

ГАВРИЛОВ Петр Д.

Кузвасский политехнический институт, СССР

ОПТИМАЛЬНОЕ И АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИКОЙ
И ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ ГОРНЫХ МАШИН

Резюме: Максимальной интегральной производительности комплексов при заданной себестоимости можно добиться только при оптимальном и адаптивном управлении динамикой и техническим состоянием горных машин.

При решении этой проблемы в качестве главного обоснован критерий минимальной удельной ресурсоёмкости (расход технического ресурса на единицу выработанной работы). Разработаны методы синтеза и устройства оптимальной и адаптивной САУ на основе принципа максимума, достаточных условий абсолютного минимума и особых оптимальных управлений, методы и устройства защиты от чрезмерных перегрузок, идентификации нагрузки и диагностики технического состояния электромеханической системы, включая косвенное определение расхода ресурса усталостной долговечности машин и термовибромеханического износа изоляции обмоток двигателей.

Разработанные системы, кроме оптимизации динамических процессов, позволяют оценивать квалификацию и обучать машинистов, дают научную и техническую основу для оптимизации сроков проведения ремонтов по перспективному агрегатно-узловому методу.

Опыт эксплуатации, теоретические и экспериментальные исследования динамики упругих нелинейных электромеханических систем (ЭМС) с сосредоточенными и распределёнными параметрами (добычные и проходческие комбайны, буровые станки, одноприводные и многоприводные струговые установки, агрегаты и скребковые конвейеры, одноковшовые и роторные экскаваторы, шактные и буровые подъёмные установки, дробилки руды и др.) показали, что вследствие частых, резких, случайных изменений момента сопротивления, вынужденных колебаний и автоколебаний моментов и скоростей в установившихся режимах, при частых пусках и стопорениях истощения технического ресурса в большинстве случаев (более 80%) происходит из-за интенсивного накопления усталостных повреждений в деталях машин и термовибромеханического износа изоляции обмоток двигателей (особенно в местах выхода секции обмотки из паза). Кроме того, экстренные стопорения машин при встрече исполнительными органами трудноразрушаемых включений и пород, заклинивании буровых ставов и тяговых цепей, а также вследствие экстренного

аварийного торможения электропривода из-за неисправностей в электроприводе или электроснабжении вызывает поломки частей машин или интенсивное расходование технического ресурса.

Поэтому максимальной интегральной производительности горных технологических комплексов при заданной себестоимости можно добиться только при оптимальном и адаптивном управлении динамикой и техническим состоянием горных машин, включающем и защиту от опасных экстренных перегрузок.

При решении этой проблемы в качестве главного обоснован критерий минимальной удельной ресурсоемкости (расход технического ресурса на единицу выполненной работы) при заданной производительности, а подчиненными ему приняты: минимальная длительность выполнения заданной работы (позиционные ЭМС) или переходных процессов, минимальные амплитуды колебаний электромагнитного момента и момента (силы) в упругих связях, минимальные отклонения от заданных соотношений распределения нагрузки между двигателями или натяжений лент и цепей в многоприводных ЭМС, минимум потерь электроэнергии и др.

Рассмотрим оптимальное управление состоянием ЭМС в общем виде: система имеет \bar{n} электроприводов, состоящих из частотно-управляемых обобщенных электрических машин (ОЭМ), соединенных упругими с сосредоточенными или распределенными параметрами связями с исполнительными органами. Это позволит получать необходимые результаты при конкретизации типа и количества электроприводов и связей.

Математическое описание ОЭМ в соответствии с [1,7] с выделением $\omega_{\bar{i}}$ представим в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{\bar{i}ii}}{dt} &= \underline{U}_{\bar{i}ii} - \omega_{\bar{i}} \alpha'_{\bar{i}oi} \psi_{\bar{i}ii} + \omega_{\bar{i}} \alpha'_{\bar{i}oi} K_{\bar{i}ii} \psi_{\bar{i}ii} + \omega_{\bar{i}} \alpha_{\bar{i}oi} \psi_{\bar{i}vi}; \\ \frac{d\psi_{\bar{i}vi}}{dt} &= \underline{U}_{\bar{i}vi} - \omega_{\bar{i}} \alpha'_{\bar{i}oi} \psi_{\bar{i}vi} + \omega_{\bar{i}} \alpha'_{\bar{i}oi} + \frac{K_{\bar{i}vi}}{T_{\bar{i}vi}} \psi_{\bar{i}vi} - \omega_{\bar{i}} \alpha_{\bar{i}oi} \psi_{\bar{i}ii}; \\ \frac{d\psi_{\bar{i}iii}}{dt} &= \underline{U}_{\bar{i}iii} - \omega_{\bar{i}} \alpha'_{\bar{i}oi} \psi_{\bar{i}iii} + \omega_{\bar{i}} \alpha'_{\bar{i}oi} K_{\bar{i}iii} \psi_{\bar{i}iii} + (\omega_{\bar{i}} \alpha_{\bar{i}oi} - \frac{P_{\bar{i}iii}}{T_{\bar{i}iii}} \omega_{\bar{i}}) \psi_{\bar{i}iii}; \\ \frac{d\psi_{\bar{i}vii}}{dt} &= \underline{U}_{\bar{i}vii} - \omega_{\bar{i}} \alpha'_{\bar{i}oi} \psi_{\bar{i}vii} + \omega_{\bar{i}} \alpha'_{\bar{i}oi} K_{\bar{i}vii} \psi_{\bar{i}vii} - (\omega_{\bar{i}} \alpha_{\bar{i}oi} - \frac{P_{\bar{i}vii}}{T_{\bar{i}vii}} \omega_{\bar{i}}) \psi_{\bar{i}vii}. \end{aligned} \right\} (I)$$

