металлического ртутного выпрямителя. Как известно, для выпрямителя требуется строгое соблюдение температурного режима; одновременно с изменением нагрузки и греющих потерь должно соответственно изменяться количество охлаждаю-

щего воздуха. С этой целью приводный асинхронный двигатель вентилятора охлаждения включается последовательно стремя (или двумя) дросселями насыщения, причем подмагничивание дросселей осуществляется рабочим током выпрямителя (рис. 16). В такой схеме отпадает необходимость в нормальных обмотках возбуждения дросселей, а процесс регулирования скорости вращения в зависимости от нагрузки происходит автоматически.

При регулировании тока возбуждения дросселей при посредстве автоматических регуляторов возможно устойчивое глубокое регулирование скорости асинхронных машин независимо от характеристики нагрузки. Такие схемы были рассмотрены ранее применительно к пуску короткозамкнутых двигателей.

Принципиальные схемы (рис. 7 и 8) запуска двигателей с некоторыми изменениями пригодны и для целей регулирования скорости. Такие способы регулирования скорости вращения короткозамкнутых асинхронных машин могут иметь, однако, ограниченное применение, поскольку такое регулирование сопровождается значительными потерями в обмотках двигателя.

Совершенно иначе обстоит дело с регулированием скоростных характеристик асинхронных машин с фазными роторами посредством дросселей насыщения. При этом могут быть разрешены различные задачи получения специальных характеристик, например, серийных, экскаваторных или жестких.

Для ряда асинхронных регулируемых приводов весьма важно получение устойчивых скоростей в широком диапазоне изменения нагрузки и при различных ступенях неизменного активного сопротивления в роторной цепи. Ручное управление активным сопротивлением или даже дросселями не дает желаемого эффекта. При автоматическом регулировании тока возбуждения дросселей возможно получение таких характеристик. Принципиальная схема такого регулирования и получаемые при этом характеристики (III, IV, V и VI) представлены на рис. 17.

В схему входят два дросселя, последовательно включенных в две фазы статора регулируемого двигателя, пускового устройства в роторной цепи и регулятора скорости.

Переключение контакторов пусковых сопротивлений производится вручную, а поддержание устойчивой скорости на каждой ступени осуществляется автоматическим регулятором  $R$  регулирующим ток возбуждения дросселей. Получаемые при этом характеристики привода будут в широком диапазоне изменения нагрузки идентичны с характеристиками привода Леонарда. Такой привод представляет практический интерес для установок, в которых нагрузка может изменяться в широких пределах и в которых по условиям работы или безопасности необходимо получить устойчивое регулирование скорости. Такие характеристики, как известно, до сих пор обеспечивались только в системе Леонарда. Практическое применение асинхронных приводов с автоматическим дроссельным регулированием представляет интерес для шахтных подъемных машин, лебедок, экскаваторов и других механизмов.

Заслуживают внимания асимметричные схемы с дросселями насыщения для регулирования скоростных характеристик асинхронных машин. Сильноточные цепи в таких схемах соединяются согласно рис. 14, а. Регулирование скоростных характеристик достигается изменением степени искажения звезды напряжений на зажимах двигателя, осуществляемым автоматическим подмагничиванием дросселя. Момент вращения двигателя определяется как разность двух моментов, создаваемых полями прямой и обратной последовательности. Скоростные двигательные характеристики при таком способе регулирования изображены для схемы рис. 14, а кривыми 1, 2, 3, 4, 5, 6 на рис. 18, причем характеристики I, II и III соответствуют сильной степени искажения звезды напряжения на зажимах двигателя.

Из числа других принципов регулирования скорости асинхронных машин заслуживают внимания схемы циклического включения. В ряде приводов осуществляются многократное и частое включение и отключение двигателя с целью поддержания спелней скорости вблизи заданного значения. Циклическое регулирование получило некоторое применение в схемах с контакторным управлением, причем указанный режим работы двигателя выполняется под воздействием реле. Весьма тяжелые условия аппаратуры управления в этих режимах заставляют отказываться от подобного способа регулирования характеристик двигателя. При циклическом включении посредством дросселей насыщения указанные недостатки отпадают. Примерная схема такого включения изображена на рис. 19, а. Циклическое питание обмоток возбуждения дросселей осуществляется автоматическим регулятором, имеющим соответствующие измерительные элементы (например, скорости). Схемы циклического регулирования скорости двигателей при помощи дросселей насыщения могут быть также осуществлены без отключения двигателя от сети; желаемая характеристика может быть достигнута

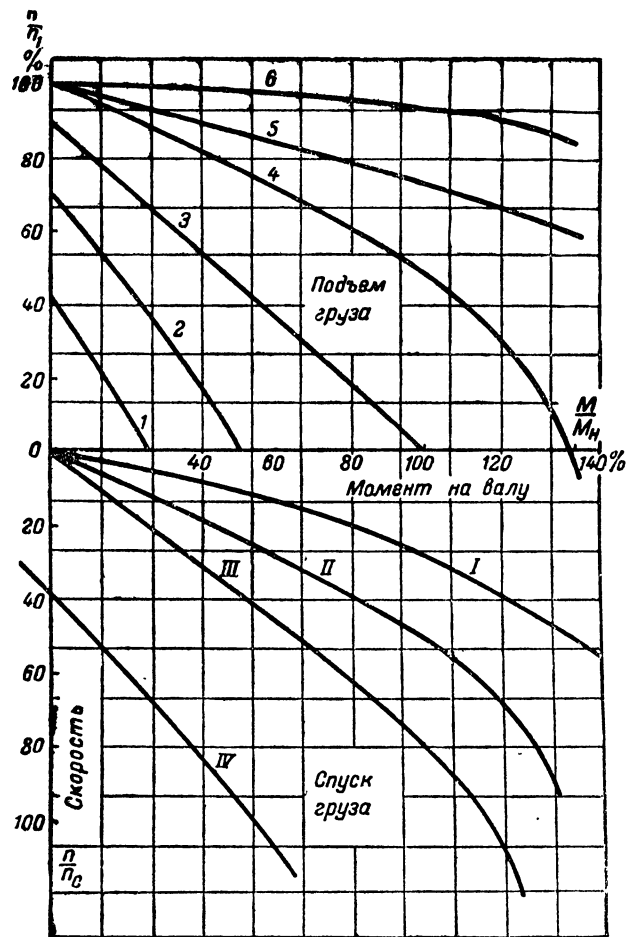


Рис. 18.

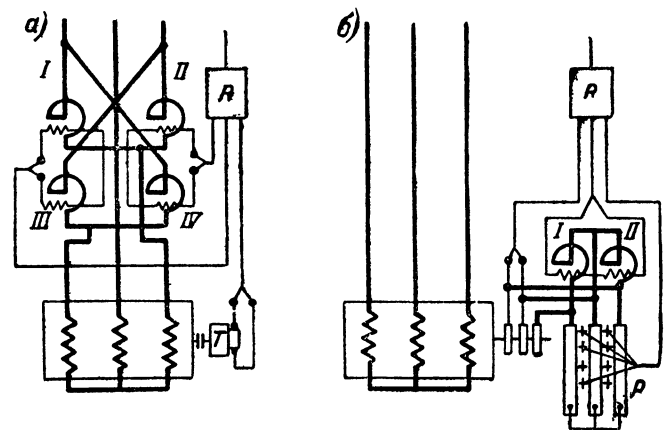


Рис. 19.

циклическим включением реостата роторной цепи или одной лишь его ступени, как это показано на рис. 19, б.

**Компаундирование асинхронных машин.** Задача компаундирования асинхронного привода сводится к установлению такого режима, при котором двигатель был бы в состоянии преодолевать периодически возникающие значительные перегрузки, а в паузах работал бы с возможно меньшими потерями активной и реактивной энергии. Мы ограничимся рассмотрением двух принципов компаундирования:

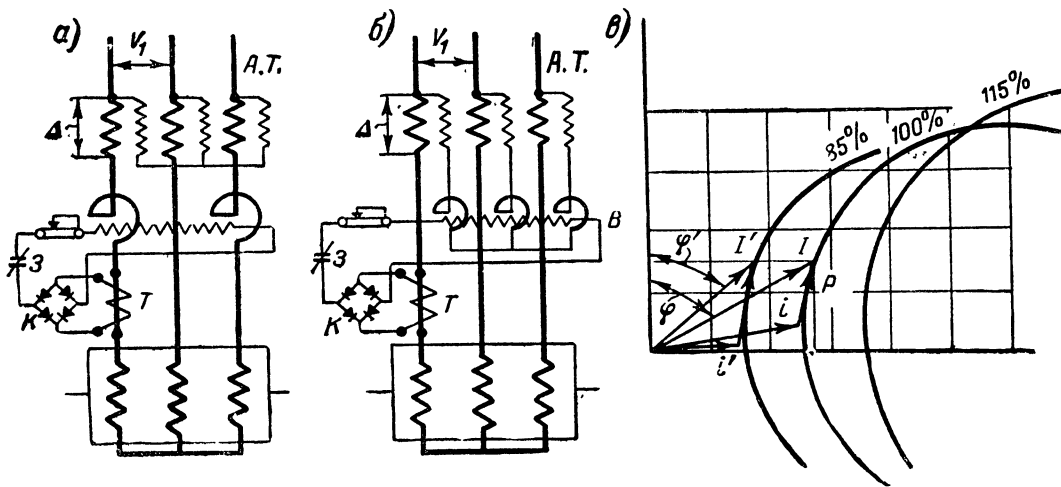


Рис. 20.

