

РАЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ ПРИВОДОМ Г-Д ШАХТНОГО ПОДЪЕМА И ЭКСКАВАТОРОВ

Р. П. Чичиванов

Автоматизация привода Г-Д шахтного подъема и экскаваторов тесно связана с применением в нем электромашинных усилителей — специальных электрических машин, обладающих большим коэффициентом усиления и высоким быстродействием. Эти качества электромашинных усилителей определили широкое распространение их и способствовали разработке различных схем управления, построенных по замкнутому циклу.

Однако опыт эксплуатации и исследования приводов Г-Д шахтного подъема и экскаваторов с электромашинным управлением показывают, что системы с электромашинными усилителями весьма сложны, переходные процессы в них имеют неблагоприятный характер, в целом работа приводов не отличается надежностью и стабильностью [1, 2].

Отмеченные недостатки объясняются в основном недостатками самого ЭМУ: нестабильностью характеристик ЭМУ и параметров, колебательным характером переходных процессов.

Дальнейшее развитие и совершенствование автоматизированного электропривода по системе Г-Д шахтных подъемных установок и экскаваторов требует разработки более простых, надежных и высококачественных схем управления и регулирования. Такие схемы могут быть созданы за счет рационального структурного построения системы регулирования с использованием в них в качестве регуляторов электрических машин нормального исполнения или магнитных усилителей.

Теоретическое обоснование возможности применения обычной машины постоянного тока в качестве регулятора привода Г-Д шахтного подъема заключается в следующем.

В приводе подъемной машины регулируемым параметром является скорость подъемного двигателя и основной задачей системы автоматического регулирования является обеспечение выполнения с требуемой степенью точности заданного изменения скорости машины за цикл подъема при надлежащем качестве переходных процессов в системе. Для этого система регулирования должна быть построена как замкнутая одноконтурная с регулирующей обратной связью по скорости двигателя.

Регулятор в этой системе выполняет функции сумматора воздействий: задающего программу изменения скорости и регулирующего — передаваемого обратной связью с выхода на вход системы.

Основным параметром замкнутой одноконтурной системы регулирования, определяющим ее влияние на свойства привода, является коэффициент форсировки K_ϕ , представляющий отношение ампер-витков задающей обмотки регулятора $AW_{0,3}$ к результирующим ампер-виткам возбуждения регулятора AW ,

$$K_\phi = \frac{AW_{0,3}}{AW}. \quad (1)$$

Связь его с коэффициентом усиления (преобразования) регулятора $K_p = \frac{U_p}{AW}$, генератора $K_r = \frac{U_r}{U_p}$, двигателя $K_d = \frac{n_d}{U_r}$ и обратной связи $K_{o.c} = \frac{AW_{o.c}}{n_d}$ выражается уравнением

$$K_\phi = 1 + K_p K_r K_d K_{o.c}. \quad (2)$$

Исследование влияния величины коэффициента форсировки системы на свойства привода показало, что для получения оптимальных статических и динамических характеристик привода Г-Д шахтного подъема необходимы коэффициенты форсировки в пределах 3—4 (в периоды разгона, равномерного хода и основного замедления). В конце цикла при подходе подъемных сосудов к приемным площадкам желательно увеличение K_ϕ до 6—8 с целью повышения точности регулирования малых скоростей [2, 3].

Как следует из анализа уравнения (2), при достаточно большом (4—6)* коэффициенте усиления основного генератора K_r необходимое значение коэффициента форсировки системы наиболее просто может быть обеспечено за счет коэффициента усиления обратной связи $K_{o.c}$, т.е. за счет увеличения управляющих импульсов системы.

Как показывают расчеты и испытания, при полном использовании перегрузочной способности обмотки возбуждения нормальной машины постоянного тока (например, типа ПН-100) коэффициент усиления ее $K_p = 0,25 b/a - b$ достаточен для обеспечения требуемых коэффициентов форсировки системы ($K_\phi = 3-4$), и, следовательно, машина нормального исполнения может быть использована в качестве возбудителя-регулятора привода.

Конструктивно схема управления и регулирования приводом Г-Д шахтного подъема с возбудителем-регулятором может быть построена в двух модификациях: 1) на принципе электромагнитного регулирования, когда управляющие и регулирующие импульсы подаются на отдельные обмотки регулятора (рис. 1, а); 2) на принципе потенциометрического регулирования, когда управляющие и регулирующие импульсы воздействуют на одну обмотку регулятора (рис. 1, б). При построении схемы управления на электромагнитном принципе для использования обычной машины в качестве регулятора обмотка возбуждения ее должна быть разделена на две части, что осуществляется простым пересоединением концов катушек. Катушки с большим числом витков соединяются последовательно и используются как задающая обмотка регулятора; катушки с меньшим числом витков используются как обмотка регулирующей обратной связи. При построении схемы управления на потенциометрическом принципе одна из обмоток регулятора может быть использована в качестве обмотки самовозбуждения U_c .