$$\bar{i} = 1, 2, \dots, \bar{n}.$$

Математическое описание механической части ЭМС с сосредоточенными параметрами:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\omega_i}{dt} &= \frac{1}{J_{\omega_i}} \left[\frac{M_{\omega_i}}{J_{\omega_i}} (\Psi_{\omega_i} \Psi_{\omega_i} - \Psi_{\omega_i} \Psi_{\omega_i}) - \frac{M_{\omega_i}}{J_{\omega_i}} \right]; \\
 \frac{dM_{\omega_i}}{dt} &= \bar{v}_{\omega_i} (\omega_i - \omega_{0i}); \\
 \frac{d\omega_{0i}}{dt} &= \frac{1}{J_{\omega_{0i}}} (M_{\omega_i} - M_{\omega_{0i}}); \\
 \frac{d\bar{x}_k}{dt} &= f^k(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m, \underline{M}_{\omega_1}, \underline{M}_{\omega_2}, \dots, \underline{M}_{\omega_m}) \\
 \bar{k} &= 1, 2, \dots, m.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Математическое описание механической части ЭМС с распределенными параметрами рассмотрим на примере двухприводного скребкового конвейера. Аналогично, с добавлением $\underline{M}_{\omega}(\underline{F}_{\omega})$ от разрушения угля, можно описать конвейероструги, струбовые установки и агрегаты. При использовании одной ветви описывается движение комбайна с цепной подачей и движение ковша драглайна при копании.

В многоприводных конвейерах (например, с линейными асинхронными двигателями) подобное описание может быть распространено на \bar{n} электроприводов.

Уравнения движения грузовой и холостой ветвей тяговой цепи (рис. I.) в точках набегания на звездочки головной и хвостового приводов и сбегания с головной звездочки [2]:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - F(\bar{v}_2) &= 0, \bar{x} = 0; \\
 \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - F^*(\bar{v}_2) - \frac{\partial \omega}{\partial x} \left(1 - \frac{\bar{v}_2}{v_2}\right) &= 0; \bar{x} = 0; \\
 \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} \left(1 - \frac{\bar{v}_2}{v_2}\right) &= 0, \eta = \eta_0; \\
 \frac{\partial \omega}{\partial x} \Big|_{\bar{x}=0} = \varepsilon_1; \frac{\partial \omega}{\partial \eta} \Big|_{\eta=\eta_0} = \varepsilon_2; \frac{\partial \omega}{\partial x} \Big|_{\bar{x}=0} = \varepsilon_3; \\
 \frac{\partial \omega}{\partial t} \Big|_{\bar{x}=0} = \bar{y}_1; \frac{\partial \omega}{\partial t} \Big|_{\bar{x}=0} = \bar{y}_2, \bar{v}_2^* &= \bar{v}_2 + \sum_{\alpha} \bar{y}_\alpha; \\
 F(\omega) = \frac{\partial \omega}{\partial x} \left(1 - \frac{\bar{v}_2}{v_2}\right); F(\bar{v}_2) &= A \omega - B \bar{v}_2 + C \bar{v}_2^3;
 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{F}^*(\underline{r}_2) &= \underline{A}_1^* - \underline{B}_1^* \underline{r}_2 + \underline{C}^* \underline{r}_2^2; \quad \underline{M}_{\underline{E}_1} = \underline{SER} (\underline{E}_1 - \underline{E}_2) / \underline{l}, \\ \underline{M}_{\underline{E}_2} &= \underline{SER} \underline{E}_2 / \underline{l} \end{aligned} \right\}$$

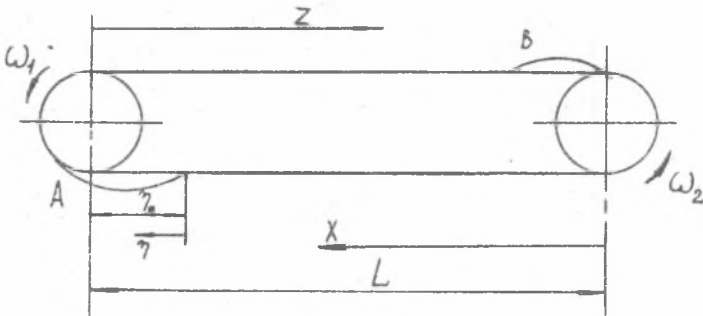


Рис. 1. Система координатных осей конвейера

Обозначения в (1), (2), (3):

$\psi_{s1i}, \psi_{s2i}, \psi_{r1i}, \psi_{r2i}, \underline{U}_{s1i}, \underline{U}_{s2i}, \underline{U}_{r1i}, \underline{U}_{r2i}$ - составляющие потокосцеплений и напряжений статоров и роторов электродвигателей по осям $\underline{U}, \underline{V}$; α_i^0 - относительные значения частот токов статоров; $\omega_{s1i}, \omega_{s2i}, \omega_{r1i}, \omega_{r2i}$ - частоты вращения и моменты инерции роторов ЭДМ и приведенных к роторам исполнительных органов; $\underline{M}_{\underline{E}_1}, \underline{M}_{\underline{E}_2}$ - моменты сопротивления и в упругих связях машин; \underline{b}_i - жесткости трансмиссий; \underline{X}_{ri} - фазовые координаты механической части ЭМС;

$$\underline{K}_{si} = \underline{x}_{oi}^0 / (\underline{x}_{oi}^0 + \underline{x}_{ri}^0); \quad \underline{K}_{ri} = \underline{x}_{oi}^0 / (\underline{x}_{oi}^0 + \underline{x}_{ri}^0); \quad \underline{x}_{ri}^0 = \underline{x}_{ri}^0 + \underline{x}_{si}^0 + \underline{x}_{ri}^0, \quad \underline{C}_i = 1,5 \sqrt{P_{hi}} \omega_{ri} \underline{K}_{ri} / \underline{x}_{si}^0,$$

$$\alpha_{s1i}^0 = \omega_{s1i} / \omega_{s1i}^0; \quad \alpha_{r1i}^0 = \omega_{r1i} / \omega_{r1i}^0;$$

