Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института, том XXIX, вып. I, 1953 г.

АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОДНОКОВШЕВОГО ЭКСКАВАТОРА С НЕПРЕРЫВНЫМ ЭЛЕКТРОМАШИННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ[1]

Канд. техн. наук Н. М. Караваева

Работа главных механизмов одноковшевого экскаватора обычно протекает в постоянно меняющихся условиях, с частыми остановками и включениями, число которых достигает 700 и более в час. Механизмы, обеспечивающие процесс экскавации (подъемный и напорный), имеют резкие колебания нагрузки с неравномерностью чередования пиковых толчков мощности или тока. Величина толчков мощности достигает двух-трехкратных значений от среднего в периоды заклинивания ковша.[2]

Такой режим работы одноковшевых экскаваторов обусловливает необходимость непрерывного автоматического регулирования скорости рабочих двигателей в зависимости от величины нагрузочного момента. Законом непрерывного регулирования является форма статических характеристик рабочих механизмов экскаватора. Исследование оптимальной формы этих характеристик и закона изменения статических усилий привело к выводу, что в пределах рабочих нагрузок регулирование направлено на поддержание постоянства скорости рабочего двигателя, а при предельных нагрузках регулирование необходимо для ограничения величины максимального момента как меры защиты двигателя от повреждений (перегрузок).

В настоящее время широкое распространение получил экскаваторный привод системы генератор-двигатель с непрерывным электромашинным регулированием. В этой системе изменение нагрузки по моменту и скорости можно заменить регулированием по току и напряжению, так как число оборотов двигателя при неизменном токе возбуждения практически пропорционально напряжению генератора, а вращающий момент двигателя при постоянном магнитном потоке пропорционален величине тока в якоре. Электрическая связь между током нагрузки и рабочим напряжением осуществляется при помощи отдельных регулирующих (управляющих) обмоток. Различное сочетание параметров этих обмоток, их конструктивное выполнение и местоположение в системе возбуждения приводят к многочисленным вариантам, полное изучение которых возможно лишь на основе их классификации.

[1] В статье использованы материалы диссертации автора «Системы непрерывного электромашинного регулирования электрического оборудования на открытых горных разработках», 1950 г.

[2] Или работы на так называемый «упор».

Проведенный нами анализ существующих в настоящее время систем (приводы экскаваторов СЭ-3, ЭГЛ-15, ЭШ-75/10) дал возможность предложить классификацию для электроприводов одноковшевых экскаваторов с непрерывным электромашинным регулированием. В основу классификации положены два признака: принцип регулирования и система возбуждения, в которой находятся регулирующие связи.

По первому признаку системы могут быть выполнены с регулированием по току, напряжению, току и напряжению. Системы с регулированием по напряжению не удовлетворяют требованиям экскаваторного привода в отношении ограничения максимального момента, поэтому принимаем: *I* — регулирование по току нагрузки; *II* — регулирование по нагрузочному току и рабочему напряжению.

Каждый класс можно подразделить на два подкласса в зависимости от конструктивного выполнения регулирующей обратной связи — одноступенчатой или двухступенчатой.

По второму признаку системы делятся на две группы: *А* — регулирующие связи находятся в системе возбуждения генератора; *В* — регулирующие связи находятся в системе возбуждения двигателя. В зависимости от мощности привода регулирующие связи находятся непосредственно в цепи генератора или возбудителя, или подвозбудителя. Вследствие этого каждая из групп *А* и *В* имеет три подгруппы: *а, б, в, г, д, е*. Подгруппы отличаются друг от друга значением коэффициента усиления системы, который возрастает от подгруппы *а* к подгруппе *в*. В том же порядке увеличивается точность и быстрота регулирования.

Классификация наглядно представлена таблицей (рис. 1), в которой римскими цифрами обозначены классы, арабскими — подклассы, прописными русскими буквами обозначены группы, строчными — подгруппы. Подклассы и подгруппы обозначаем в индексах классов и групп или отдельно без указания последних. Например: система класса *I* подкласса *2* группы *А* подгруппы *б* обозначается: $I_2 — А_б$ или *2 — б*.

Сочетание отдельных подгрупп и подклассов дает 24 варианта систем экскаваторного привода, число которых может возрасти за счет различного конструктивного выполнения регулирующих машин. Возбудители или подвозбудители в подгруппах *б, в, д, е* могут быть выполнены в виде машин нормального исполнения или электромашинными усилителями и регуляторами. Высокий коэффициент усиления определяет значительные преимущества систем с электромашинными усилителями.

