

## СИСТЕМА Г-Д С ТОКОВОЙ ОТСЕЧКОЙ ДЛЯ ЭКСКАВАТОРНОГО ПРИВОДА

*Н. М. Караева*

Решающим требованием для привода одноковшевых экскаваторов является создание оптимальной формы механической характеристики. В настоящее время для экскаваторов с емкостью ковша 3—5 м<sup>3</sup> нашла применение система трехобмоточный генератор-двигатель ТГ-Д. Генератор, имеющий три обмотки возбуждения (рис. 1), создает падающую «экскаваторную» характеристику. Управление приводом осуществляется изменением тока задающей обмотки 1. Отрицательная одноступенчатая связь по току — обмотка 3 — определяет падающую форму механической характеристики при перегрузках. Положительная связь по напряжению — обмотка 2 — обеспечивает высокий коэффициент заполнения (0,7—0,8).

К недостаткам этой системы относится: 1) неполное использование мощности генератора; 2) плохая управляемость привода при торможении; 3) неудачные регулировочные характеристики.

В перспективе развития привода этого класса экскаваторов намечалось применение системы с электромагнитными усилителями или ртутных выпрямителей с магнитным управлением. Опыт эксплуатации мощных шагающих экскаваторов показал ненадежность системы с ЭМУ в производственных условиях. Преимущества их в отношении скорости протекания переходных процессов и малой мощности управления для экскаваторов средней мощности не являются решающими.

В данной статье рассматривается система привода генератор-двигатель с токовой отсечкой в цепи генератора (рис. 2).

При нормальном режиме ампервитки генератора равны ампервиткам задающей обмотки 1

$$a\omega_r = a\omega_1.$$

При перегрузках вступает в действие обратная связь по току — обмотка 2

$$a\omega_r = a\omega_1 - a\omega_2.$$

В предложенной системе стабилизирующие звенья отсутствуют, число обмоток по сравнению с трехобмоточным генератором сокращается. Механические характеристики можно получить с любым коэффициентом заполнения.

Анализ системы Г-Д с токовой отсечкой проводится в сравнении с системой ТГ-Д.

Для системы ТГ-Д имеем следующее уравнение переходного процесса

$$A^{II} B p^2 e + A^{III} p e + (1 - k_{ш}) e = u_1 k_1 + h - A^{IV} I_{ст} R_0. \quad (1)$$

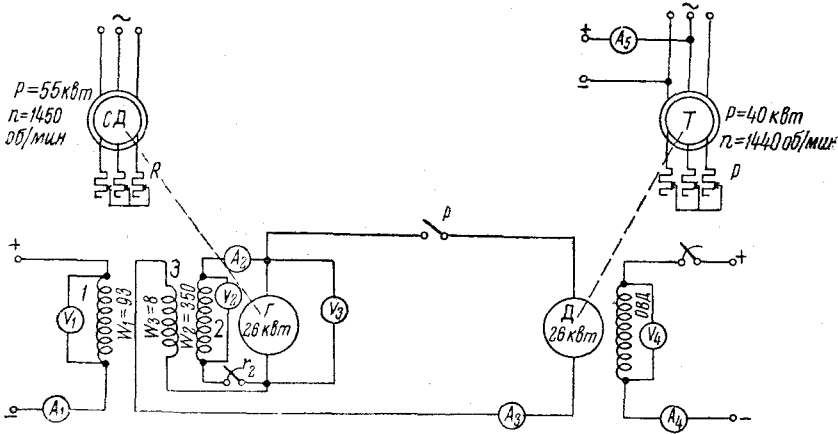


Рис. 1. Генератор с тремя обмотками возбуждения:  
СД — приводной двигатель; Т — электродинамический тормоз

Коэффициенты при переменных зависят от обмоточных данных и даны в приложении I.