$\underline{r}_{1i}, \underline{r}_{2i}, \underline{x}_{1i}^0, \underline{x}_{2i}^0$ - активные и индуктивные сопротивления статора и ротора, приведенные к статору;

\underline{x}_{oi}^0 - индуктивное сопротивление цепи намагничивания двигателя;

ω_{hi} - номинальная угловая частота вращения поля статора;

\underline{P}_{hi} - число пар полюсов; $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_{\alpha}^0$ - деформация участков цепи груженой и холостой ветвей и сбегавшего участка; r_0 - расстояние от точки отрыва от звездочки до касания цепью става конвейера; $\underline{a}_1, \underline{a}_2$ - скорости распространения упругой волны

по грузной и холостой ветвям цепей; $\bar{\omega}_g, \bar{\omega}_h$ - линейные скорости звездочек головного и хвостового приводов; $\bar{\omega}_d$ - сумма скоростей деформаций холостой ветви цепи; $\bar{F}(\bar{\omega}_g), \bar{F}(\bar{\omega}_h)$ - зависимости силы трения скольжения от скорости грузной и холостой ветвей; $\bar{F}(\omega)$ - возмущение, обуславливающее растяжение цепи из-за неравенства скоростей приводов; $\bar{A}^i, \bar{B}^i, \bar{C}^i, \bar{D}^i, \bar{E}^i$ - постоянные коэффициенты; \bar{S} - сечение цепи; \bar{E} - модуль упругости; \bar{R} - радиус звездочки; \bar{i} - передаточное отношение редуктора.

Синтез регуляторов системы (1), (2) целесообразно вести на основе достаточных условий абсолютного минимума [3,6]. Это позволяет, имея решение в общем виде, при использовании того или иного конкретного критерия оптимальности получить необходимый результат-закон управления; при этом не потребуются в каждом случае решать всю систему уравнений и отыскивать оптимальное управление из совокупности допустимых управлений, удовлетворяющих требованиям принципа максимума, который является только необходимым условием для нелинейных объектов.

Целевой функционал представим в общем виде:

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \bar{F}(\bar{\omega}_g, \bar{\omega}_h, \bar{\omega}_d, \bar{\omega}_g, \bar{M}_g, \alpha, \bar{U}_g, \bar{U}_h, \bar{X}_g) dt \quad (5)$$

Обозначим фазовые координаты в (1), (2) $\psi_{sji}, \psi_{svi}, \psi_{cvi}, \psi_{vji}, \omega_g, \bar{M}_g, \omega_{g0}, \omega_{h0}, \bar{X}_g$ через \bar{Q}_k , а правые части уравнений (1), (2), через \bar{P}_k , где $j=1,2,\dots,8; l=1,2,\dots,\pi$.

Образует вспомогательную функцию $\bar{R}(\bar{\psi}_{sji}, \bar{\psi}_{svi}, \bar{\psi}_{cvi}, \bar{\psi}_{vji}, \bar{\omega}_g, \bar{M}_g, \bar{\omega}_{g0}, \bar{\omega}_{h0}, \bar{X}_g, \bar{U}_g, \bar{U}_h, \alpha, \bar{P}, \bar{T}) =$

$$= \sum_{j=1}^{\pi} \sum_{i=1}^m \frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{Q}_k} \bar{P}_k + \sum_{k=1}^m \frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{X}_k} \bar{P}_k + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \bar{T}} - \bar{J}^0, \quad (6)$$

где $\bar{P}(\bar{T}, \bar{\psi}_{sji}, \bar{\psi}_{svi}, \bar{\psi}_{cvi}, \bar{\psi}_{vji}, \bar{\omega}_g, \bar{M}_g, \bar{\omega}_{g0}, \bar{\omega}_{h0}, \bar{X}_g)$ - некоторая произвольная функция фазовых координат \bar{Q}_k .

Условия оптимальности для задач с подвижными границами

$$\sup_{\bar{P}, \bar{T}} \bar{R}(\bar{\psi}_{sji}, \bar{\psi}_{svi}, \bar{\psi}_{cvi}, \bar{\psi}_{vji}, \bar{\omega}_g, \bar{M}_g, \bar{\omega}_{g0}, \bar{\omega}_{h0}, \bar{X}_g, \bar{U}_g, \bar{U}_h, \alpha, \bar{P}, \bar{T}) = 0. \quad (7)$$

$$(\alpha, \bar{U}_g, \bar{U}_h) \in \bar{U}$$

Необходимым условием экстремума является требование:

$$\frac{\partial \bar{R}}{\partial \bar{Q}_k} = 0. \quad (8)$$

Будем решать задачу в форме оптимального синтеза, т.е. будем искать законы изменения управлений $\{\alpha, \bar{U}_g, \bar{U}_h\} \in \bar{U}$ в функции фазовых координат $\{\bar{Q}_k\} \in \bar{P}$, обеспечивающие минимум

функционалу (5) при условиях (1), (2). Здесь \underline{U} , $\underline{\Psi}$ - области допустимых управлений и значений фазовых координат. Следовательно, можно допустить $\overline{d}\psi/\overline{d}t = 0$.