- 1) автоматического изменения напряжения на зажимах двигателя при изменении нагрузки;
- 2) регулирования скольжения двигателя с целью использования энергии маховых масс привода.

Схема компаундирования по току путем регулирования при посредстве дросселей, напряжения на зажимах двигателя показана на рис. 20, а. Словыми элементами схемы являются приводной двигатель, который может быть с фазным или короткозамкнутым ротором, добавочный автотрансформатор и автоматически регулируемые дроссели насыщения. Питание возбуждения дросселей насыщения осуществляется от трансформатора тока  $T$  через купроксный выпрямитель  $K$ .

Параметры силовых цепей и схемы регулирования должны быть выбраны такими, чтобы при нагрузке, близкой к номинальной, потеря напряжения в дросселях компенсировалась напряжением автотрансформатора; таким образом, при номинальной нагрузке на зажимах двигателя имеет место номинальное напряжение. При перегрузках автоматически увеличивается ток возбуждения дросселей, уменьшается их индуктивность, отчего увеличивается напряжение и перегрузочная способность двигателя. При холостом ходе или малых нагрузках потеря напряжения в дросселе уже превышает напряжение автотрансформатора, а напряжение на зажимах двигателя оказывается меньше номинального, отчего значительно снижаются ток холостого хода и потери в двигателе.

На рис. 20, б представлена более совершенная схема компаундирования асинхронного двигателя, в которой автоматически регулируемые дроссели включены в первичную цепь автотрансформатора. Эта схема обеспечивает более широкие пределы компаундирования. Векторная диаграмма компаундирования показана на рис. 20, в. Диаграмма соответствует режиму работы привода с нагрузкой  $P$  порядка 40—60% от номинальной, при напряжении на зажимах двигателя 100 и 85% от номинального. Понижение напряжения вызывает уменьшение активных потерь и особенно сильно уменьшает реактивный ток холо-

стого хода. Коэффициент мощности двигателя и к. п. д. увеличиваются. На этом же рисунке нанесена круговая диаграмма, соответствующая напряжению 115% от номинального, что имеет место при пиках нагрузки.

Ниже рассматривается еще один пример компаундирования применительно к схемам автоматизации подачи. Такие приводы состоят из двух или нескольких машин — одного главного исполнительного двигателя (например, режущего) и одного или нескольких подающих сырья. Нагрузка главного (режущего) двигателя обычно обуславливается твердостью материала и скоростью его подачи. К такого рода приводам могут быть отнесены врубовые машины для угля, проходческие комбайны, пилы по резке металла и др.

Нормальный режим работы режущего двигателя и наиболее эффективная работа агрегата в целом достигаются в том случае, если между скоростью подачи и твердостью, формой и состоянием материала соблюдена определенная связь. Принципиальная схема автоматизации подачи врубовой машины изображена на рис. 21. На этой схеме ГД — режущий, а ПД — подающий двигатель, напряжение и скорость которого регулируются дросселями насыщения. Дроссели возбуждаются двумя обмотками: —  $I$  — с неизменными ампервитками и  $II$  — с ампервитками, пропорциональными току режущего двигателя. Ампервитки обеих обмоток направлены противоположно; результирующие ампервитки определяют индуктивность дросселей, скорость подающего и нагрузку режущего двигателей. Температурный детектор  $D$ , заложенный в обмотки статора режущего двигателя, вводит поправки в скорость подачи, в зависимости от температуры обмоток режущего двигателя.

К числу достоинств этой схемы относится отсутствие контактов и искрящих частей. Дроссели насыщения могут быть эффективно применены для целей компаундирования асинхронных приводов со значительными маховыми массами.

На рис. 22 представлена схема асинхронного двигателя с маховиком и жидкостным регулятором скольжения  $M$ . В отличие от известной схе-

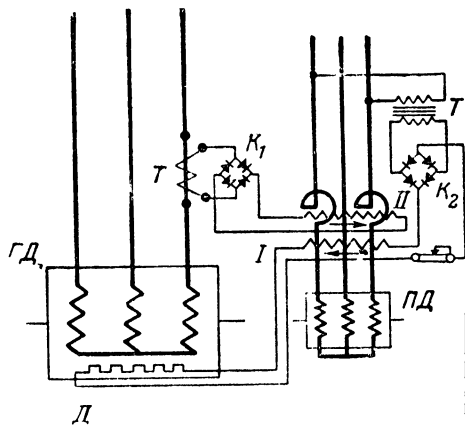


Рис. 21.

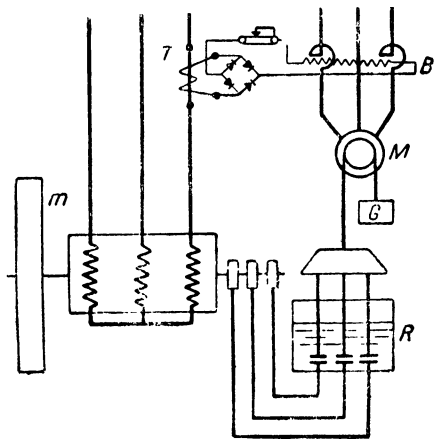


Рис. 22.

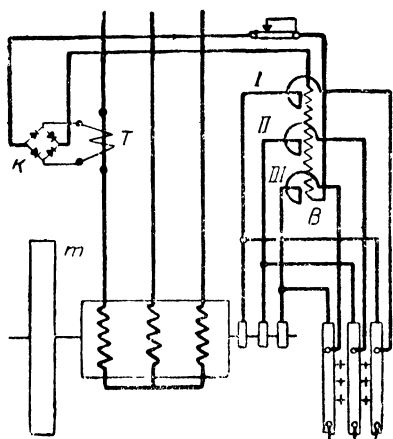


Рис. 23.

мы Ильгнера регулятор скольжения регулируется при посредстве дросселей насыщения, включенных в цепь его статора. Подмагничивание дросселей осуществляется током, пропорциональным току главного двигателя, что достигается питанием обмотки возбуждения от трансформатора тока через купроксный выпрямитель.

По сравнению с известной схемой Ильгнера схема с дросселями может обеспечить более совершенное регулирование. Жидкостный реостат и регулятор скольжения могут быть вовсе исклю-

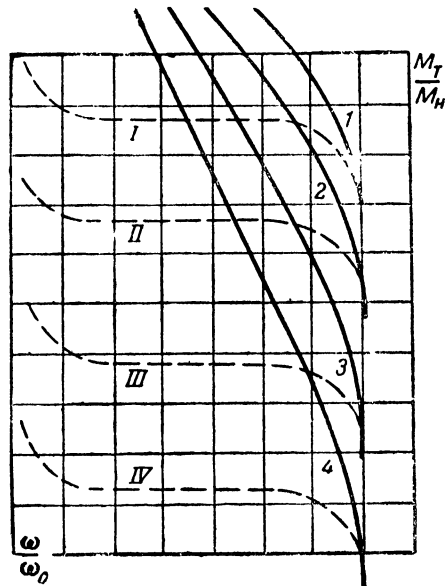


Рис. 24.

чены. Регулирование характеристик в этом случае достигается дросселями насыщения, шунтирующими по мере необходимости одну ступень металлического роторного сопротивления. Такая схема показана на рис. 23. Ток возбуждения дросселей подается через купроксный выпрямитель  $K$  от трансформатора тока  $T$  в цепи главного двигателя и автоматически регулируется с нагрузкой.

**Схемы торможения.** Тормозные схемы с дросселями насыщения делятся на три группы: трехфазные симметричные, трехфазные несимметричные, однофазные. К трехфазным симметричным схемам могут быть отнесены все схемы, в которых требуемые тормозные характеристики обеспечиваются симметричным трехфазным напряжением, автоматически регулируемым при посредстве дросселей. Подобные схемы мало отличаются от уже ранее рассмотренных (рис. 15, 17) для целей регулирования приводных характеристик двигателей. Закон намагничивания дросселей определяется формой тормозных характеристик, которые желательно получить.

Практический интерес представляют жесткие тормозные характеристики, в которых скорость привода мало зависит от тормозного усилия. Такие характеристики изображены графически на рис. 24 для трехфазного асинхронного двигателя с различными сопротивлениями в роторной цепи. Характеристики 1, 2, 3, 4 соответствуют режимам нормального противовключения; введение в схему автоматически регулируемых (по схеме рис. 17) дросселей дает возможность на тех же ступенях соответственно получить твердые характеристики I, II, III, IV. Трехфазные асимметричные схемы и как частный их случай однофазная схема торможения с дросселями насыщения нашли себе применение в крановых и экскаваторных приводах.