Схема автоматического управления приводом шахтного подъема по системе Г-Д с возбудителем-регулятором В-Р (рис. 1, а), разработанная

* Такой коэффициент усиления имеют генераторы большой мощности, применяющиеся в приводе Г-Д шахтного подъема и экскаваторов.

лабораторией автоматики и телемеханики в горном деле Ленинградского горного института (АТМ), успешно прошла промышленные испытания на автоматизированных подъемных установках Соликамского калийного комбината и Дегтярского медного рудника, где ею были заменены схемы с каскадом ЭМУ—ПМУ и с ЭМР продольного поля. К настоящему времени схема с В-Р внедрена и находится в промышленной эксплуатации на трех крупных автоматизированных подъемных установках Криво-рожского бассейна.

Как видно из осциллограмм (рис. 2, а) переходные процессы в системе с В-Р протекают аperiodически, выгодно отличаясь от переходных процессов в системе с ЭМУ-ПМУ, имеющих явно выраженный колебательный характер (рис. 2, б). Это позволяет выполнить систему с В-Р без

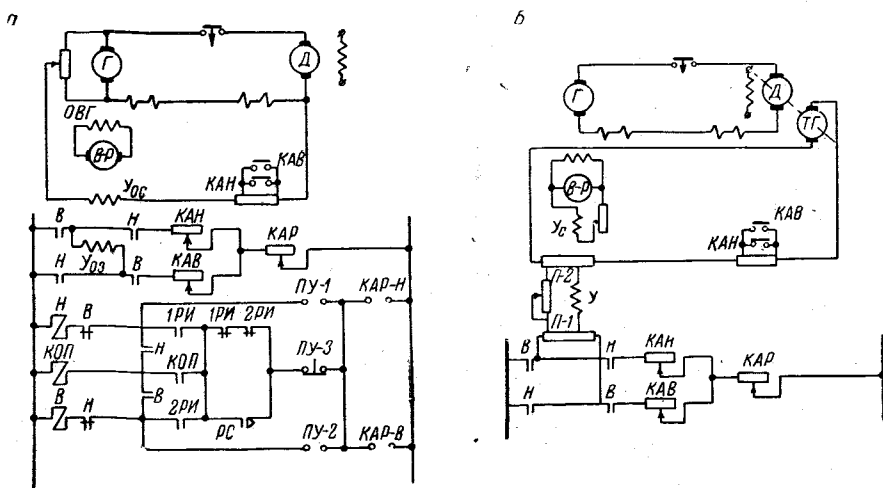


Рис. 1. Схема управления и регулирования приводом Г-Д шахтного подъема с возбудителем-регулятором:

а — электромагнитная; б — потенциметрическая

противоколебательных связей, что обеспечивает при одинаковой форсировке меньшее время переходных процессов при достаточной их плавности и равномерности.

Большее быстродействие, благоприятный характер переходных процессов, большой запас устойчивости позволяют сделать вывод о том, что в отношении динамических свойств система с возбудителем-регулятором является более качественной по сравнению с системами, построенными на базе ЭМУ. В то же время при использовании в качестве возбудителя-регулятора обычной машины постоянного тока схема управления значительно упрощается вследствие исключения из нее сложных ЭМУ, ПМУ и трех обратных связей, что, безусловно, повышает надежность и безопасность работы автоматизированного привода.

Опыт эксплуатации показал, что по своим регулировочным качествам схема с В-Р не уступает схемам, построенным на базе электромагнитных усилителей, выгодно отличаясь от них предельной простотой и надежностью [4]. Некоторым недостатком схемы с В-Р, построенной на электромагнитном принципе, является относительно большая величина управляющих и регулирующих импульсов (1—1,5 а).

Потенциметрический вариант схемы управления с возбудителем-регулятором (см. рис. 1, б), с использованием одной из обмоток В-Р в качестве обмотки самовозбуждения обеспечивает уменьшение управляющих импульсов системы регулирования. Это имеет существенное значе-

ние в первую очередь для многоканатных подъемных установок со шкивами трения*.

