



УДК 62-581

*В. А. Новиков, А. С. Ануфриев, Р. М. Нуриахметов*

## **КРИТЕРИИ И МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ ПРИНЯТИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ**

*Дается анализ обобщенных и частных критериев, применяемых на этапах проектирования и эксплуатации многодвигательных электроприводных систем. Обобщенный критерий содержит частные критерии, отражающие производительность, качество технологии и энергопотребление систем. Модели систем кроме традиционных электромагнитных и механических переменных содержат технологические и энергетические переменные.*

**Многодвигательные электроприводные системы, обобщенные и частные критерии оптимизации решений, производительность, качество технологии, энергопотребление систем**

В статье [1] изложена методика анализа многодвигательных автоматизированных электроприводных систем (ЭПС) для принятия решения об оптимальном варианте системы, приемлемой для конкретной технологии. Выбор производится при условии многовариантности решений в выполнении электротехнической, механической и технологической частей рабочих машин и технологических комплексов и обеспечения заданной производительности, качества технологии, использования энергоресурсов при максимальном энергосбережении. В целом, такой анализ способствует решению задачи повышения эффективности рабочих машин и технологических комплексов средствами высокодинамичных ЭПС.

Понятие эффективности относится к экономическим категориям. К показателям оценки эффективности, используемым в экономических исследованиях, относятся чистый доход, чистый дисконтированный доход, индекс доходности, срок окупаемости проекта и другие [2]. Используется также понятие коммерческой эффективности, которое характеризует с экономической точки зрения технические, технологические и организационные проектные решения. Именно с этим понятием связано применение в машинах и комплексах современных высокодинамичных ЭПС.

Целью настоящей статьи является анализ обобщенных и частных критериев, применяемых на этапах проектирования и эксплуатации многодвигательных электроприводных систем; анализ моделей систем, соответствующих этим критериям и включающих в себя электромагнитные, механические, технологические, энергетические переменные; оптимизация систем.

**Обобщенные и частные критерии оптимизации.** Будем исходить из представления обобщенного критерия  $Q$  в виде суммы частных критериев  $q_i$  с весовыми коэффициентами  $b_i$  :

$$Q = \sum_{i=1}^n b_i q_i(\mathbf{a}),$$

где  $\mathbf{a}$  – вектор варьируемых параметров и переменных ЭПС.

Как показано в [1], оптимизацию ЭПС можно выполнять в большинстве случаев по трем частным критериям, включающим в себя оценки производительности, динамической точности и связанных с ней качеством технологии и продукции, электропотребления. Оценки по остальным частным критериям могут рассматриваться в виде ограничений. На стадии проектирования важной оценкой служит и цена проекта, на эксплуатационной стадии – составляющие эксплуатационных затрат. Оба эти вида оценок вносятся в оценки трех названных выше частных критериев. В таком случае обобщенный критерий на стадии проектирования определяет цену решения, а на стадии эксплуатации – цену эксплуатационных затрат при заданном качестве технологии и производительности. При таком подходе коммерческие оценки эффективности смыкаются с экономическими оценками и имеется возможность их получения в любых принятых формах экономического анализа.

Все отмеченные оценки удобно использовать в нормированном виде, представляя их как отношения текущих оценок к их заданным значениям. В качестве заданных значений могут быть приняты усредненные значения оценок, определяемые по ценам рынка, и максимальные или минимальные их значения. В таком случае без учета ограничений

$$Q = b_1 \left[ \frac{q_1(\mathbf{a})}{q_{1\text{зад}}} \right] + b_2 \left[ \frac{q_2(\mathbf{a})}{q_{2\text{зад}}} \right] + b_3 \left[ \frac{q_3(\mathbf{a})}{q_{3\text{зад}}} \right],$$

где  $q_i(\mathbf{a})$ ,  $q_{i\text{зад}}$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , – текущая и заданная оценки трех частных критериев.