Выше уже рассмотрены асимметричные схемы применительно к регулированию скоростных характеристик и к реверсированию. В асимметричной схеме (рис. 14,а) с одним дросселем насыщения в цепи статора при спуске груза и в

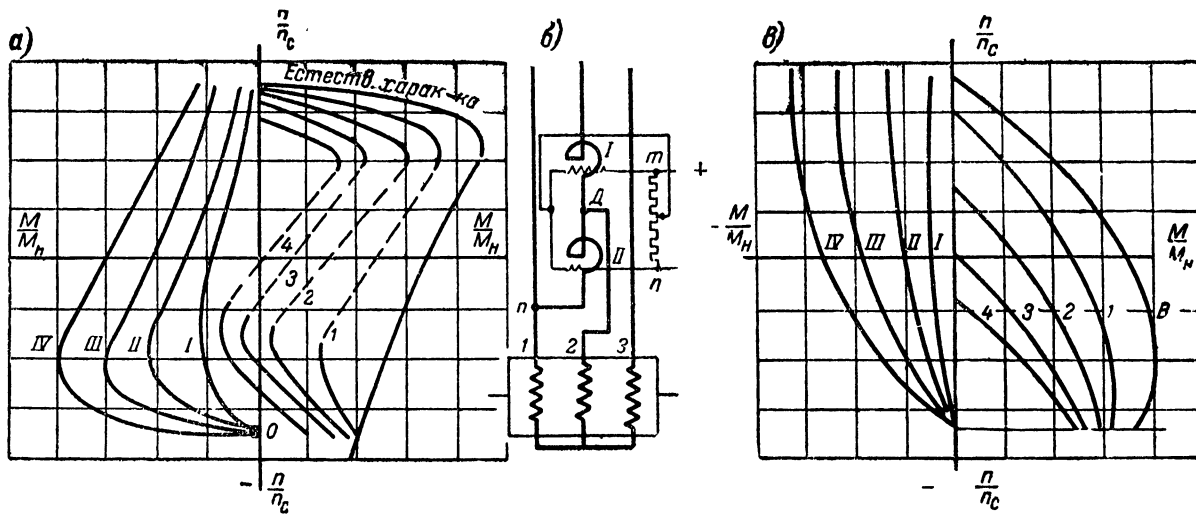


Рис. 25.

других режимах торможения статорная обмотка включается в сторону подъема. При малых скоростях и небольших нагрузках индуктивность дросселя весьма велика и механические характеристики привода близки к характеристикам однофазного торможения. По мере увеличения скорости и нагрузки индуктивность дросселя уменьшается и симметрия напряжений на зажимах статора постепенно восстанавливается. Тормозные усилия двигателя увеличиваются и его характеристики будут близки к нормальной схеме противовключения, как это показано на рис. 18. Существенным достоинством этой схемы торможения является снижение потерь в статоре. Регулирование степени асимметрии в подобных схемах производится автоматически, путем возбуждения дросселя насыщения от специальных усилительных контуров.

Из других тормозных схем заслуживает внимания асимметричная схема с двумя регулируемы вручную дросселями (рис. 25,б). Различная степень асимметрии напряжений в такой схеме достигается перераспределением наделения напряжений между двумя последовательно соединенными дросселями насыщения (I и II). Это осуществляется при помощи маломощного потенциометра, перераспределяющего подмагничивающие ампервитки в обмотках возбуждения дросселей. В верхнем положении движка потенциометра дроссель II полностью насыщен, что экви-

валентно подключению двух фаз статора (1 и 2) к одному и тому же питающему проводу. Наоборот, в нижнем положении движка потенциометра индуктивность дросселя II будет велика, а дросселя I — очень мала.

Механические характеристики для каждой степени асимметрии определяются полями прямой и обратной последовательности.

На рис. 25,а показаны характеристики (I, II, III, IV), создаваемые магнитными полями обратной последовательности при различных степенях асимметрии, а также результирующие механические характеристики привода (1, 2, 3, 4). Характеристики построены для двигателя с короткозамкнутым ротором. На рис. 25,в изображены аналогичные механические характеристики (I, II, III и IV) и (1, 2, 3 и 4) для асинхронного привода с фазным ротором. Для практических целей представляет интерес именно этот вариант схемы.

Следует указать, что такие способы торможения уже находят применение, причем асимметрия напряжений создается и регулируется при посредстве специальных ступенчатых автотрансформаторов.

Из других тормозных схем заслуживают внимания симметричные и асимметричные с циклическим включением, уже рассматривавшиеся в разделе регулирования скоростных характеристик приводов.

# О коэффициентах усиления амплитуды в схемах регулирования электропривода

Канд. техн. наук Е. Л. ЭТТИНГЕР

Всесоюзный электротехнический институт им. В. И. Ленина

В данной статье рассматривается вопрос о коэффициентах усиления амплитуды.

Каждый генератор постоянного тока преобразовывает механическую энергию первичного двигателя в электрическую. При постоянной скорости вращения первичного двигателя управление напряжением и отдаваемой мощностью генератора производится воздействием на цепь возбуждения машины, мощность которой значительно меньше. Таким образом, генератор постоянного тока может рассматриваться как усилитель, в котором входной величиной является мощность или напряжение, подаваемые на обмотку возбуждения, а выходной величиной — мощность или напряжение цепи якоря.

В генераторе постоянного тока можно различать два коэффициента усиления.

Коэффициент усиления мощности, равный отношению изменения мощности, отдаваемой генератором, к изменению мощности, подаваемой на обмотку возбуждения.

Коэффициент усиления напряжения, равный отношению изменения напряжения на зажимах генератора к изменению напряжения на зажимах обмотки возбуждения.

Остановимся несколько подробнее на коэффициенте усиления мощности. В нормальных машинах постоянного тока мощностью до 10 кВт мощность обмотки возбуждения составляет от 3 до 15% от номинальной мощности машины. Таким образом, коэффициент усиления нормальной машины постоянного тока лежит в пределах 7 ÷ 30, увеличиваясь с возрастанием мощности машины.

В табл. 1 приведены данные, относящиеся к машинам типа ПН:

Таблица 1

Тип машины	Мощность, кВт	Мощность цепи возбуждения, кВт	Коэффициент усиления
ПН-5 . . . . .	0,52	70	7,4
ПН-10 . . . . .	1,1	76	14,5
ПН-17,5 . . . . .	1,75	77	22,7
ПН-28,5 . . . . .	2,85	152	18,8
ПН-45 . . . . .	4,5	206	21,8
ПН-68 . . . . .	6,8	206	33

Как известно, в электромеханических усилителях типа амплитуды в одной машине объединены два каскада усиления: обмотка возбуждения — поперечная ось обмотки якоря и поперечная ось обмотки якоря — продольная ось якоря. Если исходить из приведенных выше значений коэффициента усиления для нормальных машин 7 ÷ 30, то получим значение коэффициента усиления амплитуды порядка 200 ÷ 300.

Благодаря уменьшенному воздушному зазору, несколько сниженным значениям индукции и объединению в одной обмотке якоря двух функций коэффициент усиления электромеханического усилителя может быть увеличен до 500 ÷ 800. Назовем эту величину «естественным коэффициентом усиления» амплитуды и обозначим  $K_0$ .

В реальных амплитудных действительный коэффициент усиления ( $K_\partial$ ) в несколько раз превосходит  $K_0$ . Это достигается снижением плотности тока в обмотке возбуждения.

В машинах постоянного тока плотность тока в обмотке возбуждения определяется условиями нагрева и размещения. Искусственное снижение плотности тока, как правило, невозможно из-за недостатка места.

В амплитудных размеры обмотки возбуждения весьма малы; поэтому снижение плотности тока в 10—20 раз и связанное с этим увеличение размеров обмотки возбуждения не представляют особых трудностей.

Обозначим через  $K_\phi$  отношение максимальной плотности тока в обмотке возбуждения, соответствующей естественному режиму машины, к действительной (уменьшенной) плотности тока.

Легко показать, что отношение действительного коэффициента усиления к естественному равно  $K_\phi$ :

$$\frac{K_\partial}{K_0} = \frac{s_0}{s_\partial} = K_\phi;$$

здесь  $s_\partial$  — действительная плотность тока обмотки возбуждения;

$s_0$  — плотность тока, определяемая условиями нагрева.

Коэффициент  $K_\phi$ , определяющий перегрузочную способность обмотки возбуждения амплитуды, назовем коэффициентом форсировки амплитуды.

Таким образом, благодаря снижению плотности тока в обмотке возбуждения, удается поднять значения коэффициента усиления амплитуды с одной управляющей обмоткой до 10 000 и выше. Предельные значения коэффициента усиления определяются возможностью размещения обмотки возбуждения увеличенного сечения.

Обычно электромеханические усилители имеют несколько обмоток управления (от 2 до 4). Если ампервитки этих обмоток и плотности тока в них одинаковы, то коэффициент усиления амплитуды для каждой обмотки управления будет равен действительному коэффициенту усиления

	Мощность, kW	Напряжение, V	Ток, A	Число обмоток возбуждения	Ток возбуждения, A	Напряжение возбуждения, V	Мощность возбуждения, W	Коэффициент усиления мощности	Коэффициент усиления по напряжению	Падение напряжения при нагрузке 100%, V	Коэффициент форсировки
Генератор	100	100	1 000	2	10	100	1 000	100	1	100	1
Амплидин	1,0	100	10	2	0,1	1	0,1	10 000	1 000	—	10

амплидина с одной обмоткой управления, деленному на число обмоток:

$$K_{\partial.a} = \frac{K_{\partial}}{a} = \frac{K_0 K_{\phi}}{a},$$

где  $a$  — число обмоток управления.

Приведенные соображения необходимо учитывать, применяя электромеханические усилители с несколькими обмотками управления.

Все изложенное справедливо для случая полностью скомпенсированной машины. Случай неполной компенсации или перекомпенсации здесь не рассматривается: укажем только, что в перекомпенсированной машине возможно добиться значительного увеличения коэффициента усиления, но при этом необходима проверка устойчивости, так как в перекомпенсированной машине возможно самовозбуждение и возникновение колебаний<sup>1</sup>.

Высокий коэффициент усиления мощности амплидина необходим в тех случаях, когда требуется усиление слабых сигналов радиоламп, тахометров, сельсинов и т. д.

Во многих системах автоматического регулирования существенное значение имеет коэффициент усиления амплидина по напряжению.

