СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ МОМЕНТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ УДАРНОЙ НАГРУЗКЕ

А. В. Луговой
Кривой Рог

Технико-экономические показатели электродвигателей при переменной нагрузке зависят от принятого закона изменения электромагнитного момента. Правильно выбранный закон позволяет уменьшить мощность двигателя, потери, повысить производительность агрегата. Одним из наиболее распространенных случаев переменной нагрузки является ударная нагрузка, при которой используются электродвигатели постоянного тока (главные приводы реверсивных и регулируемых нереверсивных прокатных станов) и переменного тока (главные приводы нерегулируемых прокатных станов и привода преобразовательных агрегатов). Двигатели переменного тока используются в установках, где не требуется регулирования скорости. В таких условиях применяется регулирование мощности, позволяющее сгладить удары нагрузки. При этом уменьшаются необходимая мощность двигателя, потери в двигателе и сети и по-

вышается устойчивость питающей системы. Сглаживаются удары за счет кинетической энергии маховых масс [3]. Регулирование мощности может применяться в асинхронных и асинхронизированных синхронных двигателях [1, 3], но невозможно в синхронных, так как сопровождается изменением скорости.

Рассмотрим электрические машины, работающие в режиме регулирования мощности (момента). На рис. 1 приведен закон изменения момента ударной нагрузки. Последняя состоит из чередующихся набросов и пауз длительностью соответственно t_{pi}, t_{ni}. Наброс и следующая за ним пауза образуют цикл ударной нагрузки длительностью $\tau_i = t_{pi} + t_{ni}$. Регулирование допустимо, если скорость двигателя за время одного наброса не

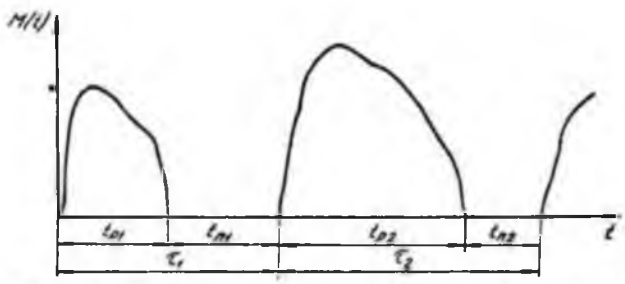

Рис. 1. Диаграмма нерегулярной ударной нагрузки.

успевает существенно снизиться, а за время паузы восстанавливается до номинальной.

Максимальное скольжение на интервале $0 \leqslant t \leqslant t_n$

$$|s|_{max} = \max_{0<t<t_n} \left\{ \left| s(0) + \frac{1}{T_м} \int_0^{t_n} [M(t) - M_э(t)]\, dt \right| \right\} \leqslant S_{доп},$$

где $t_n = \sum_{i=0}^{n} \tau_i$, $s(0)$ — начальное скольжение (скорость меняется вверх и вниз от синхронной). Оно зависит от механической постоянной времени $T_м$, момента нагрузки $M(t)$ и электромагнитного момента $M_э(t)$ на отрезке $0 \leqslant t \leqslant t_n$. Допустимое скольжение для различных типов двигателей $s_{доп} = 0{,}15 \div 0{,}30$ [2, 4]. Путем соответствующего выбора закона изменения электромагнитного момента можно уменьшить величину S_{max}.

Закон изменения $M_э(t)$ в i-м цикле зависит от выбранного критерия оптимальности, типа и параметров двигателя. Наиболее прост в реализации закон $M_{эi} = \text{const}$, предложенный Зейцем. Он используется в коллекторных каскадах и асинхронных двигателях с регуляторами скольжения [4]. Величина момента выбирается из условия равенства скольжений в конце $s(t_i)$ и в начале $s(t_{i-1})$ i-го цикла, где

$$t_i = \sum_{j=0}^{i} \tau_j.$$

В работе [5] найдены оптимальные законы изменения электромагнитного момента для асинхронизированных синхронных двигателей при ударной нагрузке. Они являются решениями нелинейных дифференциальных уравнений. Мгновенное значение электромагнитного момента зависит от соответствующих значений мощности (момента) нагрузки, скольжения и начального значения момента $M_э(0)$ $M_э(t) = \varphi[M_э(0), s, M(t)]$. Начальное значение момента в i-м цикле $M_{эi}(0)$ определяется из условия

$s(t_{i-1}) = s(t_i)$. Если для всякого $i = 0, 1, 2, \ldots, n$ $s(t_{i-1}) > s(t_i)$, система динамически неустойчива (через некоторое число циклов двигатель остановится), если $s(t_{i-1}) = s(t)_{t_{i-1}<t<t_i}$, она работает неэкономично. Скольжение $s(t_i)$ не может превысить $s(0)$, так как двигатель имеет ограничение на максимальное скольжение: $M_э = 0$ при $s \geqslant s(0)$ (скольжение отрицательно при изменении скорости вниз от синхронной).