Нормированные оценки частных критериев целесообразно также представлять в разностном виде (в виде потерь по каждой оценке) по отношению к заданным значениям оценок. Для одноагрегатных рабочих машин имеем:

$$Q = b_1 \left[ \frac{q_{1\text{зад}} - q_1(\mathbf{a})}{q_{1\text{зад}}} \right] + b_2 \left[ \frac{q_{2\text{зад}} - q_2(\mathbf{a})}{q_{2\text{зад}}} \right] + b_3 \left[ \frac{q_{3\text{зад}} - q_3(\mathbf{a})}{q_{3\text{зад}}} \right].$$

Для многоагрегатных рабочих машин и технологических комплексов обобщенный критерий, содержащий вышеуказанные оценки, может быть записан в следующем виде:

$$Q = \left[ \sum_{i=1}^k B_i q'_i(\mathbf{a}) + \sum_{j=1}^n B_j q'_j(\mathbf{a}) + \sum_{f=1}^h B_f q'_f(\mathbf{a}) \right],$$

где  $q'_i(\mathbf{a})$ ,  $q'_j(\mathbf{a})$ ,  $q'_f(\mathbf{a})$  – потери производительности, качества технологии, энергоресурсов соответственно;  $B_i$ ,  $B_j$ ,  $B_f$  – весовые коэффициенты потерь.

Подобный критерий используется не только при оптимизации на этапе проектирования, но и при автоматической оптимизации на этапе эксплуатации систем. В автоматическом режиме осуществляется минимизация обобщенного критерия качества с учетом энергетических и технологических ограничений. Для конкретной технологии этот критерий трансформируется в вид, отражающий специфику технологии, но основные его компоненты сохраняются. Если оценки выполняются в виде потерь, то при эксплуатационной оптимизации применяют квадратичные формы оценок. Так, например, для экструдеров применяют обобщенный критерий в виде

$$Q' = b'_1 \left( \frac{q_{1\text{зад}} - q_1(\mathbf{a})}{q_{1\text{зад}}} \right)^2 + b'_2 \left( \frac{q_{2\text{зад}} - q_2(\mathbf{a})}{q_{2\text{зад}}} \right)^2 + b'_3 \left( \frac{q_{3\text{зад}} - q_3(\mathbf{a})}{q_{3\text{зад}}} \right)^2.$$

В качестве заданных значений частных критериев принимают максимальную производительность ( $q_{1\text{зад}} = q_{1\text{max}}$ ), минимальное значение коэффициента настройки течения экструдата ( $q_{2\text{зад}} = q_{2\text{min}}$ ) и минимально потребляемую мощность ( $q_{3\text{зад}} = q_{3\text{min}}$ ). В качестве варьируемых переменных  $\mathbf{a}$  принимаются частота вращения шнека, момент на его валу и входная температура экструдера [3].

Для пятиклетьевого стана холодной прокатки обобщенный критерий качества записывается в следующем виде:

$$Q' = B' \left( \frac{v_{5\text{max}} - v_5}{v_{5\text{max}}} \right)^2 + \sum_{i=1}^5 B_i'' \left[ \left( \frac{\delta h_i}{h_i} \right) - \left( \frac{\delta h_i}{h_i} \right)_3 \right]^2 + \sum_{i=1}^5 B_i''' \left( \psi_i \frac{P_i}{P_{iH}} - \psi_{i+1} \frac{P_{i+1}}{P_{(i+1)H}} \right)^2,$$

где  $v_{5\text{max}}$ ,  $v_5$  – максимально возможная и фактическая скорости прокатки в пятой клетки;

$\left( \frac{\delta h_i}{h_i} \right)$ ,  $\left( \frac{\delta h_i}{h_i} \right)_3$  – фактическая и заданная поперечные разнотолщинности на выходе из

клетки  $i$ ;  $\psi_i$  – коэффициент относительной загрузки клетки  $i$ ;  $P_i$ ,  $P_{iH}$  – фактическая и номинальная мощности клетки  $i$ .

Минимизация первого слагаемого критерия обеспечивает максимизацию скорости прокатки, а следовательно, и производительности стана. Минимизация пяти следующих слагаемых обеспечивает условия равенства вытяжек по ширине полосы, которое записано через относительные поперечные разнотолщинности, что приводит к достижению заданного качества металлической полосы. Минимизация пяти последних слагаемых позволяет получить заданное распределение нагрузок по клетям стана, которое основывается на требовании минимизации суммарных энергетических затрат стана. Варьируемыми параметрами являются коэффициенты обжатия клетей и скорость стана.