Выбор напряжения управляющих обмоток амплидина в очень широком диапазоне зависит от проектирующего. Делать коэффициент усиления напряжения слишком высоким нецелесообразно, так как при низком напряжении питания обмоток управления существенную роль играют сопротивления проводов и контактов. Обычно коэффициент усиления напряжения не превышает нескольких десятков, реже — нескольких сотен. Для большинства схем этого достаточно; при этом токи в обмотках управления получаются достаточно малыми.

Работа электромеханического усилителя в системе автоматического регулирования. В большинстве систем автоматического регулирования регулируемая величина сравнивается с эталонной; разность регулируемой величины и эталонного значения подается на вход системы регулирования и воздействует на нее так, чтобы вернуть систему в начальное равновесное состояние. В статических системах, когда равновесие восстанавливается, отклонение регулируемой величины снижается до некоторого малого значения, определяемого так называемым статизмом системы.

<sup>1</sup> Я. С. Эпштейн. Переходные процессы в амплидине. Вестник электропромышленности, № 1—2, стр. 5, 1945

Точность регулирования или статизм системы определяется ее коэффициентом усиления. Во многих статьях и руководствах статизм определяется как величина, обратная коэффициенту усиления.

Такое определение, правильное теоретически, на практике иногда приводит к серьезным недоразумениям вследствие того, что не всегда ясно, какой коэффициент усиления амплидина следует принимать в расчет для обеспечения заданной точности регулирования.

Поясним это на примере регулирования напряжения генератора постоянного тока, возбуждаемого от амплидина. Примем данные генератора и амплидина, согласно табл. 2.

Если исходить из коэффициента усиления мощности амплидина 10 000 и коэффициента усиления генератора 100 и не учитывать действительную работу системы, то можно определить общий коэффициент усиления системы в  $10^6$  и статизм в  $10^{-6}$ . В действительности это не так.

Рассмотрим два варианта схем регулирования:

1. (Рис. 1.) Напряжение  $U$  генератора  $\Gamma$  сравнивается с напряжением эталона  $U_0$ . Разность этих двух напряжений подается на обмотку управления амплидина  $A$ .

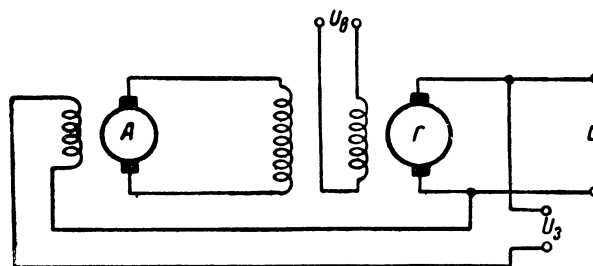


Рис. 1.

Ограничимся пока рассмотрением частного случая изменения напряжения генератора только в зависимости от нагрузки и допустим, что напряжение холостого хода генератора создается ампервитками дополнительной обмотки, питаемой от независимого источника с напряжением  $U_0$  и что падение напряжения при номинальном токе и при отсутствии регулирования равно 100%.

Если напряжение генератора равно напряжению эталона — 100 V, то ток в обмотке управления амплидина равен нулю.



Если разность напряжений генератора и эталона равна 1 V, ток в обмотке управления амплидина достигает номинального значения 0,1 A; ток в обмотке возбуждения генератора составит 10 A, что соответствует изменению напряжения генератора на 100 V.

Таким образом, при номинальной нагрузке генератора отклонение напряжения генератора от заданного значения, необходимое для компенсации падения напряжения, составит 1 V или  $\sim 1\%$  заданного значения регулируемой величины.

Знак  $\sim$  указывает, что эти соотношения не вполне точны. Точность регулирования и коэффициент усиления напряжения в данном случае связаны следующим соотношением:

$$K_n = \frac{100 - \delta}{\delta},$$

где  $\delta$  — точность регулирования в процентах. Таким образом, для обеспечения точности регулирования, равной 1%, необходим коэффициент усиления не 100, а 99.

Мы видим, что в данных условиях статизм системы соответствует ее коэффициенту усиления по напряжению, а не по мощности.

2. (Рис. 2.) Эталонное напряжение приложено к одной из обмоток управления амплидина; ко второй обмотке управления приложено напряжение генератора. Сравнение напряжений производится в амплидине.

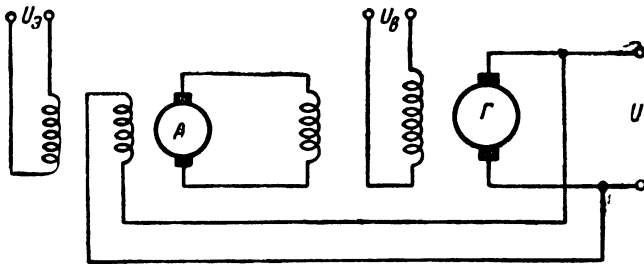


Рис. 2.

Для обеспечения максимальной точности регулирования следует ампервитки каждой из обмоток управления брать максимально допустимыми по условиям нагрева. В нашем случае перегрузочная способность или коэффициент форсировки обмоток управления амплидина составляет 10.

Для того чтобы получить изменение напряжения амплидина, соответствующее 100% напряжения генератора, необходимо, чтобы равенство ампервитков или, при равенстве витков обмоток, разность напряжений обмоток управления соответствовала номинальному значению ампервитков или напряжения обмоток управления.

Легко видеть, что для получения этой разности ампервитков напряжение на зажимах генератора будет отклоняться от заданного значения на  $\sim 10\%$ .

Таким образом, при тех же условиях схема по второму варианту обеспечивает точность поддержания напряжения генератора всего в 10%.

Другими словами, статизм системы в данном случае определяется коэффициентом форсировки обмоток управления амплидина или их перегрузочной способностью. Данные обмоток управления амплидинов на рис. 1 и 2, конечно, различны, но это не нарушает общности рассуждений.

В результате в реальных системах, подобных показанной на рис. 2, вместо огромных коэффициентов усиления, измеряемых тысячами и десятками тысяч, приходится иметь дело с весьма скромными величинами, измеряемыми единицами и максимум десятками. Такой результат может привести к выводу, что более или менее точное поддержание постоянства напряжения генератора по схеме рис. 2 невозможно. Однако, это не так. Во всех приведенных рассуждениях мы исходили из того, что падение напряжения при нагрузке 100% равно 100%. Это положение, принятое на первом этапе для простоты рассуждений, совершенно не соответствует действительности. В нормальных машинах постоянного тока средней мощности падение напряжения при полной нагрузке не превышает 10%, а в крупных компенсированных машинах — 5%.

Таким образом, система автоматического регулирования, воздействующая на возбуждение генератора, должна скомпенсировать значительно меньшее падение напряжения.

Допустим, что падение напряжения в нерегулируемой машине составляет при полной нагрузке 10%. Требуется поддерживать постоянство напряжения генератора с точностью до 1%. Легко видеть, что при этих условиях изменение напряжения генератора на 1% должно вызвать изменение тока возбуждения генератора на 9%. Иначе говоря, система должна иметь коэффициент усиления 9, что вполне достижимо в схеме рис. 2.

Таким образом, полученные небольшие значения действующего коэффициента усиления амплидина оказываются все же достаточными для регулирования напряжения генератора при нагрузке.

Следует отметить, что выбор коэффициента усиления необходимо производить в соответствии с действительными потребностями системы. Малый коэффициент усиления не обеспечивает нужную точность регулирования, а излишний запас коэффициента усиления («на всякий случай») может привести к ухудшению устойчивости системы и к необходимости введения дополнительных элементов для обеспечения устойчивости.

Остановимся несколько подробнее на расчетах «на всякий случай». Иногда указывают на то, что напряжение генератора в рассмотренном выше примере меняется не только от нагрузки, но и от других причин. Поэтому следует принять, что отклонение регулируемого напряжения на заданную величину должно вызвать изменение тока возбуждения генератора, соответствующее полному напряжению. Таким путем предполагается скомпенсировать любые возможности колебаний напряжения генератора. Такой подход, безусловно, неверен. Необходимо всякий



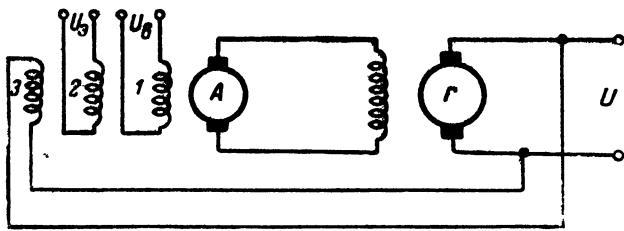


Рис. 3.

раз рассматривать не только изменение напряжения генератора, но и причину, его вызвавшую.

Выше было рассмотрено изменение напряжения генератора под действием нагрузки. Совершенно аналогичные рассуждения применимы и для компенсации падения напряжения, вызванного изменением сопротивлений обмоток машин при нагреве. Падение напряжения, вызванное нагревом обмоток, следует просто прибавить к падению напряжения при нагрузке. Совершенно иначе следует учитывать падение напряжения генератора от снижения скорости вращения двигателя, приводящего во вращение генератор. Действительно, падение скорости вращения двигателя, приводящего во вращение генератор, эквивалентно соответствующему изменению коэффициента усиления системы. Для компенсации падения напряжения генератора в этом случае требуется значительно больше ампервитков, чем для компенсации падения напряжения при нагрузке.

Если, например, падение напряжения при нагрузке составляет 50%, то для компенсации его необходимо увеличить ампервитки возбуждения генератора, а следовательно, и ампервитки возбуждения амплитуды, также на 50% по отношению к ампервиткам, соответствующим холостому ходу генератора.