Начальное значение момента в i-м цикле $M_{эi}(0)$ зависит от эквивалентных параметров последнего. В качестве эквивалентных параметров цикла используется его длительность τ_i и площадь кривой момента нагрузки $F_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} M_i dt$. С учетом этого

$$M_{эi}(0) = f(\tau_i, F_i). \tag{1}$$

В зависимости от характера изменения величин τ_i, F_i различаются три вида нагрузки: регулярная $\tau_i = \text{const}$, $F_i = \text{const}$, $0 \leqslant i \leqslant \infty$; квазирегулярная — нагрузка, у которой изменение параметров происходит через некоторое число циклов $n\,(n > 1)$; нерегулярная (детерминированная или случайная) — нагрузка с произвольным изменением параметров от цикла к циклу.

При регулярной нагрузке величина $M_{эi}(0)$ одинакова для всех циклов. Ее можно определить заранее и в процессе работы поддерживать неизменной. В случае квазирегулярной и нерегулярной нагрузки необходимо при изменении ее параметров осуществлять коррекцию $M_{эi}(0)$ в соответствии с (1).

При небольшом числе возможных сочетаний τ_i, F_i и медленном их изменении (несколько раз в смену и реже) коррекция может осуществляться оператором. Этот способ использовался в коллекторных каскадах [4]. Он непригоден при частом изменении τ_i, F_i или при отсутствии информации о величине этого изменения.

Оптимальные условия работы привода при такой нагрузке обеспечиваются при автоматическом определении $M_{эi}(0)$ в каждом цикле, которое осуществляется блоком коррекции (самонастройки). Его структура зависит от принятого способа определения (вычисления) $M_{эi}(0)$. Величины τ_i, F_i в большинстве случаев заранее неизвестны, поэтому блок коррекции не может быть построен в соответствии с (1). Кроме того, практическая реализация такого блока сложна и связана с проведением на ЭЦВМ большого объема вычислений (для выяснения вида функции $f(\tau, F)$).

Коррекцию можно рассматривать как процесс регулирования скольжения в конце циклов $s(t_i)$ с целью обеспечения равенства

$$\delta s_i = s_i^* - s(t_i) = 0, \tag{2}$$

где s_i^* — задание по скольжению в конце i-го цикла (оно одинаково для всех циклов $s_i^* = s^*$).

Следует отметить, что автоматическое определение $M_{эi}(0)$ из условия равенства скольжения в конце и начале i-го цикла

$$s(t_{i-1}) - s(t_i) = 0$$

неприемлемо, так как при этом величины $s(t_{i-1})$ и $s(t_i)$ будут зависеть от параметров нагрузки, т. е. двигатель в зависимости от параметров будет работать с различной максимальной скоростью в разные циклы.

Для выполнения равенства (2) вводится дискретная отрицательная обратная связь по скольжению в конце циклов, т. е.

$$M_{зi}(0) = \Psi[s^* - s(t_0) \ \ldots; \ s^* - s(t_{i-1})], \tag{3}$$

где Ψ — некоторый оператор.

Начальное значение момента для i-го цикла определяется по результатам предыдущих циклов. Задача заключается в исследовании качества и устойчивости процесса коррекции в регулируемой электрической машине.

На рис. 2 приведена структурная схема регулируемой машины переменного тока с коррекцией электромагнитного момента. Программное

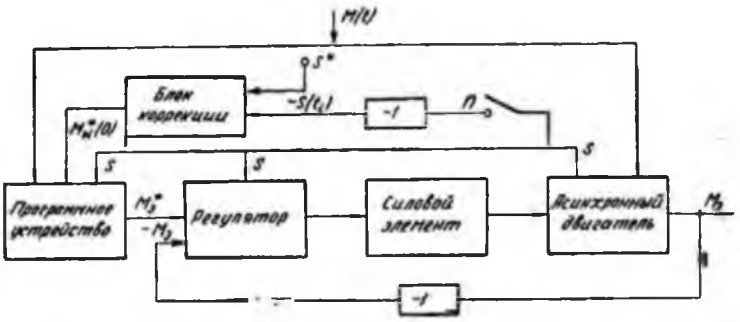

Рис. 2. Структурная схема системы регулирования электропривода.