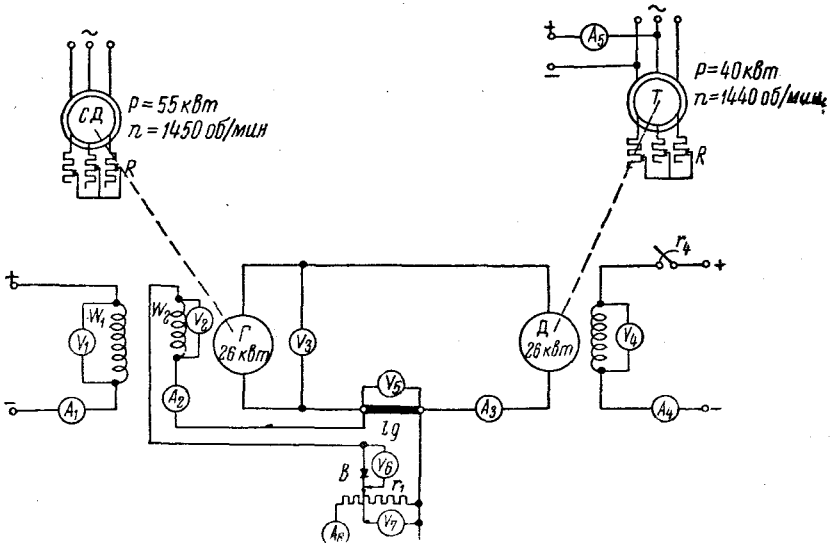


Рис. 2. Система привода генератор-двигатель с токовой отсечкой в цепи генератора:

СД — приводной двигатель; Т — электродинамический тормоз

Эквивалентная постоянная времени генератора

$$T_{э.г} = \sqrt{\frac{B(T_{1ш} + A^V T_c)}{1 - k_{ш}}}$$

Скоростная характеристика

$$n = \frac{u_1 k_1 + h}{(1 - k_{ш}) c} - \left( 1 + \frac{\lambda k_c + \delta k_{ш}}{1 - k_{ш}} \right) \frac{I_{кр} R_0}{c}. \quad (2)$$

При подсчете числа оборотов по формуле (2) значения  $h$  могут быть от нуля до  $h_0$  — отрезок, соответствующий ампервиткам холостого хода. Ток короткого замыкания определяется по формуле (2) при скорости, равной нулю,

$$I_{к} = \frac{u_1 k_1 + h}{R_0 (1 - k_{ш} + \sigma k_{ш} + \lambda k_c)}. \quad (3)$$

Для вычисления тока короткого замыкания по формуле (3) следует брать  $h = h_0$ ;  $k_{ш}$  и  $k_1$  — для режима холостого хода,  $k_c$  — из режима короткого замыкания.

Если выразить

$$i_{ш_0} r_{ш} = u_0; \quad i_{ш_0} \omega_{ш} = \frac{\psi a \omega_0}{\psi + 1};$$

$$\psi = \frac{a \omega_{ш_0}}{a \omega_1},$$

то выражение тока короткого замыкания можно представить в виде

$$I_{к} = \frac{\beta_1 a \omega_0 + h_1 (\psi + 1)}{(\psi + 1) (R_0 + \beta_k \omega_c) - r_d \psi \beta_1 \frac{a \omega_0}{u_0}}, \quad (3')$$

где  $\beta_k$  соответствует режиму короткого замыкания;  $\beta_1$ ;  $h_1$  соответствуют режиму работы с нормальной скоростью.

При  $h_1 = 0$  и  $\beta_1 = \beta_k$ , что определяет работу генератора на ненасыщенной части характеристики холостого хода, ток короткого замыкания

$$I_{к} = \frac{a \omega_0}{(\psi + 1) \left( \frac{R_0}{\beta_k} + \omega_c \right) - r_d \psi \frac{a \omega_0}{u_0}}. \quad (3'')$$

Для предварительных расчетов можно пользоваться эмпирической формулой

$$I_{к} = \frac{a \omega_0 + \frac{h_0}{\beta_k}}{(\psi + 1) \omega_c}, \quad (4)$$

где  $\beta_k$  — тангенс угла наклона прямолинейной части характеристики генератора;

$h_0$  — отрезок, отсекаемый на оси ординат при  $a \omega = a \omega_0$ .

Погрешность в расчетах по формуле (3') в сравнении с формулой (4) находится в пределах 5%.

При рассмотрении системы Г-Д с токовым узлом принимаем, что серийная обмотка выполнена с большим количеством витков, поэтому величина ее сопротивления  $r_c$  значительно превышает сопротивление шунта  $r_d$ . Ток, протекающий через шунтирующее сопротивление, можно принять равным току якорной цепи. Этот случай будет типичным для промышленной установки привода.