**Анализ моделей и оптимизация систем.** В наиболее общем виде описание электромагнитной, механической и технологической подсистем ЭПС может быть выполнено в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = F(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{f}, t),$$

или

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} + \mathbf{D}(\mathbf{x}, t)\mathbf{f};$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x},$$

где  $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$ ,  $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ ,  $\mathbf{D}(\mathbf{x}, t)$  – матрицы состояния, управления и возмущения соответственно;  $\mathbf{C}$  – масштабная матрица;  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{y}$  – векторы переменных состояния, управления, возмущения и контролируемых переменных соответственно.

В соответствии с принципом каскадного управления в математическом описании подсистем более высокого уровня используется упрощенное математическое описание подсистем низкого уровня. В соответствии с таким описанием выполняются исследования и оптимизация подсистем и ЭПС в целом, устанавливаются компоненты оценок частных критериев производительности и динамической точности. Для оценки электропотребления всеми электроприводами машины или комплекса применяют следующие виды оценок: мгновенных мощностей – механических  $\sum P_{Mi} = \sum \omega_i M_i$ , электрических  $\sum P_{\Sigma i} = \sum k_i u_i i_i \cos \varphi_i$ ; функций, определяющих электрические и механические потери  $\sum \Delta P_i = \sum f_i(M_i, \omega_i, \Phi_i)$ ; суммарных мощностей  $P_{\Sigma} = \sum P_{Mi} + \sum P_{\Sigma i} + \sum \Delta P_i$ ; значений энергий, затрачиваемых в течение времени цикла работы оборудования, или заданного

$$\text{временного интервала } A = \int_0^T P_{\Sigma} dt .$$

Остановимся более подробно на частном критерии, характеризующем динамическую точность системы и качество технологии. В первую очередь он актуален для технологического оборудования непрерывно-поточных производств. Этот критерий является ключевым в процессе оптимизации системы по обобщенному критерию и напрямую связан с динамическими свойствами ЭПС, полосами пропускания контуров регулирования механических переменных и с уровнями возмущающих воздействий. Как правило, повышение производительности связано с повышением спектрального состава и интенсивности возмущений, с увеличением динамических ошибок и снижением качества технологии. Устранение этого явления возможно путем расширения полос пропускания контуров регулирования и применения более сложных алгоритмов регулирования. Математическое описание динамических процессов в ЭПС удобно в этом случае выполнять с использованием частотных характеристик систем.

При проектировании высокодинамичных и взаимосвязанных ЭПС с позиции достижения заданных или предельных динамических точностей объект управления необходимо рассматривать не как заданный, а как изменяемый совместно с регуляторами для решения главной задачи – получения нужных точностей движения. В связи с этим и коэффициенты инерции, и параметры упругих механических связей объекта являются в процессе синтеза варьируемыми параметрами.

Исходя из этого определим обобщенный критерии качества для синтеза системы и сформулируем условие декомпозиции системы управления. Декомпозиция взаимосвязанной системы, приводящая к возможности ее рассмотрения в виде отдельных сепаратных систем, близких к автономным системам, в той или иной форме всегда используется при синтезе сложных систем. Это дает возможность существенно упростить создание сложной системы управления как на этапе синтеза, так и на этапе ее технической реализации.

Рассматривая  $r$  выходных переменных ЭПС с учетом их вклада в формирование показателя качества технического объекта, определим обобщенный критерий качества через частные критерии с учетом нормы вектора оценок, вектора варьируемых параметров  $\mathbf{a}$  и ограничений переменных в следующем виде:

$$Q'' = \sum_{i=1}^g \beta_i \sum_{j=1}^r q_{ij}(\mathbf{a}); \quad (1)$$

$$q_{ij}(\mathbf{a}) \leq c_i, \quad i = \overline{g+1, r}; \quad \mathbf{a} \in M_a,$$

где  $\beta_i$  – коэффициенты веса выходных переменных;  $c_i$  – значения ограничений по оценкам частных критериев качества;  $q_{ij}(\mathbf{a})$  – элементы матрицы  $q'(\mathbf{a}) = [q_{ij}(\mathbf{a})]$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ;  $M_a$  – замкнутое множество допустимых значений  $\mathbf{a}$ .