устройство системы формирует необходимый закон изменения электромагнитного момента (например $M_э = \text{const}$), а регулятор и силовой элемент обеспечивают его реализацию. Блок коррекции осуществляет коррекцию начального значения электромагнитного момента от цикла к циклу нагрузки в соответствии с (3). Он включается с помощью ключа $П$ в конце каждого цикла. В настоящей работе излагаются результаты аналитического и экспериментального (на аналоговой вычислительной машине) исследования работы программного устройства с коррекцией момента.

Аналитическое исследование. Аналитически исследовать систему коррекции при описании двигателя системой нелинейных дифференциальных уравнений Парка — Горева невозможно. Для упрощения задачи учитываем, что в АД мощностью 1000 *квт* и выше электромеханические переходные процессы, вызванные изменением нагрузки на валу, можно исследовать по уравнениям квазиустановившегося режима [2]. При этом процесс в системе описывается уравнением движения совместно с уравнениями блока коррекции и программного устройства

$$\begin{gathered} T_м \frac{ds_i}{dt} = M_{зi}(t) - M_i(t); \\ M_{зi}(0) = \Psi[\delta s_0; \ \delta s_1 \ \ldots \ \delta s_{i-1}]; \\ M_{зi}(t) = \varphi[M_{зi}(0), \ t, \ s, \ M_i(t)]; \\ t_{i-1} \leqslant t \leqslant t_i. \end{gathered} \tag{4}$$

Устойчивость и качество коррекции зависит от принятого закона изменения электромагнитного момента и вида оператора Ψ.

1. Рассмотрим случай $M_{эi} = \text{const}$, $\Psi = k$

$$M_{эi}(t) = M_{эi}(0) = k\,[s^* - s(t_{i-1})], \tag{5}$$

где k — коэффициент передачи блока обратной связи.

Решая уравнение движения с учетом (5), получаем рекуррентное соотношение

$$s_i = s_{i-1}x_i + s^*\alpha_i - \frac{1}{T_м}\int_{t_{i-1}}^{t_i} M_i dt; \tag{6}$$

$$x_i = 1 - \alpha_i, \quad \alpha_i = \frac{k\tau_i}{T_м},$$

где $s_{i-1} = s(t_{i-1})$, $s_i = s(t_i)$ — скольжение в конце $(i-1)$ и i-го циклов. Такое сокращение обозначений допустимо, так как в дальнейшем нас будет интересовать только величина скольжения в конце каждого цикла.

Вводя обозначения $\tau_i = \tau + \Delta\tau_i$, $\alpha_i = \alpha + \Delta\alpha_i$,

$$F_i = \frac{1}{T_м}\int_{t_{i-1}}^{t_i} M_i dt = F + \Delta F_i,$$

получаем неоднородное разностное уравнение с переменными коэффициентами

$$s_i - s_{i-1}(x - \Delta\alpha_i) - s^*\alpha + F = s^*\Delta\alpha_i - \Delta F_i. \tag{7}$$

Пусть параметры нагрузки меняются скачкообразно в некотором цикле. До и после скачка имеется ряд циклов с постоянными параметрами. Совместим начало отсчета с циклом, в котором происходит скачок. При этом

$$\Delta\alpha_i = \begin{cases} \Delta\alpha = \text{const} & \text{при } i < 0, \\ 0 & \text{при } i \geqslant 0; \end{cases}$$
$$\Delta F_i = \begin{cases} \Delta F = \text{const} & \text{при } i < 0, \\ 0 & \text{при } i \geqslant 0 \end{cases} \tag{8}$$

и система описывается двумя однородными разностными уравнениями

$$\text{I.}\quad s_i - x_i s_{i-1} - s^*\alpha_1 + F_1 = 0 \quad i < 0;$$
$$\text{II.}\quad s_i - x s_{i-1} - s^*\alpha + F = 0 \quad i \geqslant 0. \tag{9}$$
$$x_i = 1 - \alpha - \Delta\alpha, \quad F_1 = F + \Delta F.$$

Свойства полученных уравнений подробно исследованы в [8].