При регулировании по схеме рис. 1 для получения максимального отклонения в 1% необходимо коэффициент усиления амплитуды по напряжению сделать равным 50.

Если на 50% уменьшить скорость вращения двигателя (при холостом ходе), то для компенсации вызванного этим падением напряжения ампервитки возбуждения генератора и амплитуды следует увеличить на 100%, и коэффициент усиления амплитуды по напряжению должен быть равен 100.

При рассмотрении двух вариантов схем регулирования напряжения генератора (рис. 1 и 2) для простоты рассуждений было принято, что напряжение холостого хода генератора создается ампервитками дополнительной обмотки, питаемой от независимого источника напряжения. На практике такие схемы не применяются. Попробуем перейти к реальным схемам.

Рассмотрим схему, показанную на рис. 3. На этой схеме обмотка возбуждения, создающая напряжение холостого хода генератора, перенесена с генератора на амплитуды. Такой перенос не меняет существа дела, и все рассуждения и выводы, сделанные для схемы рис. 2, остаются в

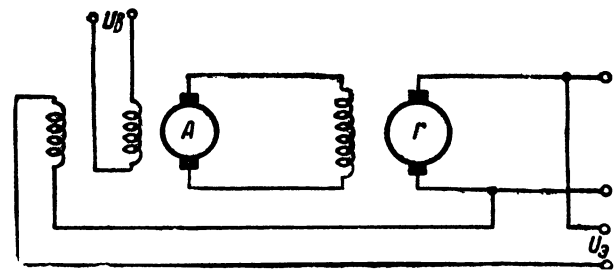


Рис. 4.

силе и для рис. 3. Таким образом, амплитуды должен иметь три обмотки управления.

Обмотка 1 обеспечивает напряжение холостого хода генератора.

Обмотка 2 включена на эталонное напряжение.

Обмотка 3 включена на регулируемое напряжение.

Если напряжение генератора равно заданному значению, то обмотки 2 и 3 уравнивают друг друга.

Функции обмоток управления 1 и 2 — создания напряжения холостого хода и эталонного напряжения могут быть совмещены в одной обмотке управления.

Ампервитки обмотки 2 определяются необходимой точностью регулирования и обычно лимитируются допустимой перегрузкой обмотки, т. е. коэффициентом форсировки.

Ампервитки обмотки 1 в нашем случае направлены так же, как и ампервитки обмотки 2; коэффициент форсировки этой обмотки равен единице.

Объединение в одной обмотке двух указанных функций приводит к уменьшению ее расчетного коэффициента форсировки на единицу.

На рис. 4 изображена схема, представляющая модификацию схемы рис. 1, в которой напряжение холостого хода генератора создается обмоткой возбуждения амплитуды И в данном случае возможно объединение функций двух обмоток управления, но при этом напряжение эталона должно быть изменено, чтобы обеспечить ток возбуждения при холостом ходе генератора и напряжении генератора, равном заданному значению.

**Выводы.** При рассмотрении систем автоматизированного электропривода с амплитудным управлением следует различать три коэффициента усиления амплитуды: коэффициент усиления по мощности; коэффициент усиления по напряжению и коэффициент форсировки возбуждения.

Естественный коэффициент усиления амплитуды по мощности  $K_0$  равен номинальной мощности амплитуды, деленной на мощность возбуждения при максимальной допустимой плотности тока в обмотке управления.

Действительный коэффициент усиления по мощности  $K_d$  равен произведению  $K_0 K_\phi$ , где  $K_\phi$  — коэффициент форсировки, определяемый

перегрузочной способностью обмотки управления амплидина, равен отношению максимально допустимой плотности тока в обмотке управления к действительной плотности тока; для большинства машин  $K_{\phi} = 5 \div 10$ .

Для амплидинов с несколькими одинаковыми обмотками управления действительный коэффициент усиления равен  $\frac{K_0 K_{\phi}}{a}$  ( $a$  — число обмоток управления).

Коэффициент усиления амплидина по напряжению равен отношению изменения напряжения на зажимах якоря амплидина к изменению напряжения на зажимах обмотки управления.

Коэффициент усиления по мощности имеет существенное значение только в таких схемах автоматического регулирования, где мощность измерительных элементов мала и требуется значительное усиление. В остальных случаях этот коэффициент только косвенно характеризует свойства амплидина.

В большинстве схем регулирования электроприводов существенное значение имеют коэффициент усиления по напряжению и коэффициент форсировки.

В случае схемы, показанной на рис. 1, коэффициент усиления по напряжению, необходимый

для получения точности регулирования  $\delta\%$ , при постоянной скорости вращения приводного двигателя определяется формулой

$$K_n = \frac{\Delta U - \delta}{\delta},$$

где  $\Delta U$  — максимальное падение напряжения генератора без регулирования, в процентах, при наихудших условиях работы системы. Если, кроме того, имеет место падение скорости вращения двигателя, приводящего во вращение генератор, то коэффициент  $K_n$  следует увеличить в отношении  $\frac{n_{\text{ном}}}{n_{\text{мин}}}$ .

Таким образом получаем:

$$K_n = \frac{n_n(\Delta U - \delta)}{n_{\text{мин}} \delta}.$$

В случае схемы, показанной на рис. 2, точность регулирования определяется коэффициентом форсировки амплидина.

Так же, как и в предыдущем пункте,

$$K_{\phi} = \frac{n_n(\Delta U - \delta)}{n_{\text{мин}} \delta}.$$



## К вопросу о размагничивающем действии поперечной реакции якоря в машинах постоянного тока

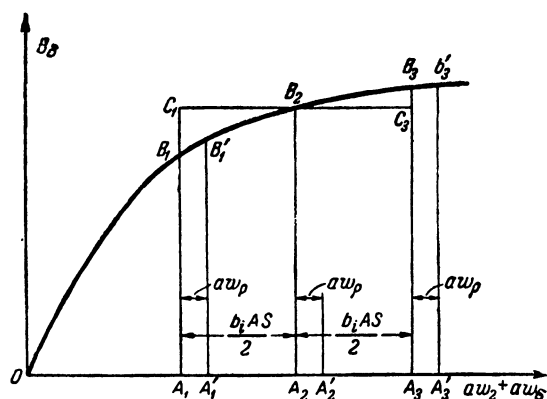
Доц., канд. техн. наук М. С. МИХАЙЛОВ-МИКУЛИНСКИЙ

*Московский энергетический институт им. В. М. Молотова*

Как известно, поперечная реакция якоря в машинах постоянного тока приводит к перераспределению магнитного потока в воздушном зазоре машины.

Вследствие поперечной реакции и связанного с этим дополнительного насыщения происходит уменьшение полезного магнитного потока.

При расчете машины требуется определить уменьшение потока под действием поперечной реакции ( $\Delta\Phi$ ) и необходимое увеличение м. д. с.  $a\omega_z$ , компенсирующее эту убыль. Методы решения этих задач общеизвестны; они основаны на планиметрировании площади, ограниченной переходной характеристикой. Будучи простыми, эти приемы требуют кропотливой работы по планиметрированию площадей.



На рисунке изображена переходная характеристика машины  $B_\delta = \psi(a\omega_z + a\omega_z^2)$ , представляющая зависимость индукции  $B_\delta$  в воздушном зазоре от суммарных ампервитков воздушного зазора  $a\omega_z$  и зубцов  $a\omega_z^2$  на один полюс.

Пусть  $\overline{OA_2}$  представляет необходимое значение  $a\omega_z + a\omega_z^2$  для получения под полюсом при холостом ходе индукции  $B_{\delta 0} = \overline{A_2 B_2}$ . При линейной нагрузке якоря  $AS$  по краям расчетной полюсной дуги  $b_i$  будут действовать м. д. с.

$$\overline{OA_1} = \overline{OA_2} - \frac{b_1 AS}{2}$$

и

$$\overline{OA_3} = \overline{OA_2} + \frac{b_3 AS}{2}$$

При холостом ходе на всей дуге  $b_i$  будет индукция  $B_{\delta 0}$ . Следовательно, поток при холостом ходе  $\Phi_0 = B_{\delta 0} b_i l_i$  (где  $l_i$  — расчетная длина машины) может быть представлен площадью  $F_0$  прямоугольника  $A_1 C_1 C_3 A_3$ , равной произведению  $A_1 A_3 \cdot A_2 B_2$ :

$$\Phi_0 = m_\phi \cdot A_1 \cdot A_3 \cdot A_2 B_2 = m_\phi F_0, \quad (1)$$

где  $m_\phi$  — масштаб магнитного потока.