Условия диагональной доминантности матрицы оценок, при которых

$$q_{ij}(\mathbf{a}) \geq \beta \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^r q_{ij}(\mathbf{a}), \quad (2)$$

определяют и условие декомпозиции взаимосвязанной системы управления. При этом в формуле (1) можно приближенно считать

$$\sum_{j=1}^r q_{ij}(\mathbf{a}) \approx q_{ii}(\mathbf{a}), \quad Q'' = \sum_{i=1}^g \beta_i q_{ii}(\mathbf{a}).$$

Следовательно, изменением вектора параметров  $\mathbf{a}$  необходимо минимизировать оценку обобщенного критерия качества  $Q$  с учетом ограничений координат системы и обеспечить выполнение условия (2). Используемый принцип декомпозиции взаимосвязанной системы определяется как принцип динамической декомпозиции [4].

Результирующие динамические ошибки ЭПС зависят от регулярных и случайных составляющих возмущений. К регулярным составляющим относятся: оборотные и зубцовые изменения потока двигателя и связанные с этим изменения движущего момента; оборотные изменения момента сопротивлений механизма и кинематической передачи, а также изменения электромагнитного момента в двигателях переменного тока в связи с отклонением формы напряжений и токов статоров от гармонической формы; волновые, периодические и другие виды изменений момента сопротивлений, связанные с технологическим процессом. К случайным составляющим возмущений относятся случайные изменения момента сопротивлений и напряжения сети, а также помехи в каналах измерения координат движения.

В системах управления эффективно уменьшается составляющая результирующей ошибки, вызванная изменениями напряжения сети, если применяются внутренние подчиненные контуры регулирования тока или напряжения управляемого преобразователя. Наибольшее влияние на величину динамической ошибки системы оказывают изменения момента сопротивлений и помехи в системе обработки информации о координатах движения электропривода. Оптимизация системы, исходя из минимума суммарной динамической ошибки, связана в этом случае с удовлетворением противоречивых требований оптимальной фильтрации помех измерения и составляющих ошибок от изменений момента нагрузки.

Экспериментальные исследования систем электроприводов показывают, что случайные процессы при равномерном движении подчиняются условиям стационарности и эргодичности и имеют распределение плотности вероятности, близкое к нормальному закону.

В практических ситуациях возмущающие воздействия и помехи измерения координат движения могут иметь самый разнообразный вид и форму описания. В частности, адекватным их описанием могут быть описания в виде отдельных гармонических составляющих ряда Фурье

$$f(t) = f_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k)$$

с компонентами, изменяющимися случайным образом, имею-

щими спектральные плотности  $S(\omega) = 2\pi \left\{ f_0^2 \delta(\omega) + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k^0/4) [\delta(\omega - \omega_k) + \delta(\omega + \omega_k)] \right\}$ ; белых

или цветных шумов; волновых процессов  $f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^s c_k \sin \omega_k t + c'_k \cos \omega_k t$ , а также различ-

ных их сочетаний. В связи с этим структура системы управления может быть различной и в большей или меньшей степени приспособленной к конкретной практической ситуации.

Общую процедуру динамического синтеза ЭПС целесообразно выполнять с использованием ПК в три этапа: 1) синтез квазиоптимальной структуры системы; 2) синтез электромагнитной и механической подсистем; 3) параметрический синтез в рамках квазиоптимальной технически реализуемой структуры. Основанием для решения задач первого этапа является использование сравнительно ограниченного числа структур систем управления с примерно равными динамическими возможностями, что позволяет путем приближенного динамического синтеза с учетом реальных воздействий и основных ограничений выбрать квазиоптимальную структуру.

Воздействия на ЭПС учтем  $k$ -вектором  $\mathbf{p}$  ( $\mathbf{p} \in R^k$ ), а контролируемые координаты  $r$ -вектором  $\mathbf{y}$  ( $\mathbf{y} \in R^r$ ). Считаем, что из  $r$  координат вектора  $\mathbf{y}$   $g$  координат определяют показатель качества технического объекта, а остальные  $(r - g)$  координат должны находиться в пределах заданных ограничений.

Рассматривая воздействия на систему в виде суперпозиции детерминированных и стохастических процессов и полагая возможным представление детерминированных процессов в виде рядов Фурье, запишем элементы вектора  $\mathbf{p}$  в виде  $p_j = q_j + A_j \sin \omega_j t$ ,  $j = \overline{1, k}$ , где  $q_j$  – случайная составляющая воздействия.