Из системы (9) можно определить скольжение в конце n-го цикла s_n. Решение системы имеет вид

$$s_n = s_0 x^n + \left(s^* - \frac{F}{\alpha}\right)(1 - x^n), \tag{10}$$

где s_0 — величина скольжения в конце нулевого цикла (цикл, в котором изменяются параметры графика нагрузки).

С учетом (5) получим

$$M_{эn} = k\,(s^* - s_0)\,x^{n-1} + \frac{FT_м}{\tau}(1 - x^{n-1}). \tag{11}$$

В установившемся режиме ($|x| < 1$)

$$s_\infty = \lim_{n\to\infty} s_n = s^* - \frac{F}{\alpha}; \quad M_{э\infty} = \lim_{n\to\infty} M_{эn} = \frac{FT_м}{\tau}. \tag{12}$$

Величина скольжения в нулевом цикле

$$s_0 = xs_{-1} + s^*\alpha - F = s^*x - x\frac{F_1}{\alpha_1} + s^*\alpha + F =$$

$$= s^* - \frac{F(1+\Delta\alpha) + \Delta F(1-\alpha)}{\alpha + \Delta\alpha},$$

где $s_{-1} = s_{уст} = s^* - \frac{F_1}{\alpha_1}$ — установившееся значение скольжения, имевшее место до скачкообразного изменения параметров нагрузки.

При определении s_{-1} предполагается, что до скачкообразного изменения параметров в системе имел место установившийся процесс, т. е. слева от начала отсчета имеется, по крайней мере, столько циклов с неизменными параметрами, сколько требуется для затухания переходного процесса, обусловленного предыдущим скачком.

Степень устойчивости системы коррекции [8]

$$\varepsilon = |\ln|1 - \left|\frac{k\tau}{T_м}\right|.$$

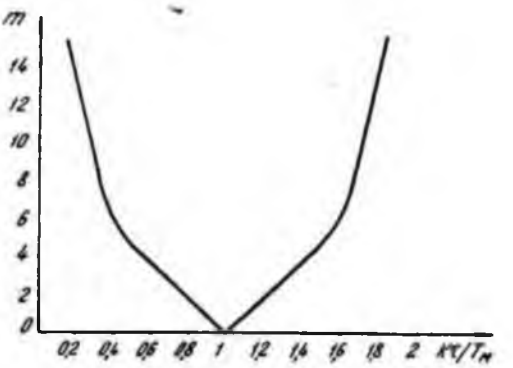

Рис. 3. Пропорциональная коррекция — зависимость необходимого числа циклов коррекции от параметров системы.

При $k < \frac{T_м}{\tau}$ устойчивость апериодическая, при $k > \frac{T_м}{\tau}$ — колебательная. На рис. 3 приведена зависимость $m\left(\frac{k\tau}{T_м}\right)$, где m — число циклов, за которое заканчивается процесс. В оптимальной системе коррекции $k = \frac{T_м}{\tau}$. При постоянном k изменение длительности цикла τ может привести к потере системой не только оптимальных свойств, но и устойчивости (при $\Delta\tau \leqslant \pm 0{,}3$; $m \leqslant 3$ при $\Delta\tau > +\tau$ система неустойчива). Устойчивость обеспечивается, если

$$k = \frac{T_м}{\tau_0} = \text{const}, \quad 0 < \frac{\tau_l}{\tau_0} < 2.$$

Для обеспечения оптимальной самонастройки при различных τ_l необходим переменный коэффициент передачи

$$k_l = \frac{\tau_0}{\tau_{l-1}} k_0.$$

Недостаток рассмотренной системы — значительная статическая ошибка в скольжении $\delta s_\infty = \frac{F}{\alpha} = F\frac{T_м}{k\tau}$. Устранить ее увеличением коэффициента κ невозможно, так как последний ограничен требованием устойчивости $\left(0 < k < 2\frac{T_м}{\tau}\right)$ и оптимального качества $\left(k = \frac{T_м}{\tau}\right)$.

2. Более сложным является закон изменения электромагнитного момента вида

$$M_{эл}(t) = M_{эл}(0) - \lambda \int_{t_{l-1}}^{t} M_l dt, \quad t_{l-1} \leqslant t \leqslant t_l, \tag{13}$$

где λ — постоянный коэффициент.