Решение задачи получим в виде:

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\partial f^0}{\partial \psi_{svi}} \left[\frac{U_{svi}}{K_{si} \omega_{pi} \alpha_{i0i}} - \frac{\psi_{svi}}{K_{si}} + \psi_{svi} + \frac{(\omega_{pi} \alpha_{i0i} - \overline{P}_{pi} \omega_{pi}) \psi_{svi}}{K_{si} \omega_{pi} \alpha_{i0i}} \right] + \right. \\ \left. + \frac{\partial f^0}{\partial \psi_{svi}} \left[\frac{U_{svi}}{K_{si} \omega_{pi} \alpha_{i0i}} - \frac{\psi_{svi}}{K_{si}} + \psi_{svi} - \frac{(\omega_{pi} \alpha_{i0i} - \overline{P}_{pi} \omega_{pi}) \psi_{svi}}{K_{si} \omega_{pi} \alpha_{i0i}} \right] - \right. \\ \left. - \frac{\partial f^0}{\partial M_{pi}} \left[\frac{0 \cdot \psi_{svi} U_{svi}}{K_{si} \omega_{pi} \alpha_{i0i}} - \frac{0 \cdot \psi_{svi} U_{svi}}{K_{si} \omega_{pi} \alpha_{i0i}} + \frac{(\omega_{pi} \alpha_{i0i} - \overline{P}_{pi} \omega_{pi}) 0 \cdot \psi_{svi}}{K_{si} \omega_{pi} \alpha_{i0i}} - M_{pi} \right] \right\} - f^0 = 0, \quad \psi_{svi}^2 = \psi_{svi}^2 + \psi_{svi}^2 \quad (9)$$

$$U_{svi} = \sup U_{svi}, \quad U_{svi} = \sup U_{svi}$$

$$U_{svi} \in \underline{U}, \quad U_{svi} \in \underline{U}$$

Пример 1

В ЭМС с двумя асинхронными короткозамкнутыми двигателями ($\overline{U}_{svi} = 0$) выравнять (либо обеспечить необходимое соотношение) электромагнитные моменты (M_{p1} , M_{p2}) двигателей при пульсирующем M_c и различных жесткостях трансмиссий.

Целевой функционал

$$J = \int (\underline{M}_{p1} - \underline{M}_{p2})^2 dt, \quad (\alpha, \underline{U}_{sv}) \in \underline{U} \quad (10)$$

Решение

$$\alpha_1 = \alpha_{p1} + A(\alpha_{i2} - \alpha_{p2}) \left(\frac{\psi_{sv2}}{\psi_{sv1}} \right)^2, \quad \underline{U}_{svi} = \sup \underline{U}_{svi}, \\ \text{где } A = \frac{\alpha_{i01} K_{s1} C_2}{\alpha_{i02} K_{s2} C_1}, \quad \psi_{svi}^2 = \psi_{svi}^2 + \psi_{svi}^2, \quad \alpha_{p1} = \frac{\overline{P}_{pi} \omega_{pi}}{\omega_{pi}} \quad (11)$$

Пример 2

Формирование заданного значения момента в трансмиссии (\underline{M}_{sv})

ЭМС с короткозамкнутым АД при определенном \underline{M}_0

Целевой функционал

$$J = \int_0^T (\underline{M}_0 - \underline{M})^2 dt, \quad (\alpha, \underline{U}_S) \in U \quad (12)$$

Решение

$$\alpha = \alpha_0 + A \frac{1}{\underline{J}_0} + \frac{1}{\underline{J}_0} \int_0^T (\underline{M}_0 - \underline{M}) dt + \frac{1}{\underline{J}_0} \frac{d^2 \underline{M}_0}{dt^2} + M, \quad \underline{U}_S = \overline{\text{sup}} \underline{U}_S, \quad (13)$$

где

$$A = \frac{\alpha_0 \underline{J}_0}{2C}, \quad \underline{J}_0^2 = \underline{J}_0^{(1)} + \underline{J}_0^{(2)}, \quad M = C(\underline{J}_0^{(1)} \underline{U}_S - \underline{J}_0^{(2)} \underline{U}_S),$$

\underline{J}_0 - жесткость трансмиссии.

Пример 3

Обеспечение заданного момента с минимальной амплитудой колебаний в ЭМС с короткозамкнутым АД при пуске, замедлении, электрическом торможении и в установившемся режиме с пульсирующим \underline{M}_0

Целевой функционал

$$J = \int_0^T (\underline{M}_0 - \underline{M})^2 dt, \quad (\alpha, \underline{U}_S) \in U. \quad (14)$$

Решение для частотного управления АД

$$\alpha = \alpha_0 + A \frac{\underline{M}_0 + M}{\underline{J}_0}; \quad \underline{U}_S = \overline{\text{sup}} \underline{U}_S; \quad A = \frac{\alpha_0 \underline{J}_0}{2C} \quad (15)$$

Решение для электродинамического торможения АД

$$\underline{U}_S = - \frac{(\underline{M}_0 + M) \underline{J}_0}{3T \underline{J}_0} \quad (16)$$

Рассмотрим задачу управления асинхронными короткозамкнутыми двигателями двухприводного скребкового конвейера (аналогично можно решать задачи и для других ЭМС с распределенными параметрами) с целью обеспечения минимума динамической нагруженности ЭМС [2]; математическое описание дано в (1), (3).