При нагрузке индукция на дуге  $b_i$  распределена по кривой  $B_1 B_2 B_3$ . При этом магнитный поток  $\Phi$  изображается площадью  $F$  криволинейного четырехугольника  $A_1 B_1 B_3 A_3$ .

$$\Phi = m_\phi F. \quad (2)$$

Следовательно, уменьшение магнитного потока

$$\Delta\Phi = \Phi_0 - \Phi = m_\phi (F_0 - F). \quad (3)$$

Величину площади  $F$  можно определить различными способами. Весьма удобным является метод, предложенный проф. Г. Н. Петровым<sup>1</sup>. По этому методу среднее значение индукции в воздушном зазоре при нагрузке  $B_{\delta cr}$  находится по формуле Симпсона, что, как показывает опыт, дает довольно точный результат. Следовательно, при нагрузке и возбуждении соответствующем  $\overline{OA_2}$ ,

$$B_{\delta cr} = \frac{\overline{A_1 B_1} + 4\overline{A_2 B_2} + \overline{A_3 B_3}}{6}, \quad (4)$$

и площадь  $F$

$$F = B_{\delta cr} \overline{A_1 A_3} = \frac{\overline{A_1 B_1} + 4\overline{A_2 B_2} + \overline{A_3 B_3}}{6} \cdot \overline{A_1 A_3}. \quad (5)$$

Вычитая (5) из (1), получим:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= m_\phi \overline{A_1 A_3} \left[ \overline{A_2 B_2} - \frac{\overline{A_1 B_1} + 4\overline{A_2 B_2} + \overline{A_3 B_3}}{6} \right] = \\ &= m_\phi \frac{A_1 A_3}{3} \left[ \overline{A_2 B_2} - \frac{\overline{A_1 B_1} + \overline{A_3 B_3}}{2} \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Для компенсации уменьшения потока необходимо увеличить м. д. с. воздушного зазора и зубцов  $a\omega_z + a\omega_z^2$  от значения  $\overline{OA_2}$  до  $\overline{OA_2'}$ , т. е. на  $\overline{A_2 A_2'} = a\omega_z$ . При увеличении возбуждения на  $a\omega_z$  поток машины изобразится площадью

<sup>1</sup> „Вестник электропромышленности“, № 10, 1944.

нового криволинейного четырехугольника  $A_1'B_1'B_3'A_3'$ , равной по условию  $F_0$ . Величину  $a\omega_p$  обычно находят приближенно путем нескольких попыток. Можно определить  $a\omega_p$  с большой точностью, не прибегая к планиметрированию, по способу, излагаемому ниже.

После увеличения возбуждения на  $a\omega_p$  м. д. с. на краях дуги  $b_i$  станут равными: на одном краю  $\overline{OA_1'} = \overline{OA_1} + a\omega_p$  и на другом  $-\overline{OA_3'} = \overline{OA_3} + a\omega_p$ . При этом к площади  $F$  справа прибавится площадка  $F_3$ , равная

$$F_3 \approx \overline{A_3A_3'} \frac{\overline{A_3B_3} + \overline{A_3'B_3'}}{2} \approx \overline{A_3A_3'} \cdot \overline{A_3B_3} = a\omega_p \cdot \overline{A_3B_3}, \quad (7)$$

а слева вычтется площадка  $F_1$ , равная

$$F_1 \approx \overline{A_1A_1'} \frac{\overline{A_1B_1} + \overline{A_1'B_1'}}{2} \approx \overline{A_1A_1'} \cdot \overline{A_1B_1} = a\omega_p \overline{A_1B_1}. \quad (8)$$

Следовательно, после увеличения возбуждения

$$F + F_3 - F_1 = F_0. \quad (9)$$

Из (9) получаем:

$$\Delta\Phi = m_\phi [F_0 - F] = m_\phi [F_3 - F_1] = m_\phi a\omega_p [\overline{A_3B_3} - \overline{A_1B_1}]. \quad (10)$$

Если  $\Delta\Phi$  было определено ранее, то, подставив его значение в (10), найдем необходимое увеличение возбуждения  $a\omega_p$  для компенсации убыли потока от поперечной реакции якоря

$$a\omega_p = \frac{\Delta\Phi}{m_\phi [\overline{A_3B_3} - \overline{A_1B_1}]}. \quad (11)$$

Если  $\Delta\Phi$  определяется по уравнению (6), то можно  $a\omega_p$  найти из следующего простого выражения:

$$a\omega_p = \frac{\overline{A_1A_3}}{3} \cdot \frac{\overline{A_2B_2} - \frac{\overline{A_1B_1} + \overline{A_3B_3}}{2}}{\overline{A_3B_3} - \overline{A_1B_1}}. \quad (12)$$

В выражениях (7) и (8) принято, что

$$\frac{\overline{A_3B_3} + \overline{A_3'B_3'}}{2} \approx \overline{A_3B_3} \quad \text{и} \quad \frac{\overline{A_1B_1} + \overline{A_1'B_1'}}{2} \approx \overline{A_1B_1}.$$

Это допущение приходится сделать, так как, не зная еще  $a\omega_p$ , нельзя определить значения ординат  $\overline{A_3'B_3'}$  и  $\overline{A_1'B_1'}$ . Такое допущение, впрочем, не вносит заметной погрешности. Поэтому значение  $a\omega_p$ , получаемое из (12), практически достаточно точно, если только в машине не получается так называемое „опрокидывание поля“.

Можно также рассматривать результат, полученный по формуле (12), как первое приближение. В этом случае, найдя по (12) значение  $a\omega_p$ , откладываем его значение вправо от  $A_1$  и  $A_3$  и находим положение точек  $A_1'$  и  $A_3'$ . Затем строим ординаты  $\overline{A_1'B_1'}$  и  $\overline{A_3'B_3'}$ . Пользуясь найденными значениями  $\overline{A_1'B_1'}$  и  $\overline{A_3'B_3'}$ , находим площадки  $F_1$  и  $F_3$  во втором приближении

$$F_1 = \overline{A_1'A_1'} \frac{\overline{A_1B_1} + \overline{A_1'B_1'}}{2} = a\omega_p \frac{\overline{A_1B_1} + \overline{A_1'B_1'}}{2}, \quad (13)$$

$$F_3 = \overline{A_3'A_3'} \frac{\overline{A_3B_3} + \overline{A_3'B_3'}}{2} = a\omega_p \frac{\overline{A_3B_3} + \overline{A_3'B_3'}}{2}. \quad (14)$$

Наконец, уменьшение потока

$$\Delta\Phi = m_\phi [F_3 - F_1] = a\omega_p \frac{(\overline{A_3B_3} + \overline{A_3'B_3'}) - (\overline{A_1B_1} + \overline{A_1'B_1'})}{2}. \quad (15)$$

Приравняв  $\Delta\Phi$  согласно (15) его значению по (6), получаем величину  $a\omega_p$  во втором приближении

$$a\omega_p = \frac{\overline{A_1A_3} [2 \overline{A_2B_2} - \overline{A_1B_1} - \overline{A_3B_3}]}{3 [(\overline{A_3B_3} + \overline{A_3'B_3'}) - (\overline{A_1B_1} + \overline{A_1'B_1'})]}. \quad (16)$$

Если в результате поперечной реакции индукция под одним краем полюса изменяет знак, то следует в выражениях (12) или (16) соответствующие ординаты (при принятых обозначениях это может иметь место с ординатами  $\overline{A_1B_1}$  и  $\overline{A_1'B_1'}$ ) считать отрицательными.

Легко видеть, что определение  $a\omega_p$  по предлагаемому способу не требует никаких дополнительных построений, кроме переходной характеристики, и освобождает от необходимости планиметрировать площади. При пользовании выражениями (12) или (16) целесообразно для упрощения вычислений представлять отрезки в единицах длины.

# Анализ характеристик сварочных трансформаторов<sup>1</sup>

Проф., доктор техн. наук Н. С. СИУНОВ

Уральский индустриальный институт

Несмотря на широкое распространение сварочных трансформаторов, методика исследования их характеристик, учитывающая только паспортные данные, почти совершенно не разработана. Опубликованные в ряде работ аналитические выражения внешних характеристик сварочных трансформаторов непригодны для практических цепей, так как определение реактансов обмоток, входящих в эти уравнения, связано со значительными трудностями расчетного или опытного порядка.

Представляет интерес дать простые, пригодные для целей практики, аналитические выражения для характеристик трансформаторов, позволяющие строить необходимые графики по минимальному количеству исходных данных. В настоящей статье предлагается простой графический метод исследования характеристик сварочных трансформаторов, в основу которого положен метод относительных единиц.

Общие требования, предъявляемые к любому сварочному трансформатору, как известно, сводятся к наличию крутопадающей внешней характеристики и напряжения холостого хода, значительно превышающего рабочее напряжение дуги. Необходимая форма внешней характеристики получается или за счет включения дросселя последовательно в сварочную цепь (рис. 1)

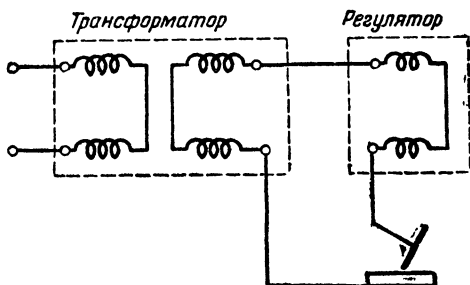


Рис. 1.

или же за счет увеличенной индуктивности самого трансформатора. Внешние характеристики некоторых типов сварочных трансформаторов, снятые опытным путем, представлены на рис. 2. Как видно, различные трансформаторы имеют разную жесткость внешней характеристики и разную величину напряжения холостого хода.

Пренебрегая ввиду малого значения активным сопротивлением дросселя ( $R=0$ ) и пользуясь обычной потенциальной диаграммой (рис. 3), получаем:

$$I_2^2 x^2 + U_0^2 = U_{20}^2.$$

Отсюда

$$\frac{I_2^2}{\left(\frac{U_{20}}{x}\right)^2} + \frac{U_0^2}{U_{20}^2} = 1.$$

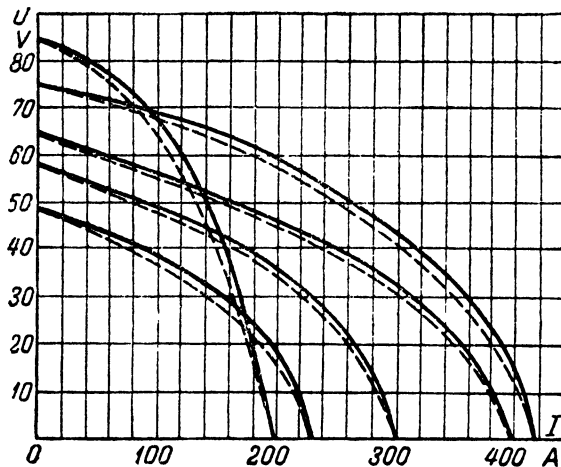


Рис. 2.