Решая уравнение движения с учетом (13) и (15), получаем

$$s_i = s_{i-1}x_i + \alpha_i s^* - \frac{1}{T_м}\left[\lambda \int_{t_{i-1}}^{t_i}\left(\int_{t_{i-1}}^{t} M_i dt\right) dt + \int_{t_{i-1}}^{t_i} M_i dt\right].$$

Устойчивость и качество коррекции для полученного уравнения такие же, как и для (6), т. е. они не зависят от законов изменения электромагнитного момента (если последний имеет вид $M_э(t) = M_э(0) + \Theta(t)$, где $\Theta(t)$ — некоторая функция).

Как и в предыдущем случае, система коррекции обладает значительной статической ошибкой и, следовательно, неприемлема.

3. Для уменьшения статической ошибки необходимо осуществлять коррекцию момента в i-м цикле по результатам всех предшествующих циклов. Это обеспечивается при применении пропорционально-интегральной коррекции. Если элекромагнитный момент в каждом цикле поддерживается неизменным, уравнение коррекции можно представить в следующем виде:

$$M_{эi}(t) = M_{эi}(0) = k_1(s^* - s_{i-1}) + \sum_{j=-\infty}^{i-1} \int_{t_j-\Delta t}^{t_j} k_2[s^* - s_j(t)]\,dt, \qquad (14)$$

где $\Delta t = \text{const} \ll \tau_i$ — время коррекции,

$$\int_{t_j-\Delta t}^{t_j} s_j(t)\,dt = \frac{\Delta t}{T_м}\left[M_{эj}\frac{2t_j - \Delta t}{2} - \int_{t_j-\Delta t}^{t_j}\left(\int_{t_j-1}^{t} M_j dt\right) dt\right] + \Delta t s_{j-1}.$$

Учитывая, что в конце цикла ($t_j - \Delta t \leqslant t \leqslant t_j$) момент нагрузки близок к нулю (пауза), и пренебрегая величиной Δt по сравнению с $2\tau_j$, получаем

$$\int_{t_j-\Delta t}^{t_j} s_j(t)\,dt = \Delta t\left[\frac{M_{эj}}{T_м} - \frac{\int_{t_{j-1}}^{t_j} M_j dt}{T_м} + s_{j-1}\right] = \Delta t s_j.$$

Решая с учетом выбранного закона коррекции уравнение движения, находим выражение для скольжения в конце i-го цикла нагрузки

$$s_i = s_{i-1}x_i + \alpha_i s^* + \sum_{j=-\infty}^{i-1} \beta_j(s^* - s_j) - \frac{1}{T_м}\int_{t_{i-1}}^{t_i} M_i dt. \qquad (15)$$

Из соотношения для s_{i-1}

$$\sum_{j=-\infty}^{i-1} \beta_j(s^* - s_j) = s_{i-1}y_{i-1} - s_{i-2}x_{i-1} + \beta_{i-1}s^* - \alpha_{i-1}s +$$

$$+ \frac{1}{T_м}\int_{t_{i-2}}^{t_{i-1}} M_{i-1}dt, \qquad (16)$$

где

$$\beta_j = \frac{k_2\Delta t\tau_j}{T_м},\quad y_j = 1 - \beta_j,\quad \Delta\beta_j = \Delta y_j = \frac{k_2\Delta t\tau_j}{T_м}.$$

Подставляя (16) в (15) и полагая $\beta_j = \beta + \Delta\beta_j$, $y_i = y - \Delta y_i$, получаем неоднородное разностное уравнение 2-го порядка с переменными коэффициентами

$$s_i - (x + y)s_{i-1} + xs_{i-2} - (\Delta x_i + \Delta y_{i-1})s_{i-1} + \Delta x_{i-1}s_{i-2} - s^*\beta =$$
$$= s^*(\Delta\beta_{i-1} + \Delta\alpha_i - \Delta\alpha_{i-1}) - (\Delta F_i - \Delta F_{i-1}). \qquad (17)$$

При скачкообразном изменении параметров нагрузки в нулевом цикле

$$\Delta\Pi_i = \begin{cases} \Delta\Pi & \text{при } i < 0, \\ 0 & \text{при } i \geqslant 0, \end{cases} \quad \Delta\Pi = \{\Delta\alpha,\ \Delta\beta,\ \Delta F\}$$