Переходя к вопросу о возможности использования машины постоянного тока в качестве регулятора привода экскаваторов большой и средней мощности, следует отметить, что основным технологическим требованием, предъявляемым к приводу, является необходимость обеспечения

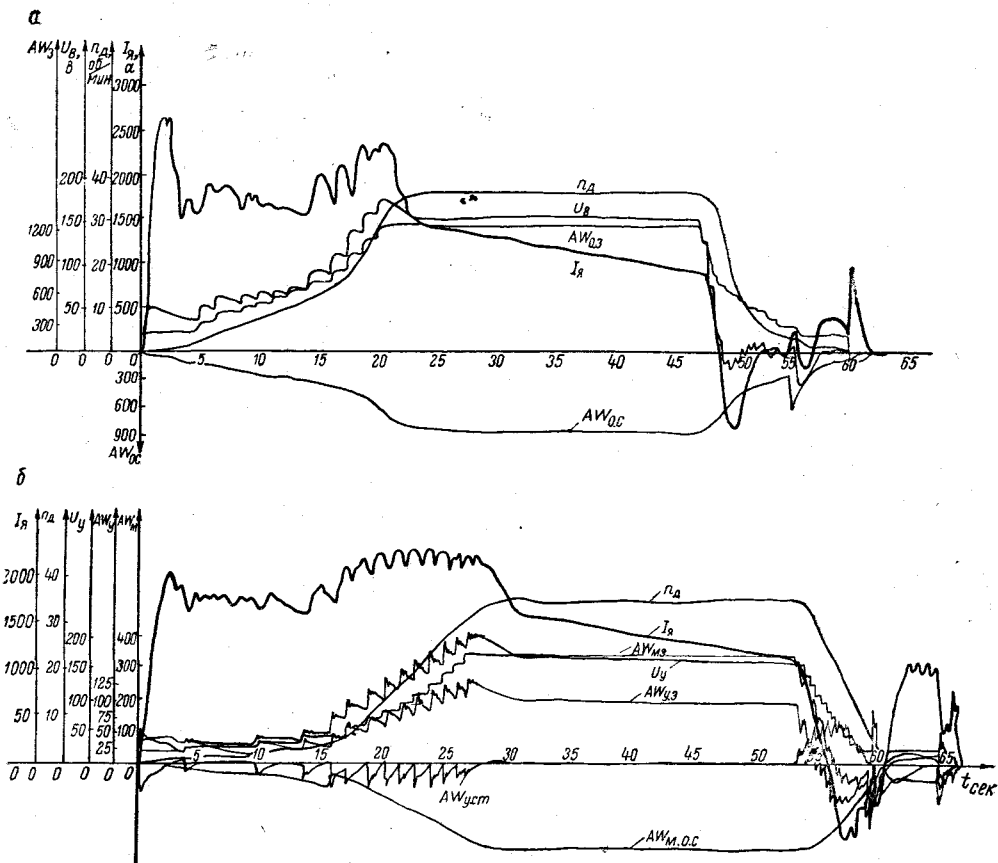


Рис. 2. Осциллограммы режимов работы автоматизированного привода подъемной машины:

а — с возбудителем-регулятором; б — с ЭМУ — ПМУ. I_a — ток главной якорной цепи; n_d — число оборотов подъемной машины; U_B и U_P — напряжение В-Р и ЭМУ; $AW_{0.3}$ и $AW_{0.с}$ — ампер-витки задающей и регулирующей обмоток В-Р; $AW_{y.з}$ и $AW_{y.ст}$ — ампер-витки задающей и стабилизирующей обмоток ЭМУ; $AW_{м.з}$ и $AW_{м.о.с}$ — ампер-витки задающей и регулирующей обмоток ПМУ

экскаваторной формы механической характеристики $n=f(M)$ и высокого быстродействия привода. Для удовлетворения этих требований система регулирования должна иметь отрицательную обратную связь по току нагрузки двигателя с отсечкой и отрицательную обратную связь по напряжению генератора.

Существующие схемы управления экскаваторным приводом Г-Д с ЭМУ или каскадом ЭМУ—ПМУ, как правило, строятся на электромагнитном принципе. Трудность настройки системы регулирования заклю-

* В приводе Г-Д многоканатных подъемных машин величина управляющих импульсов системы ограничена небольшой мощностью путевых командо-аппаратов, встроенных в регулятор хода машины.

чается в необходимости обеспечения достаточно больших ампер-витков токоограничивающей обмотки $AW_T \approx AW_{0.3}$ при токе упора $I_{я} \approx 2 I_{я,н}$ от относительно небольшой разности потенциалов, определяемой падением напряжения в якорной цепи Г-Д и напряжением сравнения.