Поскольку  $\frac{U_{20}}{x} = I_{2к}$ , то окончательно получаем:

$$\frac{I_2^2}{I_{2к}^2} + \frac{U_0^2}{U_{20}^2} = 1,$$

где  $U_{20}$  — напряжение холостого хода;  
 $I_{2к}$  — ток короткого замыкания.

Отсюда уравнение внешней характеристики сварочного трансформатора принимает вид:

$$U_0 = U_{20} \sqrt{1 - \left(\frac{I_2}{I_{2к}}\right)^2}. \quad (1)$$

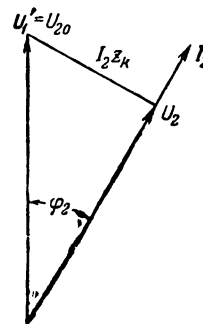


Рис. 3.

Таким образом, для анализа внешней характеристики сварочного трансформатора требуется знать только напряжение холостого хода и ток короткого замыкания. Характеристики, полученные расчетным путем, как видно из рис. 2 (пунктирные кривые), мало отличаются от опытных кривых, что и позволяет пользоваться формулой (1) для практических расчетов.

Уравнения внешней характеристики сварочного трансформатора удобно выразить в относи-

<sup>1</sup> В порядке обсуждения. Прим. ред.

тельных единицах. Выражая ток и напряжение в долях единицы

$$i_2 = \frac{I_2}{I_{2\kappa}}; \quad v_\partial = \frac{U_\partial}{U_{20}},$$

т. е., полагая  $U_{20} = 1$  и  $I_{2\kappa} = 1$ , имеем:

$$i_2^2 = v_\partial^2 = 1. \quad (2)$$

В итоге получаем уравнение окружности с центром в начале координат (рис. 4).

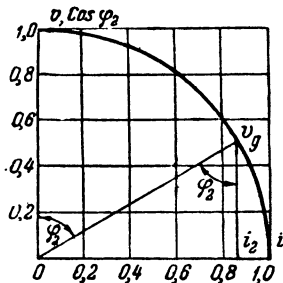


Рис. 4.

Таким образом, применение метода относительных единиц избавляет от необходимости строить действительную кривую внешней характеристики, позволяя интересующие величины найти путем простейших графических построений.

Из диаграммы (рис. 3) имеем:

$$\cos \varphi_2 = \frac{V_\partial}{V_{20}} = v_\partial. \quad (3)$$

Следовательно, на рис. 4 вертикальная ось одновременно является масштабом коэффициента мощности.

Для рабочего сварочного тока в относительных единицах получается весьма простое соотношение:

$$i_2 = \sqrt{1 - v_\partial^2} = \sin \varphi_2. \quad (4)$$

В обычных обозначениях последнее выражение имеет вид:

$$I_2 = I_{2\kappa} \sqrt{1 - \left(\frac{V_\partial}{V_{20}}\right)^2}. \quad (4a)$$

Для мощности дуги в относительных единицах получаем:

$$P_\partial = v_\partial i_2 = \cos \varphi_2 \sin \varphi_2. \quad (5)$$

Условие максимума полезной мощности имеет вид:

$$\sin \varphi_2 = \cos \varphi_2 = 0,707. \quad (6)$$

График полезной мощности дуги изображен на рис. 5. Как видно, в случае небольшой разницы между рабочим током и током короткого замыкания требуется иметь повышенное напряжение холостого хода, что связано с низким коэффициентом мощности установки. Вместе с тем

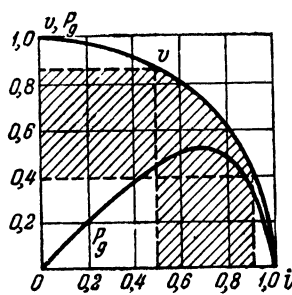


Рис. 5.

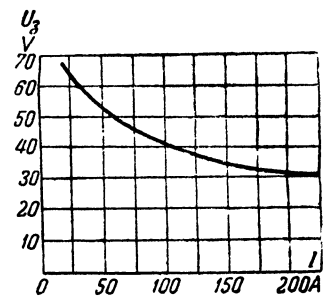


Рис. 6.

видно, что повышенные значения  $\cos \varphi$ , возможные при снижении величины напряжения холостого хода, повлекут увеличение разницы между рабочим током и током короткого замыкания.

Оптимальная зона работы сварочного трансформатора (рис. 6), очевидно, лежит в пределах

$$I_2 = [0,9 - 0,5] I_{2\kappa}, \quad (7)$$

что дает:

$$\cos \varphi_2 = 0,4 - 0,87.^1$$

Отсюда видно, что напряжение холостого хода сварочного трансформатора должно лежать в пределах

$$U_{\partial 0} = \frac{U_\partial}{0,4 \div 0,87} = \frac{25}{0,4 \div 0,87} = 62,5 \div 29 \text{ V.}$$

Приведенные расчеты показывают, что целесообразен переход на более низкие напряжения холостого хода по сравнению с общепринятыми в настоящее время.

Как известно, теоретический предел устойчивости дуги в цепи переменного тока (при больших сварочных токах) обуславливается наличием напряжения холостого хода, в 1,31 раза превышающим напряжение дуги. С учетом пиков зажигания при малых сварочных токах, обычно пользуются соотношением<sup>2</sup>

$$U_{\partial 0} \geq (1,83 - 2,62) U_\partial, \quad (8)$$

в котором меньшие значения соответствуют токам 100—150 А, а большие — даны для токов меньше 100 А. Если учесть существующее стремление к универсальности сварочных трансформаторов, стремление получить в одном трансформаторе как повышенные, так и очень малые рабочие токи, то излишняя осторожность, допущенная в соотношении (8), становится понятной. Нельзя также упускать из вида, что в период опубликования цитируемой работы (1937 г.) сваривали, как правило, относительно малыми токами.

Попытки снижения величины напряжения холостого хода до сих пор не дали практически удовлетворительных результатов, ибо, как только что было отмечено, к существующим типам сварочных трансформаторов предъявляются слиш-

<sup>2</sup> Акад. В. П. Никитин и И. Я. Рабинович. „Электричество“, № 5, стр. 31, 1937.

ком высокие требования в отношении их универсальности в части диапазона регулирования рабочего тока.

В качестве примера укажем пределы регулирования тока для различных типов наших сварочных трансформаторов:

СТ-2 . . . . .	70—300 А
СТЭ-22 . . . . .	70—300 А
СТЭ-23 . . . . .	50—440 А
СТЭ-32 . . . . .	100—700 А

Естественно, нельзя создать одинаковые условия зажигания для малых токов (50—70 А) и для больших токов (400—700 А). При уменьшении рабочих токов ухудшается нагрев и ионизация дугового промежутка, расчет напряжения зажигания дуги  $U_z$ . Зависимость напряжения зажигания дуги, при котором возможно устойчивое горение от рабочего тока, по данным акад. В. П. Никитина и И. Я. Рабиновича, представлена на рис. 6.

Напряжение 65 В, принятое в современных сварочных трансформаторах, обусловлено нижним пределом регулирования рабочего тока. В случае сварки большими токами указанное напряжение является сильно завышенным.

В настоящее время на крупных предприятиях с поточным производством дуговая сварка, как правило, ведется только на больших токах с относительно узкими пределами регулирования.

Поэтому применение трансформаторов универсального типа во многих случаях совершенно нецелесообразно.

В дальнейшем следует отказаться от универсальных трансформаторов, резко сократить пределы регулирования тока (до 1 : 2 или максимум — 1 : 3), что позволит в крупных трансформаторах применить пониженное напряжение холостого хода.

Проведение указанных мероприятий позволит сократить расход активных материалов, поднять технико-экономические показатели сварочных трансформаторов, привести их в соответствие с современной технологией дуговой сварки.

По мнению автора, было бы целесообразно установление следующих основных типов:

- Тип I — сварка на малых токах . . . . . ( 50—150 А)
- „ II — сварка на средних токах . . . . . (150—300 А)
- „ III — сварка на повышенных токах . . . (300—600 А)
- „ IV — сварка на больших токах . . . . . (600—1 200 А)
- „ V — сварка по методу акад. Никитина (2 000—4 000 А)

Отказ от универсальности при изготовлении сварочных трансформаторов позволил в крупных аппаратах уже сейчас снизить величину напряжения холостого хода до 40—45 В. Принятое в настоящее время напряжение 65 В целесообразно в дальнейшем сохранить только в трансформаторах на малые токи (50—150 А).

# ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИЗОЛЯЦИЯ

## Способы защиты бумажно-бакелитовых вводов от увлажнения

Инж. Я. Л. ШУГАЛ

Завод „Изолит“ МЭП

Применение бумажно-бакелитовых вводов конденсаторного типа вместо фарфоровых позволяет значительно снизить общий вес высоковольтных аппаратов и стоимость их. Однако, в среде с повышенной влажностью, конденсаторные вводы снижают свои электроизоляционные свойства, что иногда приводит к выходу их из строя. При соответствующем подборе покровных лаков и режима сушки можно значительно снизить влагонепроницаемость покровных лаковых пленок и этим увеличить срок службы бумажно-бакелитовых вводов.