коррекция описывается тремя неоднородными разностными уравнениями с постоянными коэффициентами

$$\begin{aligned} &\text{I}\ \ s_i - (x_1 + y_1)\, s_{i-1} + x_1 s_{i-2} = s^* \beta_i && i < 0; \\ &\text{II}\ \ s_i - (x + y_1)\, s_{i-1} + x_1 s_{i-2} = s^* (\beta_1 + \Delta\alpha) + \Delta F && i = 0; \\ &\text{III}\ \ s_i - (x + y)\, s_{i-1} + x s_{i-2} = s^* \beta && i > 0. \end{aligned} \tag{18}$$

Уравнения (18) непосредственно следуют из (17), если учесть соотношения при $i < 0$

$$\Delta\alpha_i = \Delta\alpha_{i-1} = \Delta\alpha;\ \Delta\beta_{i-1} = \Delta\beta;\ \Delta x_{i-1} = \Delta x_i = \Delta x;$$
$$\Delta y_{i-1} = \Delta y;\ \Delta F_i = \Delta F_{i-1} = \Delta F;$$

при $i = 0$

$$\Delta\alpha_i = 0;\ \Delta\alpha_{i-1} = \Delta\alpha;\ \Delta\beta_{i-1} = \Delta\beta;\ \Delta x_i = 0;$$
$$\Delta x_{i-1} = \Delta x;\ \Delta F_{i-1} = \Delta F;\ \Delta F_i = 0;$$

при $i > 0$

$$\Delta\alpha_i = \Delta\alpha_{i-1} = \Delta\beta_i - \Delta\beta_{i-1} = \Delta F_i = \Delta F_{i-1} = 0.$$

Первое из них описывает процесс в системе коррекции до изменения τ, F, второе — справедливо для цикла, в котором происходит скачкообразное изменение последних, третье — для всех последующих циклов.

Из системы (18) можно определить величину скольжения в конце произвольного цикла n. Общее решение системы (18) получим с помощью одного из известных методов, например, применения дискретного преобразования Лапласа [8],

$$s_n = s_0 \sum_{i=0}^{l} (-1)^i C_{n-i}^i z^{n-2i} x^i - s_{-1} x \sum_{i=0}^{l} (-1)^i C_{n-i-1}^i z^{n-2i-1} x^i +$$
$$+ s^* \beta \sum_{j=0}^{n} (-1)^j z^j \sum_{i=2j+1}^{n} C_{i-j+1}^j z^{i-2j-1}, \tag{19}$$

где $z = x + y$, $l = \frac{n}{2}$ при четном n и $l = \frac{n-1}{2}$ при нечетном; C_{n-i}^i — биномиальные коэффициенты; $s_{-1} = s^*$, $s_0 = s^*(1 + \Delta F)$, s_0 — скольжение в конце цикла, соответствующего скачкообразному изменению параметров графика нагрузки.

В установившемся режиме

$$s_\infty = \lim_{n \to \infty} s_n = s^*,\ \ M_{э\infty} = \lim_{n \to \infty} M_{эn} = \frac{\int_{t_{n-1}}^{t_n} M dt}{\tau}. \tag{20}$$

Как видно из (20), статическая ошибка рассматриваемая в системе отсутствует.

Устойчивость анализируется по характеристическому уравнению системы коррекции, которое для уравнения (17) может быть представлено в следующем виде:

$$w^2 - (x + y)\, w + x = 0. \tag{21}$$

По условию устойчивости Рауса — Гурвица [8] для этого уравнения на рис. 4 построены линии равной степени устойчивости. Заштрихован-

ная зона соответствует апериодической устойчивости, незаштрихованная — колебательной.

В оптимальной системе $x = y = 0$, $k_1 = k_2 \Delta t = \frac{T_м}{\tau}$. Изменение τ приводит к ухудшению коррекции. Как видно из рис. 3, *б*, система более чувствительна к изменению x, чем y. Для обеспечения оптимальной коррекции для различных τ необходимо, чтобы коэффициенты k_1, k_2 были переменными.