Предложенная классификация не учитывает выполнения самих регулирующих машин, т. е. относится не к регуляторам непрерывного действия, а лишь к системам привода. Поэтому в качестве характеристики отдельных классов взяты такие параметры, как коэффициент эффективности статических характеристик — γ и аналитическое выражение эквивалентной постоянной времени — $T_э$. Коэффициент эффективности характеризует скоростной режим работы привода в установившихся процессах. Его величина пропорциональна средней рабочей скорости и считается приемлемой в эксплуатационных условиях от 0,7 и выше. Эквивалентная постоянная времени является характеристикой поведения привода в неустановившихся режимах. Выражение ее, выведенное из уравнения переходного процесса, позволяет судить о влиянии отдельных регулирующих связей на скорость протекания переходных процессов.

Система возбуждения		Класс I. Регулирование по току		Класс II. Регулирование по току и напряжению	
		1 одноступенчатая $\gamma_m = 0{,}65$ $T_э = \sqrt[n]{BT_1T_2 \dots T_{n-1}}$	2 двухступенчатая $\gamma_m = 0{,}9 - 0{,}95$ $T_э = \sqrt[n]{BT_1T_2 \dots T_{n-1}}$	3 одноступенчатая $\gamma_m = 0{,}72 - 0{,}86$ $T_э = \sqrt[n]{\frac{BT_1T_2 \dots T_{n-1}}{1 - K_e K_{ce}}}$	4 двухступенчатая $\gamma_m = 0{,}9 - 0{,}95$ $T_э = \sqrt[n]{\frac{BT_1T_2 \dots T_{n-1}}{1 - K_e K_{ce}}}$
А. Генератора	а цепь генератора	Г Д	Г Д 3-5 м³	Г Д 3-5 м³	Г Д
	б цепь возбудителя	Г Д ВР	Г Д ВР ВР ... 15(24) м³ ЭМУ ... 3-15(24) м³ ЭМР ..... 3(5) м³	Г Д ВР	Г Д ВР
	в цепь подвозбудителя	Г Д В ПВР	Г Д В ПВР ПВР, ЭМУ > 24 м³ ЭМР ..... 15(24) м³	Г Д В ПВР	Г Д В ПВР
В. Двигателя	г цепь генератора	Г Д	Г Д	Г Д	Г Д
	д цепь возбудителя	Г Д ВР	Г Д ВР	Г Д ВР	Г Д ВР
	е цепь подвозбудителя	Г Д ПВР В	Г Д ПВР В	Г Д ПВР В	Г Д ПВР В

Рис. 1

1. Характеристика классов

Системы привода класса *I* с отрицательной связью по току имеют мягкую механическую характеристику с падением скорости до нуля при максимальной перегрузке.

На рис. 2 изображены различные виды механических характеристик — числа оборотов как функции нагрузочного тока — $n = f(I)$ %. Системы подкласса *1* с одноступенчатой связью по току не получили практического применения из-за низких рабочих скоростей, так как максимальная величина коэффициента эффективности достигает лишь 0,65 (рис. 2, кривая I_1).

Для систем подкласса *2* с двухступенчатой связью по току характерно незначительное действие токовой обмотки в пределах рабочих нагрузок. Изменение статического момента не влияет на скорость рабочего двигателя. Значение коэффициента эффективности на первой ступени достигает величины 0,95—0,98 (рис. 2, кривая I_2 от *a* до *d*). Интенсивное действие таковой обмотки наступает при предельных нагрузках, механическая характеристика становится мягкой, скорость быстро падает до нуля (рис. 2, кривая I_2 от *d* до *c*).