Минимизируемый целевой функционал

$$J = \int_0^T [(\underline{M}_0 - \underline{M}_1)^2 + (\underline{M}_0 - \underline{M}_2)^2 + \underline{y}_1 + \underline{y}_2] dt \quad (17)$$

где $\underline{M}_1, \underline{M}_2$ - необходимые и текущие значения электромагнитных моментов двигателей.

Фазовые координаты ЭМС по (1), (3) ($\underline{y}_1, \underline{y}_2, \underline{y}_3, \underline{y}_4, \underline{y}_5, \underline{y}_6, \underline{y}_7, \underline{y}_8$)

($\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3, \underline{U}_4, \underline{U}_5, \underline{U}_6, \underline{U}_7, \underline{U}_8, \underline{E}_1, \underline{E}_2, \underline{E}_3, \underline{E}_4, \underline{E}_5, \underline{E}_6, \underline{E}_7, \underline{E}_8$) обозначим последовательно $\underline{Q}_1, \underline{Q}_2, \dots$

\underline{Q}_j . Управляющие воздействия $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3, \underline{U}_4, \underline{U}_5, \underline{U}_6, \underline{U}_7, \underline{U}_8, \underline{E}_1, \underline{E}_2, \underline{E}_3, \underline{E}_4, \underline{E}_5, \underline{E}_6, \underline{E}_7, \underline{E}_8$, образуют вектор управления \underline{U} . Независимые переменные обозначим $\underline{x} = \underline{x}_1, \underline{z} = \underline{z}_2, \underline{v} = \underline{v}_3, \underline{w} = \underline{w}_4$, т.е. \underline{Q}_j ; $j = 1, 2, 3, 4$.

Правые части уравнений из (1) и (3) обозначим по правилу

$$\frac{\partial Q^0}{\partial x} = f^0(\bar{x}, \underline{Q}, \underline{u}) \quad (18)$$

Синтезировать управление ЭМС, описываемых дифференциальными уравнениями в частных производных, целесообразно на основе принципа максимума [4,2]. Запишем условия оптимальности

$$H = \sum_{i=1}^{19} \sum_{j=1}^4 \psi_{ij}^0 f_{ij}^0(\bar{x}, \underline{Q}^0, \underline{u}^0) - \bar{J}^0(\bar{x}, \underline{Q}^0, \underline{u}^0) - \sup \left[\sum_{i=1}^{19} \sum_{j=1}^4 \psi_{ij}^0 \frac{\partial \psi_{ij}^0}{\partial x}(\bar{x}, \underline{Q}^0, \underline{u}^0) - \bar{J}^0(\bar{x}, \underline{Q}^0, \underline{u}^0) \right], \quad \underline{u} \in \underline{U}, \quad (19)$$

где $\underline{Q}^0, \underline{u}^0$ - оптимальный процесс управления;

$\bar{J}^0(\bar{x}, \underline{Q}^0, \underline{u}^0)$ - подинтегральное выражение функционала (17);

$\psi_{ij}^0(x)$ определяется из условий

$$\sum_{j=1}^4 \frac{\partial \psi_{ij}^0}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial Q_i^0} = 0, \quad i=1,2,\dots,19. \quad (20)$$

При изменяющейся во времени статической нагрузке конвейера, определяемой производительностью комбайна \bar{q} и скоростью самого конвейера V_R , для переменного $M_H = M(\bar{q}, V_R)$ получим решение:

$$\alpha_{p1} = \alpha_{p1} + A_{p1} \frac{[M(\bar{q}, V_R) + M_{H1}]}{K_{s1}}, \quad \alpha_{p2} = \alpha_{p2} + A_{p2} \frac{[M(\bar{q}, V_R) + M_{H2}]}{K_{s2}}, \quad (21)$$

$$\underline{u}_{s1} = \sup \underline{u}_{s1}, \quad \underline{u}_{s2} = \sup \underline{u}_{s2},$$

где $A_{p1} = \frac{\alpha_{p1} K_{s1}}{2C\alpha}$, $A_{p2} = \frac{\alpha_{p2} K_{s2}}{2C\alpha}$, $\alpha_{p1} = \frac{P_{R1} \omega_1^2}{C\omega_1^2}$, $\alpha_{p2} = \frac{P_{R2} \omega_2^2}{C\omega_2^2}$

Анализ осциллограмм, фрагменты которых представлены на рис.2, показал, что управление скребковым конвейером длиной 100 м по (21) снижает амплитуды динамической составляющей усилия в цепи в 6-7

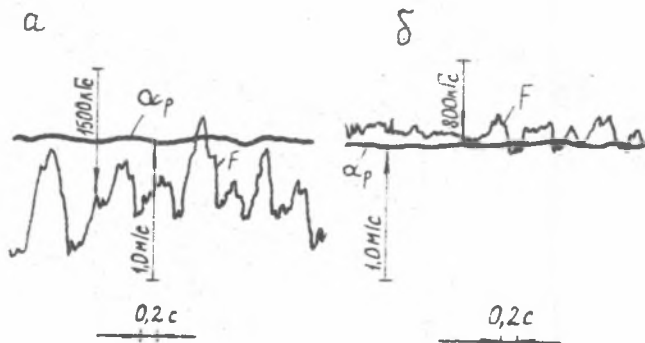


Рис. 2. Осциллограммы параметров, отражающих режим работы скребкового конвейера с нерегулируемыми (а) и регулируемым (б) электроприводами

F - усилие в цепи

раз. Следовательно, обеспечивается резкое повышение надежности, долговечности и увеличение допустимых рабочих длин конвейеров.