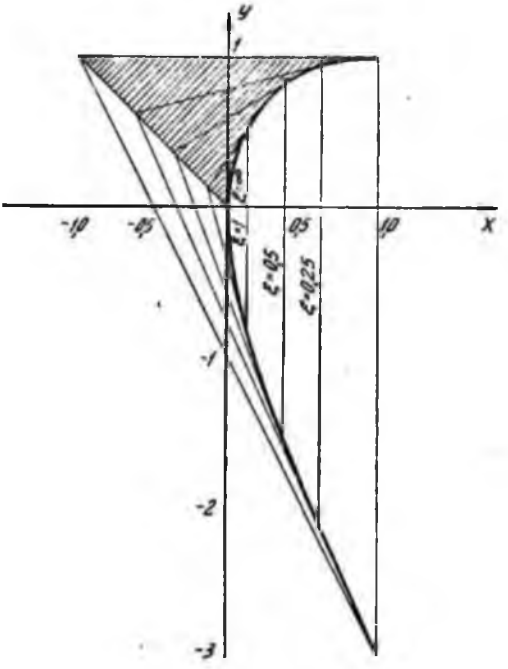

Рис. 4. Пропорционально-интегральная коррекция — линии равной степени устойчивости $\varepsilon = \text{const}$ в плоскости параметров.

При изменении электромагнитного момента в соответствии с (13) получаются аналогичные результаты. Они позволяют установить ряд общих закономерностей в поведении системы коррекции и осуществить выбор ее параметров. Для некоторых случаев нагрузки и законов регулирования возможность их применения должна быть подтверждена экспериментом. Это объясняется тем, что при аналитическом исследовании рассматривалась идеализированная система, в которой не учитывались электромагнитные переходные процессы в двигателе; рассматривался ограниченный класс законов изменения электромагнитного момента вида $M_э(t) = M_э(0) + \theta(t)$; предполагалось, что момент нагрузки на валу не зависит от скольжения (является однозначной функцией времени), что не всегда справедливо; не накладывались ограничения на момент, скольжение и другие параметры режима. Исследование системы коррекции при невыполнении перечисленных условий идеализации осуществляется для асинхронизированного синхронного двигателя преобразовательного агрегата с оптимальным законом изменения электромагнитного момента.

Исследование на АВМ. Исследование проводится на аналоговой вычислительной машине в соответствии с методикой и схемами, изложенными в [6].

На рис. 5 показаны осциллограммы скольжения АС двигателя при изменении среднего значения нагрузки на 50%. Время коррекции $\Delta t = 1{,}35$ *сек*. Параметры x, y и число циклов, за которое заканчивается процесс в идеализированной системе $\left(m_u = \frac{3}{\varepsilon}\right)$, приведены под соответствующими осциллограммами.

Сравнение осциллограмм с полученными ранее аналитическими результатами показывает, что свойства сравниваемых систем (реальной и идеализированной) различны. Первая имеет большую область устойчивости и менее чувствительна к изменению параметров x, y (изменению длительности цикла нагрузки τ или коэффициентов передачи k_1, k_2). Это объясняется, в первую очередь, ограничением скорости двигателя, ко-

нечным временем коррекции Δt и нелинейным законом изменения электромагнитного момента. Влияние электромагнитных переходных процессов в двигателе на качество процесса коррекции незначительно и им

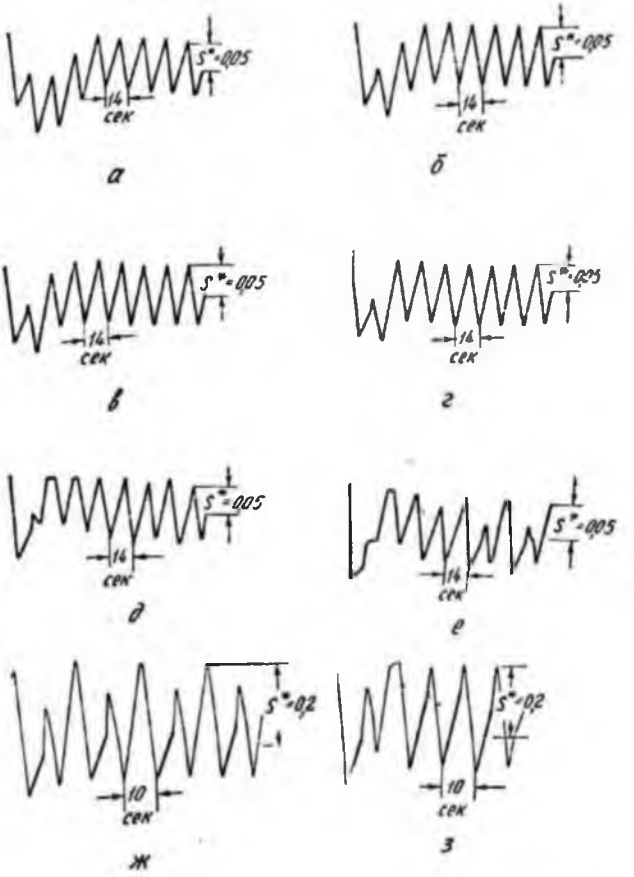

Рис. 5. Осциллограммы скольжения АС двигателя с автоматической коррекцией момента при увеличении нагрузки на 50%.