В схемах, построенных на электромагнитном принципе, применение в качестве возбuditеля-регулятора обычной машины постоянного тока, обладающей небольшим коэффициентом усиления, очевидно, увеличило бы эти трудности, так как при этом возросла бы величина управляющих и регулирующих импульсов. При построении схемы управления на потен-

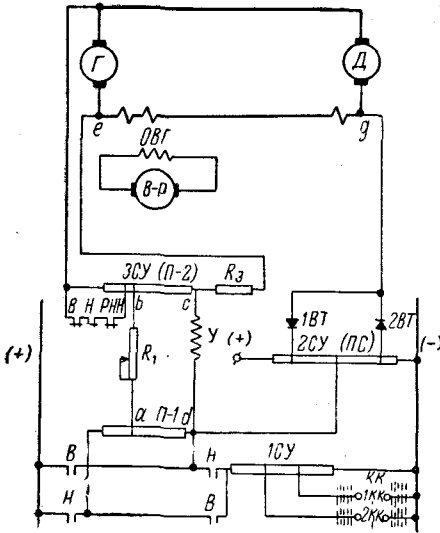


Рис. 3. Потенциометрическая схема управления экскаваторным приводом Г-Д с однообмоточным возбuditелем-регулятором

циометрическом принципе указанные параметрические трудности проявляются в значительно меньшей степени. Вариант такой схемы управления, разработанный лабораторией АТМ, представлен на рис. 3. Как видно из этой схемы, в контур $a-b-c-d$ обмотки управления $У$ введено два противоположно направленных потенциала — задающий U_z , и регулирующий U_p , совместное действие которых обеспечивает форсировку переходных процессов и надлежащее быстрее привода.

Для получения экскаваторной механической характеристики и ограничения тока двигателя при перегрузках в схему введена токоограничивающая цепь $d-g-e-c$, включенная параллельно обмотке управления. Ток в контуре $d-g-e-c-d$ протекает лишь в том случае, когда падение напряжений $I_{я}R_{ш}$ в главной якорной цепи больше напряжения сравнения $U_{ср}$, обеспечивая разма-

гничивание системы и соответствующее снижение скорости двигателя при перегрузках.

При $I_{я} < I_{отс}$, когда $I_{я}R_{ш} < U_{ср}$, токоограничивающий контур закрыт благодаря наличию в нем нелинейных элементов $1ВТ$ и $2ВТ$.

Рассмотренная система регулирования напряжения генератора и тока двигателя действует автоматически независимо от направления вращения и режима работы двигателя.

В лаборатории АТМ была создана и исследована модель экскаваторного привода с потенциометрической схемой управления. В качестве регулятора системы использовалась машина постоянного тока типа ПН-85* ($P_n = 6,8 \text{ квт}$, $U_n = 460 \text{ в}$, $I_{я} = 14,8 \text{ а}$, $n = 1460 \text{ об/мин}$). Для приближения параметров лабораторной установки к параметрам реального привода в цепь обмотки возбуждения генератора была введена индуктивность $L \approx 5 \text{ гн}$, что увеличило постоянную времени цепи до $T = 1 \text{ сек}$; в главную якорную цепь привода было включено добавочное сопротивление 1 ом^{**} , что позволило получить требуемое падение напряжения на

* Мощность машины ПН-85 достаточна для использования ее в качестве возбuditеля-регулятора привода экскаватора ЭКГ-8.

** Увеличение сопротивления якорной цепи обусловило некоторое уменьшение жесткости электромеханической характеристики (рис. 5; участок А—Б).

нагрузочном потенциометре токоограничивающего контура при относительно небольших токах нагрузки лабораторной установки.

При наладке схемы коэффициент форсировки был установлен $K_{\phi} = 2,5$, величина напряжения сравнения $U_{ср} = 25$ в.