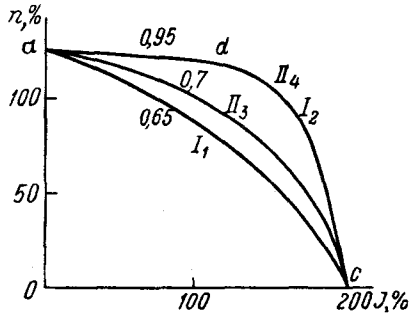


Рис. 2

Такая форма характеристики обеспечивает примерное постоянство скорости на первой ступени и автоматическое изменение скорости от нагрузки на второй. Непрерывное регулирование сводится в этом случае к ограничению величины максимального момента. Скорость протекания переходных режимов, а также точность и быстрота регулирования возрастают от подгруппы *а* к подгруппе *в*, устойчивость же систем нарастает в обратном порядке. Скорость протекания переходных режимов в системах с двухступенчатой связью по току увеличивается по сравнению со схемами подкласса за счет улучшения кривой заполнения пускового тока. В случае применения в качестве возбудителей для подгруппы *б* электромашинных усилителей и регуляторов передающие звенья становятся практически безинерционными.

Высокий коэффициент эффективности механических характеристик, сравнительно небольшая длительность переходных режимов, удовлетворительные качества непрерывного регулирования, а также невысокая сложность конструктивного выполнения позволяют рекомендовать системы подкласса 2 для практического применения в экскаваторном приводе.

Системы привода класса *II* характеризуются увеличением числа регулирующих связей: кроме отрицательной связи по току, вводится обратная связь по напряжению. В системах подкласса *3* обратные связи одноступенчатые; при этом обратная связь по напряжению является положительной, а по току — отрицательной. Такое сочетание регулирующих обмоток обеспечивает мягкую механическую характеристику с максимальным коэффициентом эффективности 0,86. На практике осуществлен экскаваторный привод по схеме *3 — а* с коэффициентом эффективности 0,72 (рис. 2, кривая II_3). Положительная связь по напряжению увеличивает значение приведенной постоянной процесса возбуждения. Так, для

систем подкласса *2* выражение постоянной $T_{э2}$ можно представить как

$$T_{э2}=\sqrt[n]{BT_1T_2\dots T_{n-1}},$$

где B — электромеханическая постоянная привода;
$T_1, T_2 \dots T_{n-1}$ — постоянные времени отдельных обмоток возбуждения.

Для систем подкласса *3* выражение постоянной имеет вид

$$T_{э3}=\sqrt{\frac{BT_1T_2\dots T_{n-1}}{1-K_eK_{ce}}},$$

где K_eK_{ce} — коэффициент обратной связи по напряжению, величина которого меньше единицы.

Таким образом, с введением положительной связи по напряжению длительность переходных процессов возрастает, а точность и быстрота регулирования уменьшаются.

На рис. 3 показаны кривые разгона; буквами T_2, T_3 обозначены постоянные времени подклассов *2*, *3*, а буквами $t_р$ — время разгона этих подклассов. Как следует из рисунка, $T_2 < T_3$, а $t_3 > t_2$.

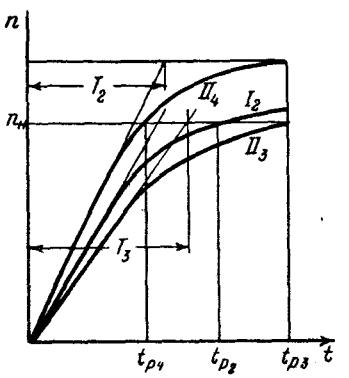


Рис. 3

Размещение нескольких регулирующих обмоток вызывает увеличение размеров машин, что является особенно нежелательным для систем *3—а*, когда обратные связи находятся в цепях генератора. Размеры трехобмоточного генератора на 30% больше машин нормального исполнения.

Сравнение основных данных систем подкласса *3* с системами подкласса *2* (снижение коэффициента эффективности на 25%, увеличение величины постоянной времени и размеров машин) приводит к выводу, что системы подкласса *3* не имеют будущего и являются уже пройденным этапом в развитии электропривода экскаваторов.

Системы подкласса *4* являются дальнейшим развитием систем подкласса *2* путем повышения качества регулирования. Кроме отрицательной связи по току, вводится отрицательная связь по напряжению. Токовая обмотка необходима для регулирования скорости в функции нагрузки, обмотка по напряжению служит для поддержания постоянного напряжения генератора. В противоположность ранее рассмотренному подклассу *3* обе обмотки действуют независимо друг от друга и направления их действий различны. Коэффициент эффективности характеристик находится в пределах 0,7—0,98 (рис. 2, кривая II_4). Величина приведенной постоянной времени $T_{э4}$ уменьшается по сравнению с $T_{э2}$, $T_{э3}$ подклассов *2*, *3* $\left(T_{э4}=\sqrt[n]{\frac{BT_1T_2\dots T_{n-1}}{1+K_eK_{ce}}}\right)$ за счет параметров обратной связи по напряжению $(1+K_eK_{ce})>1$. Для сокращения времени пуска и торможения можно использовать в качестве форсировочной обмотку напряжения (рис. 3, кривая II_4, $t_{р4} < t_{р2}$).