$а - x = 0{,}478$; $y = 0{,}632$; $m_{ц} \approx 9$; $б - x = 0{,}268$; $y = 0{,}546$; $m_{ц} \approx 5$;

$в - x = 0{,}06$; $y = 0{,}566$; $m_{ц} \approx 3$; $г - x = -0{,}15$; $y = 0{,}32$; $m_{ц} \approx 4$;

$д - x = -0{,}98$; $y = 20{,}13$ (идеализированная система неустойчива); $е - x = -1{,}09$; $y = -0{,}385$ (идеализированная система неустойчива); $ж - x = -2{,}2$; $y = -0{,}62$ (идеализированная система неустойчива); $з - x = -1{,}8$; $y = -0{,}19$ (идеализированная система неустойчива).

можно пренебречь. При постоянном электромагнитном моменте $M_э = \text{const}$ расхождение между аналитическими и экспериментальными результатами менее существенно.

ВЫВОДЫ

1. При изменении параметров ударной нагрузки от цикла к циклу необходимо применять автоматическую коррекцию электромагнитного момента, которую рационально осуществлять введением дискретной отрицательной обратной связи по скольжению в конце цикла.

2. Удовлетворительное качество коррекции обеспечивается при применении пропорционально-интегрального закона коррекции. Пропорциональная коррекция неприемлема из-за большой статической ошибки.

3. Ограничения, существующие в реальной установке, увеличивают область устойчивой работы и уменьшают чувствительность системы коррекции к изменению параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Ботвинник. Асинхронизированная синхронная машина. ГЭИ, 1960.
2. А. И. Важнов. Динамическая устойчивость асинхронного двигателя при ударной нагрузке. «Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика», 1962, № 4.
3. Л. Б. Гейлер. Электропривод в тяжелом машиностроении. Машгиз, 1958.
4. Л. Дрейфус. Коллекторные каскады. ОНТИ, 1934.
5. А. В. Луговой. Режим работы асинхронизированного синхронного двигателя в качестве привода преобразовательного агрегата. «Электричество», 1968, № 9.
6. А. В. Луговой. Синтез оптимальной самонастраивающейся системы управления асинхронизированным синхронным двигателем при ударной нагрузке. Труды семинара «Техническая кибернетика» (Криворожское отделение), вып. 1. Киев, ИК АН УССР, 1968.
7. А. Е. Нейман, Б. А. Климов. Исследование системы регулирования «АС двигатель-турбокомпрессор» на АВМ. «Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт», 1966. № 4.
8. Я. З. Цыпкин. Теория линейных импульсных систем. Физматгиз, 1963.

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ САР НАГРУЗКИ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ МАШИНЫ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНОГО ХАРАКТЕРА ВОЗМУЩЕНИЙ

Н. Г. Попович, М. А. Дубровина

Киев

В работе [1] отмечалось, что автоматический регулятор нагрузки угледобывающей машины при определенной величине быстродействия может выполнять функции защиты двигателя от опрокидывания [2].

Исследование процесса технологических перегрузок и опрокидывания двигателей горных машин позволило установить исходные данные для синтеза оптимальной по быстродействию САР [3]. Для получения необходимого быстродействия САР требуется введение корректирующих звеньев. Решение этой задачи усложняется необходимостью учета случайного характера возмущений, действующих на объект. Синтез оптимальной по быстродействию САР нагрузки комбайна осуществляется по методу Винера—Колмогорова использованием теории случайных функций.

Критерием оптимальности служит минимум среднеквадратической ошибки. Специфика данной задачи заключается в следующем: так как синтезируется САР, а не следящая система, то начало координат системы переносится в точку номинального режима, и рассматривается САР по ошибке; объект регулирования имеет входной сигнал в виде нестационарного случайного процесса; вводится дополнительное условие — требование астатизма системы; при синтезе должны использоваться функционально необходимые звенья САР.

В процессе исследований было установлено, что при опрокидывании асинхронного короткозамкнутого двигателя комбайна нестационарный входной сигнал, приведенный к выходу объекта, можно представить в виде суммы низкочастотного и высокочастотного случайных сигналов, стационарных в определенной области. Стационарность низкочастотной