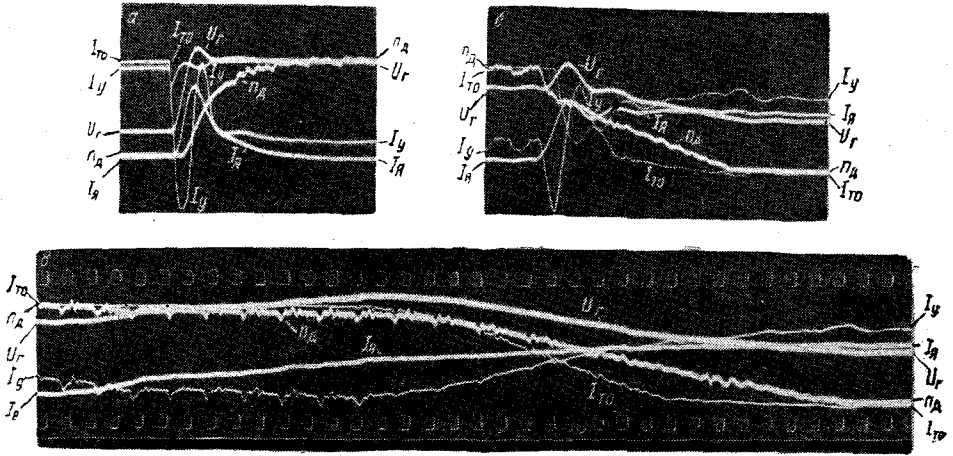


Рис. 4. Осциллограммы процессов одноступенчатого пуска:
 а — холостой ход; б — остановка двигателя при резком стопорении; в — медленное увеличение нагрузки (модель экскаваторного привода с В-Р)
 I_y — ток управления; $I_{гд}$ — ток токоограничивающей цепи

Как показали лабораторные испытания модели (рис. 4, 5), потенциометрическая схема управления, отличающаяся простотой и надежностью, может обеспечить требуемые статические и динамические характеристики привода экскаватора.

Результаты испытаний и исследований рассмотренных выше схем электромашинного управления приводом шахтного подъема и экскаваторов показывают весьма широкие возможности использования обычной машины постоянного тока в качестве возбудителя-регулятора в приводах Г-Д большой мощности.

В настоящее время намечилась тенденция применения в качестве регуляторов приводов Г-Д магнитных усилителей. Переходя к вопросу использования МУ в схемах управления приводом шахтных подъемных машин и экскаваторов, следует прежде всего остановиться на некоторых особенностях работы магнитного усилителя на индуктивную нагрузку, какой, по существу, является обмотка возбуждения генератора постоянного тока большой мощности.

Особенности работы МУ на индуктивную нагрузку сводятся к следующему. При всяком воздействии на цепи управления МУ имеет место динамическое перераспределение напряжения в силовой части схемы

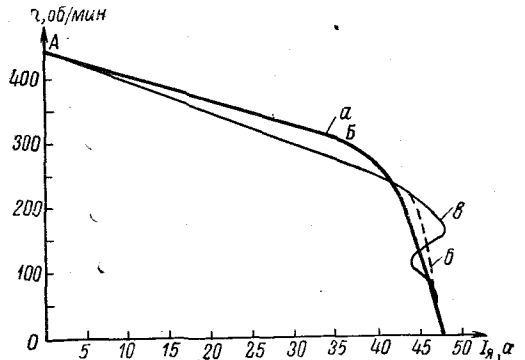


Рис. 5. Электромеханические характеристики (модель экскаваторного привода):
 а — статическая; б — динамическая; в — кривая тока при резком стопорении (по рис. 4, б)

сопровождающееся эффектом автофорсировки напряжения возбуждения генератора и соответственным уменьшением длительности переходного процесса * [5, 6].

Для примера на рис. 6 приведены осциллограммы изменения тока в обмотке возбуждения генератора привода поворота экскаватора типа