Дифференциальное уравнение переходного процесса в этом случае имеет вид

$$A^I B p^2 e + A^{II} p e + e = u_1 k_1 + h - A^{III} I_{CT} R_0 + k_c u_{CP}. \quad (5)$$

Эквивалентная постоянная времени не зависит от обратной связи

$$T_{ЭГ} = \sqrt{B(T_1 + T_2)}.$$

Скоростная характеристика

$$n = \frac{1}{c} (u_1 k_1 + h + u_{CP} k_c) - (1 + \varphi k_c) \frac{I_{CT} R_0}{c}, \quad (6)$$

где  $\varphi = \frac{r_d}{R_0}$ ;

$$R_0 = r_{я.г} + r_{я.д} + r_d.$$

Величина тока короткого замыкания

$$I_K = \frac{1}{(1 + \varphi k_c) R_0} (u_1 k_1 + h + u_{CP} k_c). \quad (7)$$

Основным параметром для узла токовой отсечки является величина шунтирующего сопротивления  $r_d$ , которая определяется выражением тока короткого замыкания,

$$r_d = \frac{\frac{i_1 \omega_1}{\omega_c} r_c + \frac{h}{k_c} + u_{CP} - I_K \frac{r_{я}}{k_c}}{I_K \left(1 + \frac{1}{k_c}\right)}. \quad (8)$$

При достаточно большом числе витков серийной обмотки  $\frac{1}{k_c}$  стремится к нулю, а выражение шунтирующего сопротивления упрощается (см. приложение 2)

$$r_d = \frac{\frac{i_1 \omega_1}{\omega_c} r_c + u_{CP}}{I_K}. \quad (8')$$

Анализ коэффициентов дифференциальных уравнений (1) и (5) показывает, что в рассматриваемых системах всегда имеют место затухающие переходные процессы.

В обеих системах перепад скорости не равен нулю, т. е. регулирование является статическим. Величина перепада скорости больше в системе с трехобмоточным генератором, поэтому здесь механические характеристики мягче,

$$\left(1 + \frac{\sigma k_{ш} + \lambda k_c}{1 - k_{ш}}\right) > (1 + \varphi k_c).$$

На рис. 3 изображены кривые механических характеристик для системы трехобмоточный генератор-двигатель, полученные экспериментальным путем. При изменении тока возбуждения независимой обмотки  $i_1$  кривые  $n = f(I)$  характеризуются изменением величины тока короткого замыкания  $I_K$  и скорости холостого хода  $n_0$ . При этом ток короткого замыкания изменяется более интенсивно, чем величина пограничной скорости. Так, при уменьшении  $i_1$  на 50% величина  $I_K$  сократилась

на 40%, а  $n_0$  уменьшилось лишь на 20%. Существенным фактором, влияющим на форму статических характеристик в этой системе, является

ток возбуждения двигателя  $i_d$ . При недовозбуждении (кривая 1) искаженные формы кривой получаются в зоне малых нагрузок, при перевозбуждении (кривая 2) — в зоне перегрузок.

Регулировочные характеристики в системе Г-Д с токовой отсечкой можно получить путем изменения величины тока возбуждения  $i_d$ , величины сопротивления  $r_d$  и напряжения сравнения  $u_{cp}$  (рис. 4).

Как показывает анализ уравнений (6) и (7), при одновременном регулировании тока возбуждения и напряжения сравнения можно получить кривые  $n = f(I)$  с практически неизменным движущим моментом. Идентичные кривые получаются при работе на криволинейной части характеристики холостого хода генератора.