В сложных задачах оптимизации динамики горных машин с электроприводом или гидроприводом, в частности для систем, линейных по управлению, когда принцип максимума и достаточные условия абсолютного минимума не позволяют получить конкретный результат, а также для обхода необходимости чрезвычайно трудного выявления оптимальности экстремалей Понтрягина и в скользящих режимах целесообразно использовать методы особых оптимальных управлений [5]. Учитывая перспективность тиристорных электроприводов и утверждение В.Ф.Кротова [3] о том, что отсутствие минимума в классе кусочно-непрерывных функций столь же типично, как и его наличие, становится привлекательным широкое использование алгоритмов с разрывными управлениями, т.е. оптимизации скользящих режимов.

Для всех типов электропривода нужно использовать уравнения (1), с целью снижения трудоемкости определения оптимальных управлений и к ним добавлять уравнения типа (2) или (3).

Проверка решений (11), (13), (15), (21) методами из [5] подтвердила их оптимальность.

Оптимально управлять динамикой гидроопор добычных комбайнов, гидроподач буровых станков (для взрывных скважен) и установок (для вертикальных стволов и вентиляционных скважин), породопроходческих комбайнов можно изменением площади впускных и выпускных окон с помощью электрически управляемых гидроусилителей. Используя методы [5] можно резко (в 8-10 раз) снизить динамические составляющие усилий и вибрацию машин, повысив этим их долговечность и, следовательно, интегральную производительность.

Вследствие систематичности стопорений исполнительных органов горных машин, скребковых конвейеров и дробилок для руды и породы их электропривод должен иметь экскаваторную механическую характеристику для ограничения медленных перегрузок и электрическое (рекуперативное или конденсаторно-динамическое) торможение для защиты от экстренных перегрузок [6,7].

Примеры технической реализации оптимального управления динамикой представлены в [8,9].

Так как преобладающим видом повреждений трансмиссий и конструкций машин этого класса (да и многих других) является усталостный, а для электрических машин (изоляция обмотки), полупроводниковых и электромагнитных аппаратов - термомеханический, обнаружить которые в процессе эксплуатации весьма трудно, то считаем целесообразным моделировать накопление повреждений в наиболее характерных (менее долговечных) частях по нагрузкам, действующим в электроприводах. Например, в Кузбасском политехническом институте созданы и успешно испытаны в режимах контроля и автоматического адаптивного уп-

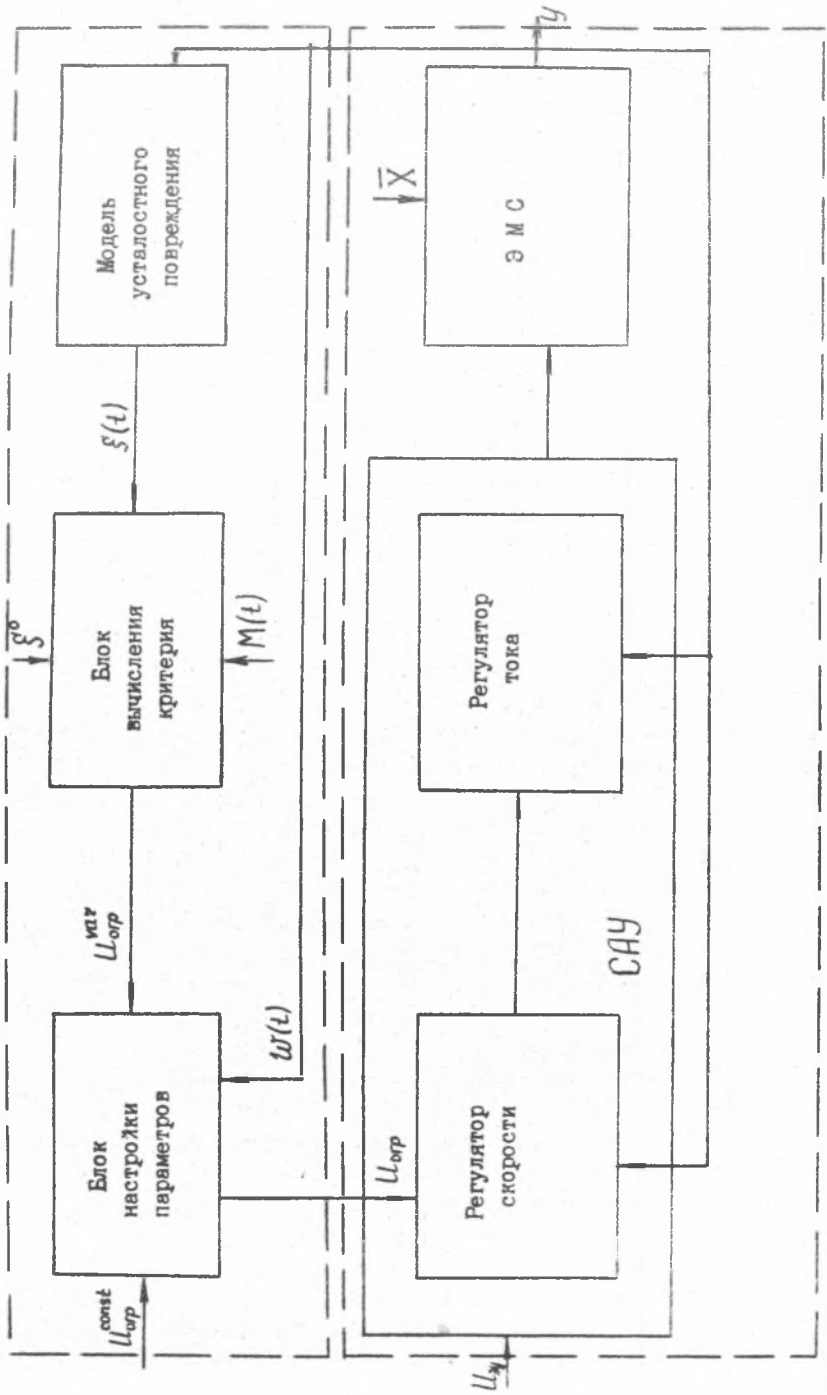


Рис. 3. Функциональная схема системы адаптивного управления динамикой и техническим состоянием горных машин

правления системы управления с полупроводниковыми устройствами, моделирующими термовибромеханические повреждения изоляции жестких секций асинхронных двигателей и усталостные повреждения трансмиссии горных машин (рис.3.) [10,11,12].