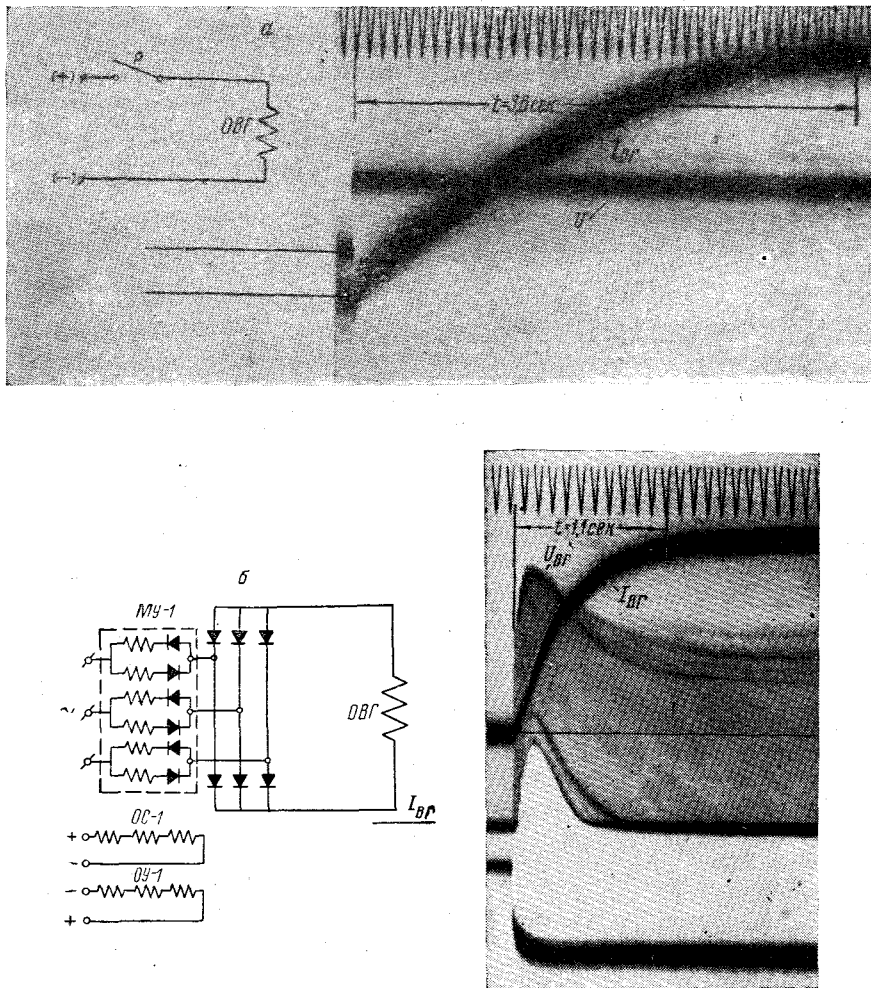


Рис. 6. Осциллограммы изменения тока возбуждения генератора типа МПЭ-14-12/4:

a — при включении обмотки на постоянное напряжение; *б* — при питании обмотки переменным током через МУ, собранные по трехфазной шестиэлементной схеме.

$i_{В.Г}$ — ток возбуждения генератора; $i_{У}$ — ток управления МУ; $U_{В.Г}$ — напряжение на обмотке возбуждения генератора

ЭКГ-8 при включении обмотки на постоянное напряжение и при питании ее переменным током через МУ, собранные по трехфазной, шестиэлементной схеме.

* Интенсивность автофорсировки различна в различных схемах возбуждения генератора. Наиболее резко она проявляется в схемах с МУ, имеющих отдельные выпрямители самонасыщения и нагрузки.

Как видно из осциллограмм (см. рис. 6, б), благодаря эффекту автофорсировки процесс устанавливается в три раза быстрее.

Перераспределение напряжения в переходном процессе объясняется следующим образом. Изменение тока в обмотке управления МУ ведет к изменению магнитного состояния железа сердечника, что, в свою очередь, обуславливает изменение реактивного сопротивления рабочих обмоток МУ. Этот процесс вследствие малой индуктивности цепей управления МУ протекает очень быстро (см. рис. 6, б, кривая I_y). За это время ток в рабочей обмотке МУ вследствие значительной индуктивности обмотки возбуждения генератора изменяется мало. Резкое уменьшение реактивного сопротивления рабочей обмотки МУ при мало изменившемся токе возбуждения приводит к снижению напряжения на рабочей обмотке МУ, что вызывает увеличение напряжения на входе выпрямительного моста и напряжения на нагрузке. По мере нарастания тока возбуждения происходит процесс обратного перераспределения напряжения на элементах силовой цепи.

При исследовании переходных процессов в приводе Г-Д с магнитными усилителями каскад МУ-Г в первом приближении можно рассматривать в виде одного аperiodического звена с эквивалентной электромагнитной постоянной времени

$$T_э = \frac{T_г}{\alpha},$$

где α — коэффициент автофорсировки,

$$\alpha = \frac{U_{в\max}}{U_в},$$

где $U_{в\max}$ — максимальное напряжение возбуждения генератора;
 $U_в$ — установившееся напряжение на обмотке возбуждения.

Если в схеме имеется отрицательная обратная связь по напряжению генератора, то коэффициент α учитывает и форсировку процесса возбуждения, обусловленную действием этой связи.

При наличии экспериментально снятых кривых $I_{в.г} = f(t)$ эквивалентная постоянная времени каскада МУ-Г может быть определена по времени установления процесса $t_{уст}$ как

$$T_э \approx \frac{t_{уст}}{3};$$

например, для осциллограммы (см. рис. 6, б) $T_э = \frac{1,1}{3} \approx 0,37$ сек.