Как следует из выражения (6), угловой коэффициент механической характеристики

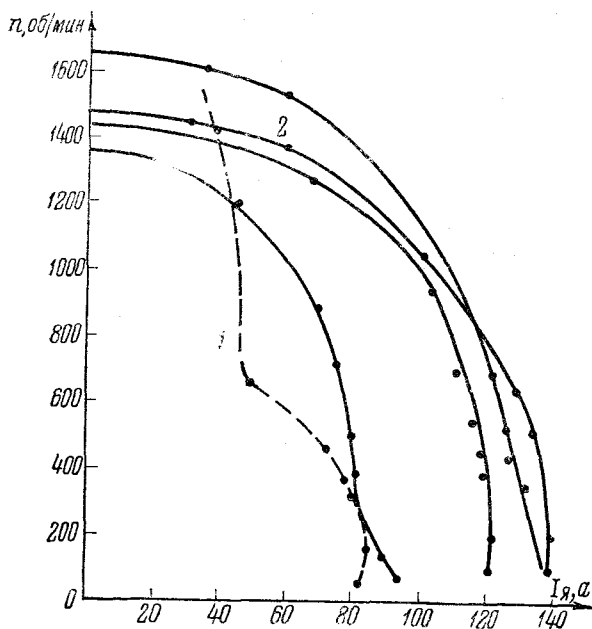


Рис. 3. Механические характеристики в системе трехфазный генератор-двигатель при различных токах

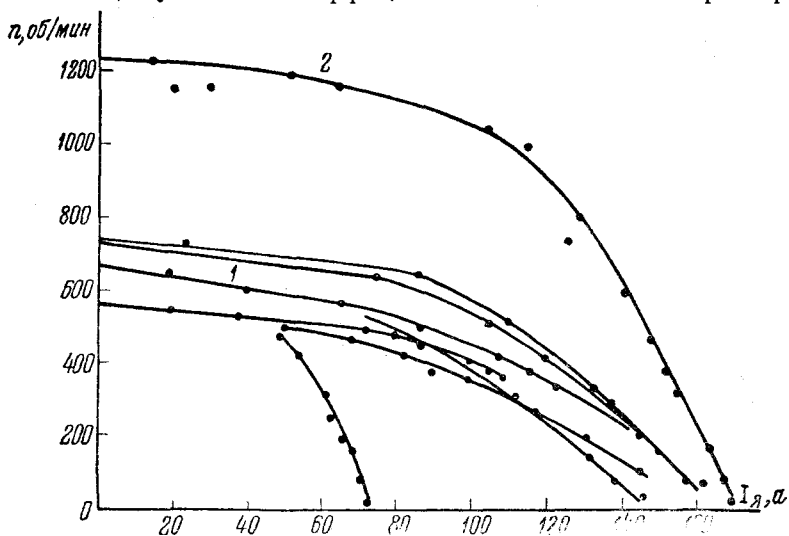


Рис. 4. Механические характеристики системы Г-Д с токовой отсечкой

в этом случае, т. е. при наличии насыщения, не остается величиной постоянной. Кривые 1 и 2 сняты при  $\beta$ , равных 0,172 и 0,088 соответственно.

В производственных условиях наиболее приемлемым, очевидно, окажется способ регулирования током возбуждения. Механические характеристики будут иметь различную пограничную скорость и различный ток короткого замыкания. Но величина замыкания, вследствие насыщения, изменяется значительно медленнее, чем величина пограничной скорости.

Статическую характеристику в системе Г-Д с отсечкой можно получить любой формы, изменяя момент отсечки регулированием сопротивления  $r_d$ .

Так как обратная связь введена в цепь генератора, то система работает надежно без дополнительных стабилизирующих звеньев.

Коэффициент усиления обратной связи можно подобрать значительный за счет параметров токовой обмотки и узла отсечки [на основании выражения (6)].

Как показывают предварительные подсчеты, параметры токового узла для экскаваторов типа СЭ-3 вполне осуществимы на практике и не являются громоздкими (см. таблицу).

Таблица параметров токового узла для трехкубового экскаватора

Параметры	Подъем	Поворот	Напор
Мощность, <i>квт</i> . . . . .	192	80	40
Число витков $w_1$ . . . . .	930	980	747
Число витков $w_2$ . . . . .	270	275	210
Ток короткого замыкания $I_k, a$ . . . . .	1000	580	320
Ток отсечки $I_{отс}, a$ . . . . .	600	280	160
Напряжение сравнения $u_{ср}, в$ . . . . .	100	70	35
Сопротивление $r_d, ом$ . . . . .	0,165	0,25	0,21
Сопротивление $r_1, ом$ . . . . .	1	0,7	0,35

Примечание. Число селеновых шайб диаметром 100 мм для всех механизмов считали равным 10.

### Выводы

1. Для экскаваторов средней мощности возможны в настоящее время две системы привода: а) с трехобмоточным генератором ТГ-Д; б) Г-Д с токовой отсечкой в цепи генератора.