**Увлажнение бумажно-бакелитовых вводов.** Для установления скорости увлажнения бумажно-бакелитовой изоляции было изучено изменение тангенса угла диэлектрических потерь трубок при разной относительной влажности. Были испытаны трубки длиной 120 мм наружным диаметром 32 мм и толщиной стенки 3,5 мм. В результате было установлено, что при постоянной относительной влажности диэлектрические потери почти не меняются. Стабильность диэлектрических потерь в трубках достигается через 5—10 мин после того, как образцы помещаются в камеру.

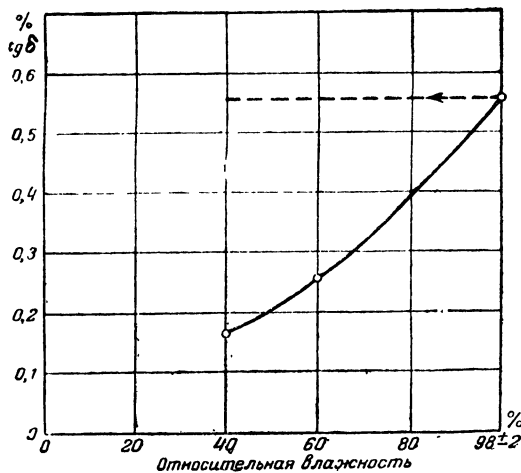


Рис. 1. Изменение  $\operatorname{tg} \delta$  в зависимости от относительной влажности.

Изменение  $\operatorname{tg} \delta$  в зависимости от относительной влажности показано на рис. 1, из которого видно, что при переходе от низкой относительной влажности к более высокой наблюдается заметный рост диэлектрических потерь. Кроме того, если образцы, выдержанные длительно при высокой относительной влажности, поместить на выдержку в среду с меньшей относительной влажностью, то трубки длительно сохраняют диэлектрические потери, соответствующие среде с более высокой влажностью. Это показывает, что подсушка трубок при нормальных атмосферных условиях происходит очень медленно.

Гигроскопичность бумажно-бакелитовых трубок объясняется тем, что количество вводимой при производстве бакелитовой смолы достаточно только для того, чтобы склеить отдельные слои бумаги, но совершенно недостаточно для заполнения пор бумаги. Адсорбируемые на поверхности бакелитовых изделий пары воды проникают через поры вглубь структуры, снижая диэлектрические свойства изделий. Это наглядно иллюстрируется характером изменения диэлектрической проницаемости бумажно-бакелитовых трубок от длительности пребывания их в среде с разной относительной влажностью при температуре 90° С (рис. 2).

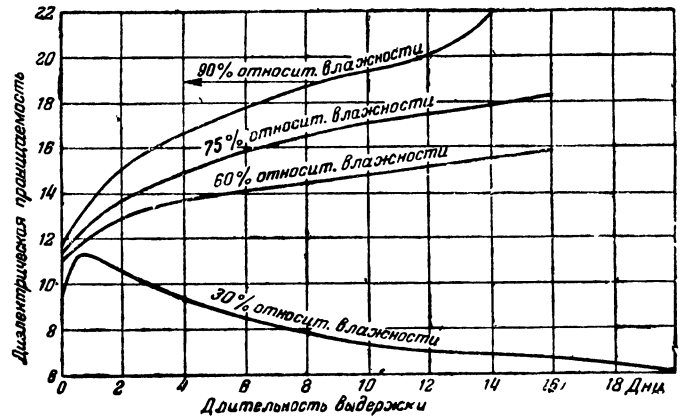


Рис. 2. Изменение диэлектрической проницаемости в зависимости от длительности пребывания во влажной среде.

С целью уменьшения гигроскопичности бумажно-бакелитовых изделий их покрывают специальными лаками. Покровные лаки придают изделиям также гладкую внешнюю поверхность и предохраняют их от осаждения пыли. Лакировкой не всегда достигают цели, вследствие того, что в составе применяемых лаков содержатся летучие растворители; вследствие ненадежных приемов сушки часто в лаковой пленке образуются капилляры, остающиеся после улетучивания растворителя. Иногда пленка бывает покрыта сетью волосных трещин, через которые влага впитывается волокнистой структурой материала. Образование мельчайших трещин в лаковой пленке возможно также и вследствие неодинакового расширения пленки и изделия при нагреве. Поэтому выбор состава лака, толщины лаковой пленки и приемов сушки имеют важное значение. В этом отношении бакелитовый лак при надлежащем ведении процесса полимеризации оказывается наиболее подходящим. Это видно из табл. 1.

Таблица 1

Наименование пленкообразующего вещества	Влагопроницаемость по отношению к парафину
Стирол . . . . .	66
Бакелит С . . . . .	76
Масляный лак, бензилцеллюлоза, асфальтовый лак	166—334
Ацетат-целлюлоза . . . . .	2500

Как видно, коэффициент влагопроницаемости пленки бакелитового лака немного больше, чем у стирола. Однако, на практике трудно получить бакелитовую пленку необходимой толщины без трещин.

Для увеличения толщины пленки без опасения растрескивания ее при сушке, увеличения ее теплоустойчивости, увеличения прочности, а также для выявления неравномерности на покрываемой поверхности может быть рекомендован пигментированный бакелитовый лак или так называемая «бакелитовая эмаль».

Покрытие из указанного лака хорошо противостоит действию влаги, слабых кислот и щелочей. Лаковая пленка твердая, блестящая, маслостойкая и не поддается царапанию. Цвет покрытия — коричневый. Бакелитовая эмаль



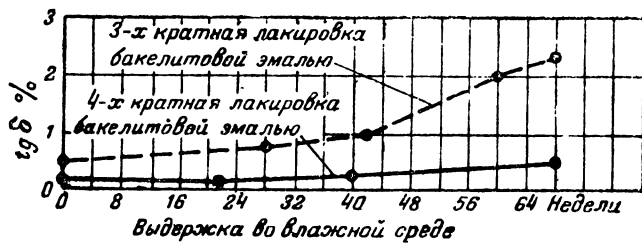


Рис. 3. Изменение  $\text{tg } \delta$  в зависимости от времени выдержки во влажной среде при  $20^\circ\text{C}$

может применяться для покрытия вводов, цилиндров и других деталей, работающих в атмосферных условиях. О влагостойкости лаковой пленки из бакелитовой эмали можно судить по рис. 3, на котором представлено изменение  $\text{tg } \delta$  от времени выдержки трубок в среде с относительной влажностью  $95 \pm 3\%$ .

При четырехкратной лакировке трубок бакелитовой эмалью удается сохранить их диэлектрические свойства почти стабильными в продолжение 63 недель.

Для того чтобы установить оптимальную толщину лаковой пленки, были исследованы конденсаторные вводы с разной толщиной покрытия. Ежемесячно в конденсаторных вводах определялись значения  $\text{tg } \delta$ . Для сравнения был исследован также и ввод, поверхность которого покрыта масляно-асфальтовым лаком. Результаты испытания приведены в табл. 2 и на рис. 4.

Приведенная таблица и кривые рис. 4 достаточно убедительно характеризуют важность рекомендуемой бакелитовой эмали как для работ по реставрации бакелитовой изоляции в энергосистемах, так и с точки зрения возможности увеличения области применения бумажно-бакелитовой изоляции в аппаратуростроении.

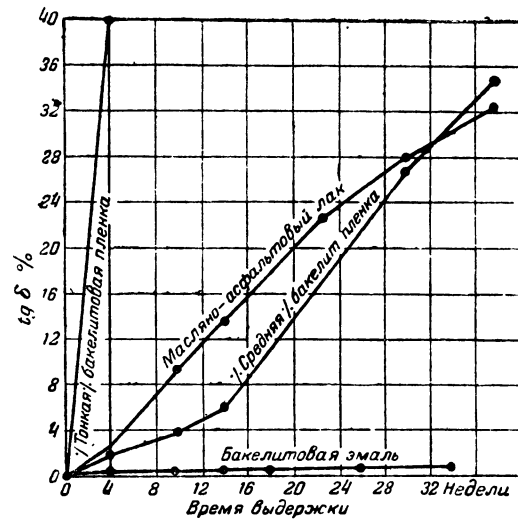


Рис. 4. Изменение  $\text{tg } \delta$  в зависимости от выдержки конденсаторных выводов в холодной влажной атмосфере,

Таблица 2

Характер лаковой пленки	Начальное значение, $\text{tg } \delta$ , %	Время в неделях для установления $\text{tg } \delta$ до значения			Конечное значение $\text{tg } \delta$ , %
		5%	1%	20%	
Тонкая бакелитовая пленка . . . . .	0,6	—	1	2	52
Бакелитовая пленка средней толщины . . . . .	0,7	10	17	25	32
Бакелитовая эмаль . . . . .	0,7	Больше			1,0
Масляно-асфальтовая пленка . . . . .	0,6	34 недель	6	10	20
					3



Редактор Д. В. Ефремов

Сдано в производство 28/ХІІ 1947 г.  
А-00486

Подписано к печати 31/І 1948 г.  
Тип. зн. в 1 п. л. 48 000

Объем 3 п. л.  
Тир. 2 200 экз. Подписное издание

3,6 уч.-авт. л.  
Зак. 359

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., д. 10.