При необходимости учета инерционности МУ каскад МУ-Г может быть представлен двумя последовательно соединенными аperiodическими звеньями с постоянной времени T_y цепи управления МУ и эквивалентной постоянной времени $T_э$ генератора.

Применительно к приводе Г-Д большой мощности использование эффекта автофорсировки позволяет по-новому подойти к построению и выбору параметров схем управления и регулирования, в частности, позволяет отказаться от введения в схему специальных форсирующих и стабилизирующих связей, обеспечивая необходимое быстродействие привода и благоприятный характер переходных процессов в системе за счет естественных свойств узла магнитный усилитель—обмотка возбуждения генератора.

При сохранении в схеме обратных связей действенность системы регулирования резко возрастает, что позволяет обеспечить необходимые

динамические и статические качества привода при меньших форсировках по ампервиткам обмоток управления и регулирования.

На рис. 7 представлена схема автоматического управления приводом экскаватора ЭКГ-8 с силовыми магнитными усилителями, построенная на указанных принципах*. Каждый трехфазный МУ, собранный из трех однофазных усилителей типа МУ-2, имеет обмотку смещения ОС и три обмотки управления: задающую ОУ, токоограничивающую ОТ и обмотку ОН отрицательной обратной связи по напряжению генератора. Введение в схему отрицательной обратной связи по току нагрузки

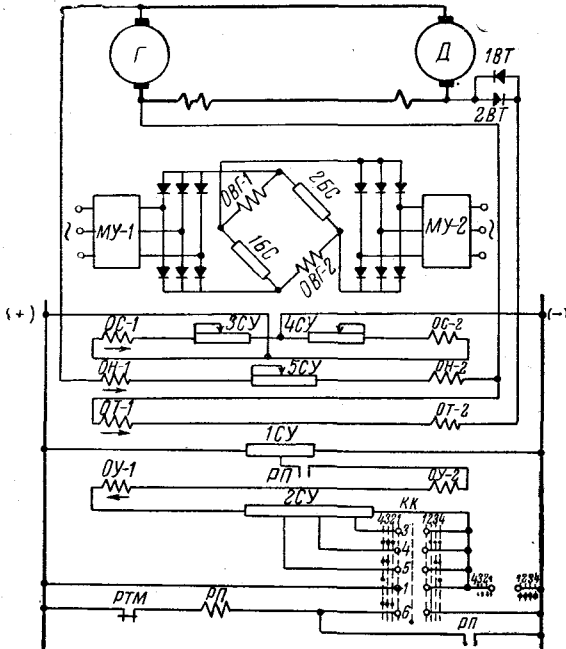


Рис. 7. Схема автоматического управления приводом механизма поворота экскаватора ЭКГ-8 с силовыми магнитными усилителями

с отсечкой обеспечивает получение экскаваторных механических характеристик привода. Отсечка действия токоограничивающей цепи создается за счет нелинейности вольт-амперных характеристик вентилях 1ВТ и 2ВТ. Задающая обмотка управления ОУ-1 и ОУ-2 включена потенциометрически на сопротивление 1СУ через регулируемое сопротивление 2СУ, ступени которого переключаются контактами командоконтроллера.

Особенностью схем управления приводами механизмов подъема и напора является обеспечение высокого быстродействия приводов за счет автофорсировки возбуждения. Отрицательная связь по напряжению генератора в этих схемах

отсутствует, что определяет меньшую величину ампер-витков задающей обмотки МУ и облегчает размагничивание приводов при перегрузках.

Другой особенностью схем управления этими приводами является введение отрицательной обратной связи по току нагрузки с отсечкой от двигателя подъема в схему управления возбуждением генератора напора.

Межприводная токорегулирующая связь обеспечивает автоматическое регулирование оптимального режима работы двигателей подъема и напора, что сокращает длительность процесса копания, обеспечивает лучшую защиту двигателей от перегрузки и создает предпосылки для автоматизации процесса экскавации.

Результаты испытаний, проведенных на стенде, созданном на базе четырехмашинного преобразовательного агрегата экскаватора ЭКГ-8 (рис. 8)**, дают основание полагать, что данная схема удовлетворит

* Схема разработана лабораторией АТМ в содружестве с конструкторским бюро Ижорского завода.

** При испытании схемы отрицательная обратная связь по напряжению генератора была отключена.

В качестве двигателя использовалась машина с маховым моментом 1100 кгм².

всем требованиям технических условий, отличаясь простотой, надежностью и высокими статическими, динамическими и эксплуатационными качествами.