2. Система Г-Д с отсечкой позволяет сократить габариты и вес генераторов за счет сокращения числа обмоток. При этом вводится дополнительный узел токовой отсечки в виде сопротивлений и выпрямителей, параметры которых незначительны.

3. Механические характеристики в системе Г-Д с отсечкой более стабильны по сравнению с ТГ-Д, обеспечивают высокий движущий момент при работе на регулировочных режимах. Однако в зоне малых нагрузок, вследствие жесткости характеристик, требуется регулирование с повышенной скоростью.

4. Скорость переходных процессов в обеих системах мало различна.

Исходные уравнения в системе ТГ-Д (см. рис. 1):

$$u_1 = i_1 r_1 + w_1 p \Phi; \quad (1)$$

$$cn + AIR_0 = i_{III} r_{III} + w_{III} p \Phi; \quad (2)$$

$$e - cn - A^I IR_0 = I r_c - w_c p \Phi; \quad (3)$$

$$e = \beta (i_1 w_1 + i_{III} w_{III} - I w_c) + h; \quad (4)$$

$$e = cn + IR_0 - w_c p \Phi; \quad (5)$$

$$IR_0 = I_{CT} R_0 + B p c n; \quad (6)$$

$$A = \frac{r_{я.д}}{R_0}; \quad A^I = \frac{r_{я.д} + r_{я.г}}{R_0}; \quad R_0 = r_{я.г} + r_{я.д} + r_c$$

Передаточные коэффициенты обмоток:

$$k_1 = \beta \frac{w_1}{r_1}; \quad k_{III} = \beta \frac{w_{III}}{r_{III}}; \quad k_c = \beta \frac{w_c}{r_c};$$

$$\beta_x \frac{w_x^2}{r_x} \frac{d\Phi}{dt} = T_x p e.$$

Умножаем уравнения (1), (2), (3) на передаточные коэффициенты обмоток и складываем их с уравнением (4)

$$\begin{aligned} u_1 k_1 + cn (k_c + k_{III}) + (A k_{III} + A^I k_c) IR_0 = \\ = (1 + k_c) e + T_{III} p e - h \end{aligned} \quad (7)$$

Решая уравнения (5), (6) и (7), получим уравнение переходного процесса

$$A^{II} B p^2 e + A^{III} p e + (1 - k_{III}) e = u_1 k_1 + h - A^{IV} I_{CT} R_0;$$

$$A^{II} = T_{III} + T_c \frac{\lambda k_c - A k_{III}}{k_c};$$

$$A^{III} = T_{III} - T_c \frac{k_{III}}{k_c} + B (1 - k_{III} + \lambda k_{III} + \sigma k_c);$$

$$A^{IV} = \lambda k_c + \sigma k_{III}; \quad \lambda = \frac{r_c}{R_0}; \quad \sigma = \frac{r_{я.г} + r_c}{R_0};$$

$$A^V = \frac{\lambda k_c - A k_{III}}{k_c}.$$

Исходные уравнения в системе Г-Д с токовой отсечкой (см. рис. 2):

$$u_1 = i_1 r_1 + w_1 p \Phi; \quad (1)$$

$$\varphi IR_0 = i_c r_c - w_c p \Phi + u_{cp}; \quad (2)$$

$$e = \beta (i_1 w_1 - i_c w_c) + h; \quad (3)$$

$$e = IR_0 + cn; \quad (4)$$

$$IR_0 = I_{ct} R_0 + B p c n. \quad (5)$$

Умножаем уравнения (1) и (2) на передаточные коэффициенты обмоток и производим алгебраическое сложение

$$u_1 k_1 - \varphi k_c IR_0 = e - h + (T_1 + T_c) p e - u_{cp} k_c. \quad (6)$$

Из уравнений (4), (5), (6) имеем следующее выражение переходного процесса

$$A^I B p^2 e + A^{II} p e + e = u_1 k_1 + h - A^{III} I_{ct} R_0 + k_c u_{cp};$$

$$A^I = T_1 + T_c;$$

$$A^{II} = B (1 + \varphi k_c) + (T_1 + T_c);$$

$$A^{III} = \varphi k_c; \quad \varphi = \frac{r_{\lambda}}{R_0}; \quad R_0 = r_{я.г} + r_{я.л} + r_{л}.$$