Как видно из рис. 4, пределы непрерывного регулирования являются наименьшими (заштрихованная область между кривыми *4—4*). Недостатком систем подкласса *4* является сравнительно высокая сложность их конструктивного выполнения. Практическое применение для экскаваторного привода эти системы могут найти там, где требуется высокая скорость протекания переходных процессов. В известных условиях (подгруппа *а*) с ними могут конкурировать системы подкласса *2*, как более простые в конструктивном выполнении.

При рассмотрении по группам необходимо указать, что наибольшее распространение получили и получат в дальнейшем для экскаваторного привода системы группы *А*. Это объясняется спецификой размещения и условиями работы экскаваторного привода. С увеличением мощности экскаваторов широкое применение должны получить подгруппы *б* и *в*.

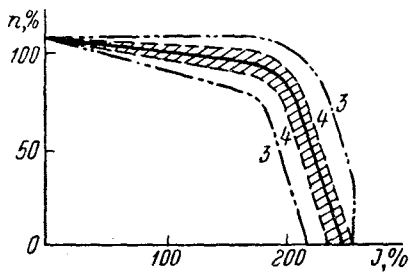


Рис. 4

Таким образом, развитие систем экскаваторного привода идет по двум направлениям: 1) улучшения общих свойств привода (формы механических характеристик, длительности протекания переходных режимов); 2) улучшения регулирующих свойств системы привода (безинерционные регулирующие звенья). Высокие свойства в системах второго направления обеспечиваются применением машин с высоким коэффициентом усиления.

2. Рациональные системы экскаваторного привода

На основании рассмотренной классификации можно сделать ряд предложений о рациональных системах привода для различных моделей механических лопат.

Карьерные экскаваторы с ковшом 3—5 $м^3$ предназначаются в основном для добычных работ и транспортных систем вскрытия. Режим работы их характерен большим процентом (60—80%) неустановившегося движения. Поворотный механизм работает на одних периодах ускорения и замедления, так как средний угол поворота при погрузке в транспортные сосуды составляет 90—110°.

Эффективность систем привода в отношении производительности экскаватора оценивается длительностью цикла. Поэтому для данной модели экскаваторов следует ожидать повышения теоретической производительности за счет сокращения времени протекания переходных режимов при повороте. Режим работы подъемного и напорного механизмов зависит от геологических и горнотехнических условий месторождения и определяет степень жесткости механической характеристики. При работе в легких грунтах в пределах рабочих нагрузок имеем жесткую механическую характеристику, вследствие чего диапазон непрерывного регулирования сокращается. Регулирование необходимо лишь для ограничения величины максимального момента. В тяжелых грунтах статический момент изменяется в широких пределах.

Для повышения коэффициента использования рабочего времени точность и быстрота регулирования должны быть выше. В транспортных системах разработок общий коэффициент использования рабочего времени экскаватора невысок (0,5—0,7), поэтому повышение эксплуатационной производительности за счет качества регулирования будет незначительным. Следовательно, при выборе системы привода для карьерных

экскаваторов можно ориентироваться на менее точные, но более надежные в эксплуатации системы.

Для привода трехкубовых экскаваторов, исходя из мощности рабочих двигателей 50—200 *квт*, могут быть использованы системы подгрупп *а* и *б*. В настоящее время привод экскаватора СЭ-3 выпускается оборудованным по системе *3—а*. Между тем из проведенного анализа следует, что наиболее эффективной и менее сложной в подгруппе *а* является схема *2—а*. В случае ее применения по сравнению с действующей схемой привода получаем следующие преимущества: а) увеличение технической производительности подъемного механизма за счет повышения величины средней скорости до 25%; б) увеличение теоретической производительности вследствие сокращения длительности поворота; в) улучшение условий эксплуатации экскаватора за счет качества регулирования; г) уменьшение размеров машин путем замены специального оборудования нормальным.