Для определения эффективности работы механизма сформулирован пороговый критерий, определяемый величиной ресурса усталостной долговечности узла, израсходованной на интервале времени T_{Π} , необходимом для совершения механизмом некоторой заданной работы A^0 .

$$W = \left(\int_0^{T_{\Pi}} P_{\text{дв}}(\bar{t}) d\bar{t} \right) \quad (22)$$

Особенностью принятого критерия является возможность определения его величины только в дискретные моменты времени, когда становится тождеством выражение

$$A^0 - \int_0^{T_{\Pi}} P_{\text{дв}}(\bar{t}) d\bar{t} = 0, \quad (23)$$

где T_{Π} - время выполнения работы A^0 ; $P_{\text{дв}}(\bar{t}) > 0$ - мощность на валу приводного двигателя, направленная на совершение механической работы.

Зависимость порогового критерия (определенного по усталостному повреждению зубьев колеса редуктора привода подъема) от величины уставки тока отсечки, полученная путем моделирования процесса копания приведена на рис.4.

Наличие минимума критерия эффективности W в области значений коэффициента отсечки позволяет решать задачу оптимизации расхода ресурса узлов привода, приходящуюся на единицу совершаемой им

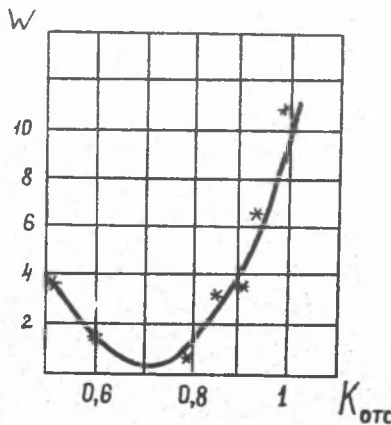


Рис. 4. Зависимость ресурсоемкости от коэффициента отсечки тока электропривода

работы. Исследования на цифровой модели показали, что при увеличении дисперсии нагрузки значение коэффициента отсечки $K_{отс}^*$, соответствующее экстремуму показателя эффективности W , смещается в сторону нижней границы допустимых значений коэффициента отсечки

$$K_{отс}^{max} \geq K_{отс}^* \geq K_{отс}^{min}$$

и может выходить за нее.

Предложен метод автоматического изменения статической характеристики привода путем изменения напряжения звена ограничения регулятора скорости системы управления приводом в функции [12]:

$$U_{огр} = U_{огр}^{const} + U_{огр}^{var} \cdot \omega, \quad (24)$$

где $U_{огр}^{const}$ - постоянная составляющая напряжения управления звеном ограничения; $U_{огр}^{var}$ - изменяемая составляющая напряжения управления звеном ограничения.

Показано, что используя предлагаемый метод, статическая характеристика привода описывается зависимостью

$$M = \frac{U_{огр}^{const} K_{п1} \beta_e - \beta_e (1 - K_{п1} U_{огр}^{var}) \omega}{1 + \beta_e K_{ом} K_{п1}} \quad (25)$$

и форма ее зависит от значения постоянной и изменяемой составляющих напряжения управления звеном ограничения. При этом изменяемая составляющая $U_{огр}^{var}$ обеспечивает требуемую жесткость статической характеристики в режиме стабилизации момента, а постоянная составляющая $U_{огр}^{const}$ - величину стопорного момента. Показано, что основой метода автоматического формирования статической характеристики является дополнительная обратная связь по скорости с регулируемым коэффициентом передачи $U_{огр}^{var}$.

Особенность включения дополнительной обратной связи состоит в том, что она размыкается в режиме стабилизации скорости при работе САУ на насыщенном участке статической характеристики регулятора скорости рис.5. и включается, когда система работает в режиме стабилизации момента (зона насыщения статической характеристики регулятора скорости рис.5), а действие связи проявляется путем смещения уровня напряжения ограничения на выходе регулятора скорости в функции (24). Получаемая при этом форма статической характеристики легко контролируется по значениям напряжений $U_{огр}^{var}$ и $U_{огр}^{const}$.

В данном случае задача синтеза самонастраивающейся системы управления сводится к задаче статической параметрической оптимизации САУ приводом, решаемой беспоисковым методом. Алгоритм

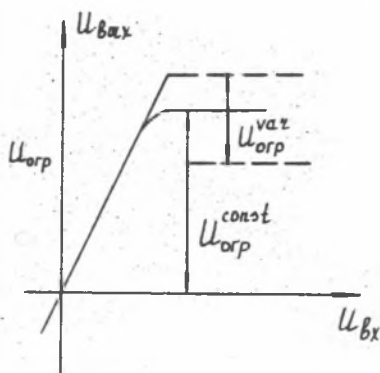


Рис. 5. Формирование автоматически изменяемой статической характеристики электропривода

беспоисковой настройки предусматривает вычисление разности между текущим значением критерия эффективности $\xi(T_{ni})$ и его заданным значением ξ^e , сведение к нулю полученной разности в соответствии с принципом управления по отклонению.