Схемы управления приводом Г-Д шахтного подъема с магнитными усилителями могут быть построены аналогично схемам управления экскаваторным приводом, но с учетом особенностей работы подъемной установки. Следует однако отметить, что все возможные варианты реверсивных схем с МУ в приводе постоянного тока имеют весьма низкий к. п. д. (не превышающий 25%). При относительно небольшой мощности привода (например, в приводе экскаватора средней мощности типа ЭКГ-8) это не имеет существенного значения. В приводах Г-Д большой

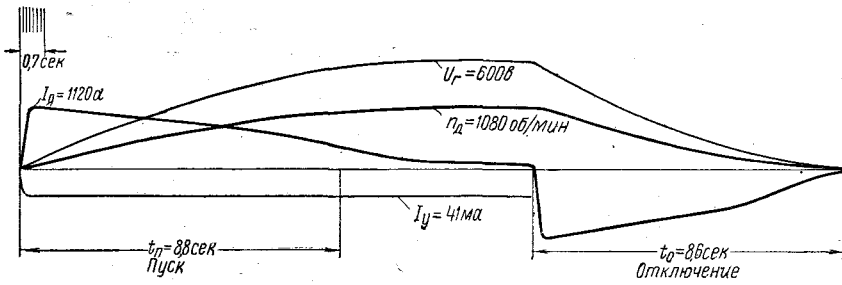


Рис. 8. Осциллограммы изменения тока управления I_y , напряжения генератора U_g , тока генератора $I_{я}$ и скорости двигателя n_d при пуске и отключении схемы

мощности, например для шахтного подъема (2000 квт и выше), применение магнитных усилителей в настоящее время связано с рядом технических трудностей и в первую очередь с трудностью изготовления МУ необходимой мощности. Кроме того, нестабильность характеристик реверсивного МУ делает затруднительной наладку работы привода подъема в отношении получения одинаковых скоростей движения машины при ходе вперед и назад.

Сравнение схем автоматического управления и регулирования приводом Г-Д шахтного подъема с электромашинными и магнитными усилителями позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время применительно к шахтному подъему более целесообразны схемы электромашинного управления. Из существующих схем электромашинного управления рациональной следует считать схему с возбудителем-регулятором (нормальной машиной постоянного тока), отличающуюся простотой, надежностью и хорошими регулировочными качествами.

Применительно к приводу экскаваторов средней мощности более прогрессивными являются схемы управления с магнитными усилителями, надежность работы которых в данном случае имеет решающее значение.

Выводы

1. Существующие схемы управления и регулирования приводом Г-Д шахтного подъема и экскаваторов, построенные на базе специальных электромашинных усилителей, чрезмерно сложны, переходные процессы в системах имеют неблагоприятный характер; в целом, работа приводов с электромашинными усилителями не отличается надежностью и стабильностью.

2. Применение в качестве регуляторов привода Г-Д шахтного подъема и экскаваторов электромашин нормального исполнения или магнит-

ных усилителей позволяет создать более простые, надежные и высококачественные схемы управления и регулирования.

3. Применительно к приводу по системе Г-Д шахтного подъема наиболее перспективны схемы электромашинного управления, в которых в качестве регулятора используется электромашинная постоянная тока в нормальном исполнении.

4. Применительно к приводу по системе Г-Д экскаваторов средней мощности прогрессивны схемы управления, построенные на базе магнитных усилителей; схемы электромашинного управления с однообмоточным возбудителем-регулятором могут найти применение при модернизации действующих экскаваторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голован А. Г., Яковлев В. И., Липатов Д. Н. Электропривод мощных экскаваторов. «Электричество», 1956, № 2.
2. Чичиванов Р. П. Исследование системы электромашинного управления автоматизированным электроприводом Г-Д для шахтной подъемной машины. Канд. диссертация. Фонды ЛГИ, 1954.
3. Чичиванов Р. П. Влияние параметров одноконтурной системы регулирования на динамические свойства привода Г-Д. Зап. ЛГИ, 1959, т. XXXIX, вып. 1.
4. Малиновский Н. Я., Чичиванов Р. П., Благодиров В. И., Киричок Ю. Г., Попович Ф. Н. Автоматическое управление электроприводом подъема с возбудителем-регулятором. «Горный журнал», 1959, № 3.
5. Бессонов Л. А. Автоколебания в электрических цепях со сталью. ГЭИ, 1958.
6. Чичиванов Р. П. Применение электромашин нормального исполнения и магнитных усилителей в качестве регуляторов привода Г-Д для шахтного подъема и экскаваторов. Сб. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», ГЭИ, 1960.