Мощность привода вскрышных экскаваторов с емкостью ковша 6—8 $м^3$ находится в пределах 60—250 *квт*. Условия работы их подобны карьерным экскаваторам. В связи с увеличением мощности привода можно рекомендовать для них в качестве рациональной систему *2—б* с электромашинным усилителем вместо применяемой схемы *3—а*. Достоинства системы *2—б* состоят: а) в сокращении длительности цикла; б) малой мощности управления, что обусловливает более полную автоматизацию процессов разгона и торможения; в) лучшей загрузке рабочих двигателей за счет возможности применения регулирующей взаимосвязи между двигателями подъема и напора. К числу недостатков относятся: конструктивная сложность схемы, невысокая надежность в эксплуатационных условиях, требование высококвалифицированного обслуживающего персонала.

Мощные вскрышные экскаваторы с ковшом емкостью 15—25 $м^3$ применяются при бестранспортных системах вскрытия. Режим работы главных механизмов характеризуется большим процентом установившегося движения. Для поворотного механизма имеем сокращение неустановившихся режимов до 25—50% от времени поворота. Коэффициент использования рабочего времени экскаватора при работе в отвал достигает значения 0,9. Длительность цикла находится в пределах 45—50 сек., следовательно, сокращение времени поворота даже на несколько процентов приведет к повышению производительности. На режим работы подъемного и напорного механизмов сопротивление грунта оказывает меньшее влияние. Возможность отдельных кратковременных перегрузок с увеличением высоты забоя возрастает. Непрерывное регулирование необходимо в основном для ограничения величины максимального момента. Длительность переходных режимов в подъемном двигателе возрастает до одной секунды. Следовательно, для мощных вскрышных экскаваторов имеет значение повышение скорости протекания переходных режимов как для подъемного, так и для поворотного двигателей.

При мощности привода 150—1000 *квт* для данных моделей могут найти применение системы подгрупп *б, в*. Применение систем подгруппы *а* связано с тяжелыми аппаратами управления. Регулирующие возбудители в виде машин нормального исполнения могут быть использованы по схеме *2—б*, когда число регулирующих обмоток минимально. К достоинствам этой системы относятся: конструктивная простота изготовления, надежность схемы привода в производственных условиях, высокий коэффициент эффективности механических характеристик и практическая безинерционность регулирующих звеньев.

Система *4—б* с электромашинным усилителем при том же коэффициенте эффективности характеристик обеспечивает, по сравнению со схемой *2 — б*, при нормальном исполнении машин повышенную скорость протекания переходных режимов за счет введения форсировочной обмотки, более высокие качества регулирования и лучшую загрузку рабочих двигателей. Уменьшение мощности управления для этих систем не имеет решающего значения, так как последняя вообще не является большой при квадратичном возбуждении. Применение электромашинных регуляторов возможно только по системам подгруппы *в* (мощность регулятора 1—2 *квт*). Это вызывает усложнение всей системы привода. Увеличение числа последовательно работающих звеньев приводит к меньшей надежности системы в производственных условиях, поэтому электромашинные регуляторы не получили применения для мощных вскрышных экскаваторов.

Выводы

1. Системы экскаваторного привода с непрерывным электромашинным регулированием отличаются большим разнообразием. Предлагаемая классификация позволила выявить достоинства и недостатки отдельных систем, показала перспективу их развития и ожидаемые свойства отдельных систем электропривода.

2. Дальнейшее развитие привода экскаваторов возможно только по группе *А* подклассов *2* и *4*. В настоящее время эффективными системами для карьерных экскаваторов можно считать системы подкласса *2 — а* и *2 — б* с электромашинным регулятором, а для мощных вскрышных лопат схемы *2 — б* с возбудителем нормального исполнения и *4 — б* с электромашинным усилителем.

3. Окончательный выбор оптимальной системы экскаваторного привода может быть сделан только при строгом учете геологических и горнотехнических условий месторождения, применяемых систем разработки, типовых графиков нагрузки, технических условий регулирования и экономических показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алаторцев С. А. Рудничная электроэнергетика открытых горных разработок. Металлургиздат, 1950.
2. Бычков В. П. Переходные процессы в системе генератор-двигатель с ограничивающей механической характеристикой двигателя. «Электричество», 1951, № 6.
3. Шклярский Ф. Н. Электрификация экскаваторов, ч. I и II, Горное изд-во, 1934.
4. Крайцберг М. И. Применение управляемых генераторов постоянного тока для экскаваторов. «Электричество», 1951, № 4.