$$U_{\text{орг}}^{(i)} = \sum_{i=1}^n \gamma \operatorname{sign} [\xi(T_{ni}) - \xi^e], \quad \xi(T_{ni}) = F(\bar{y}, U_{\text{орг}}), \quad (26)$$

где \bar{y} - вектор внутреннего состояния ЭМС; T_{ni} - i -тый интервал времени вычисления критерия эффективности; γ - шаг алгоритма. Адаптивное управляющее устройство выполнено на базе аналоговых и цифровых интегральных микросхем, успешно испытано на добычном комбайне, экскаваторе ЭК-4,6Б и работает на экскаваторе ЭШ-13/3СА.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Уайт Д.С., Вудсон Г.Х.: Электромеханическое преобразование энергии. М.-Л: Энергия, 1964, с. 528.
- [2] Гаврилов П.Д., Ешин Е.К.: Снижение уровня динамической нагруженности скребкового конвейера при помощи асинхронного частотно-управляемого электропривода. Горный журнал, 1978, № , с. 99-105 (изв. высш. заведений).
- [3] Крстов В.Ф., Гурман В.И.: Методы и задачи оптимального управления. М.: Наука, 1973, с. 146.
- [4] Бутковский А.Г.: Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. - М.: Наука 1965, с. 476.
- [5] Габасов Р., Кириллова Ф.М.: Особые оптимальные управления. -М.:Наука, 1973, с. 256
- [6] Гаврилов П.Д.: Автоматизированный электропривод горных машин: Учебное пособие (Кузбас) политехн. ин-т.-Кемерово. 1983, с. 71.

- [7] Гаврилов П.Д.: Автоматизированный электропривод горных и транспортных машин Кузбас. политехи. ин-т.-Кемерово 1976, с. 68.
- [8] А.С. № 750175 СССР, МКИ³ 16 15/02. Способ гашения колебаний сил упругости в приводе П.Д. Гаврилов, В.А. Грасс, Е.К. Еднин, В.И. Янцен (СССР). № 2533377 25-28; заявлено 18.10.77; Опубли. 23.07.80, Бюл. № 27.
- [9] А.с. № 899884 СССР, МКИ³ E21C1/100. Способ автоматического регулирования режимов бурения шарошечных станков П.Д. Гаврилов, В.А. Грасс, Е.К. Еднин, В.И. Янцен (СССР). № 2500516/22-03; заявлено 23.06.77; Опубли. 23.01.82. Бюл. № 3.
- [10] А.с. № 208491 СССР, МКИ³ 01 3/06. Устройство для определения усталостной долговечности материала конструкций П.Д. Гаврилов, С.Г. Филимонов (СССР).- № 357191/25-28; Заявлено 01.04.85; Опубли. 30.01.86. Бюл. № 4.
- [11] А.с. № 1232990 СССР, МКИ³ 01 3/06. Устройство для определения усталостной долговечности машиностроительных конструкций П.Д. Гаврилов, С.Г. Филимонов (СССР).- № 3815106/25-28; Заявлено 21.11.84; Бюл. № 19.
- [12] А.с. № 1296692 СССР, МКИ³ 02 9/20. Устройство управления электроприводом постоянного тока П.Д. Гаврилов, С.Г. Филимонов (СССР). № 3902503/29-03; Заявлено 23.05.85; Опубли. 15.03.87, Бюл. № 10.

OPTIMALNE I NADĄŻNE STEROWANIE DYNAMIKĄ ORAZ STANEM TECHNICZNYM MASZYN GÓRNICZYCH

S t r e z z e n i e

Максимальную отдачу комплексов при вынужденных расходах собственных средств можно достигнуть только при оптимальном и надążном управлении динамикą oraz stanem technicznym maszyn górnicych.

W rozwiązaniu tego problemu za główne przyjęto kryterium minimalnej jednostkowej chłoności zasobów (zużycie środków technicznych na jednostkę wykonanej precy). Opracowano metody syntezy oraz urządzenia optymalnego nadążnego systemu sterowania automatycznego (SAU) w oparciu o zasadę maksimum, wymagane warunki bezwzględnego minimum i szczególne optymalne wymagania, metody i urządzenia zabezpieczające przed przeciążeniami, identyfikację obciążenia i diagnostykę stanu technicznego systemu elektromechanicznego łącznie z pośrednim określeniem okresu trwałości zmęczeniowej maszyn oraz termicznego i wibracyjnego zużycia izolacji uzwojeń silników.

Opracowane systemy oprócz optymalizacji procesów dynamicznych pozwalają ocenić kwalifikacje maszynistów oraz dają naukową i techniczną podstawę do optymalizacji terminów przeprowadzania remontów według perspektywicznej metody agregatowo-węzłowej.

OPTIMUM AND ADAPTIVE CONTROL OF DYNAMICS AND TECHNICAL CONDITION
OF MINING MACHINES

S u m m a r y

Maximum efficiency of complex at given prime cost can be achieved only at optimum and adaptive control of mining machines.

The criterion of minimum unit absorptivity of resources (the use of technical means on the work unit) is assumed as the main criterion in solving this problem. A synthesis method and a device for optimum adaptive system of automatic control were worked out. They are based on the maximum principle, required conditions of absolute minimum and particular optimum requirements, methods and systems protecting against overloading, identification of the load and diagnosis of technical conditions of electro-mechanical system together with indirect determination of fatigue life of machines and thermal and vibration wear of installation of motor windings.

The worked out system apart from optimization of dynamic processes make it possible to assess qualifications of machine operators and give scientific and technical basis for optimization of maintenance dates.