Выразив спектральную плотность  $S_{qi}(\omega)$  случайной составляющей  $q_j$  через интенсивность белого шума  $N_j$  и характеристики формирующего фильтра  $S_{qi}(\omega) = N_j |W_{\Phi j}(j\omega)W_{ij}(j\omega)|^2 d\omega$ , где  $W_{\Phi j}(j\omega)$  – передаточная частотная функция формирующего фильтра, а спектральную плотность – гармонической составляющей воздействия в виде  $S_{A_i}(\omega) = 2\pi A_j/4 [\delta(\omega - \omega_j) + \delta(\omega + \omega_j)]$  и относя передаточную функцию фильтра к передаточной функции системы управления от  $j$ -го воздействия к  $i$ -й координате  $W_{ij}(j\omega)$ , можно записать средний квадрат динамических отклонений  $i$ -й координаты в следующем виде:

$$\overline{y_i^2} = \sum_{j=1}^k \left[ \frac{N_j}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{\Phi_j}(j\omega)W_{ij}(j\omega)|^2 d\omega + 0.5A_j^2 |W_{ij}(j\omega_j)|^2 \right].$$

Или, принимая во внимание, что выражение  $\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{\Phi_j}(j\omega)W_{ij}(j\omega)|^2 d\omega = \omega_{ji}$  является эффективной полосой пропускания системы и обозначив  $0.5A_j^2 = A_j'^2$ , получим

$$\overline{y_i^2} = \sum_{j=1}^k \left[ N_j \omega_{ji} + A_j'^2 |W_{ij}(j\omega_j)|^2 \right].$$

Если случайные воздействия представить в виде  $k$ -мерного вектора интенсивностей белого шума  $\mathbf{N} = [N_1 N_2 \dots N_k]^T$ , регулярные воздействия – в виде  $k$ -мерного вектора квадратов амплитуд  $\mathbf{A} = [A_1'^2 A_2'^2 \dots A_k'^2]^T$  и динамические отклонения координат – в виде  $r$ -мерного вектора средних квадратов отклонений  $\mathbf{y} = [y_1^2 y_2^2 \dots y_r^2]^T$ , то уравнение, характеризующее динамические процессы в системе, может быть записано в векторно-матричной форме в виде

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{N} + \mathbf{K}\mathbf{A}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{W} = [\omega_{ij}]$ ,  $i = \overline{1, r}$ ,  $j = \overline{1, k}$  –  $(r \times k)$ -матрица эффективных полос пропускания системы;  $\mathbf{K} = [|W_{ij}(j\omega_j)|^2]$ ,  $i = \overline{1, r}$ ,  $j = \overline{1, k}$  –  $(r \times k)$ -матрица квадратов модулей передаточных частотных функций.

В процессе параметрической оптимизации системы в рамках квазиоптимальной структуры находятся параметры регуляторов, при которых обеспечивается минимум суммарной дисперсии или среднего квадрата отклонений выходных координат при учете основных ограничений в системе и упругих механических связей электроприводов. Формирование передаточных частотных функций  $W_{ij}(j\omega_j)$  выполняется на основании унифицированных динамических характеристик контуров регулирования отдельных систем при вариации ряда параметров. Обозначив вектор варьируемых параметров  $\mathbf{a} = [a_1^2 a_2^2 \dots a_i^2]^T$ , можно записать обобщенный критерий качества в следующем виде:

$$Q'' = \sum_{i=1}^g \beta_i y_i^2(\mathbf{a}), \quad \mathbf{a} \in M_a.$$

Ограничения остальных  $(r - g)$  координат, записанных в виде неравенств  $\overline{y_i^2}(\mathbf{a}) \leq c_i$  при  $i = \overline{g+1, r}$ , могут быть установлены следующим образом. При нормальном законе распределения динамических отклонений координат систем за максимальное отклонение

может быть принята величина  $\Delta_{i \max} \approx 3\sigma_{y_i}$ ,  $i = \overline{g+1, r}$  где  $\sigma_{y_i} = \sqrt{\overline{y_i^2(\mathbf{a})}}$  – среднеквадратическое отклонение координаты  $y_i$ . В связи с этим условия учета ограничений при синтезе системы могут быть записаны в виде  $\sigma_{y_i} \leq (1/3)c_i$   $i = \overline{g+1, r}$  или  $\overline{y_i^2} \leq (1/9)c_i$ ,  $i = \overline{g+1, r}$ . Если каждый из векторов  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{a}$  представить в виде составных векторов  $\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1^T \mathbf{y}_2^T \dots \mathbf{y}_g^T]^T$ ,  $\mathbf{N} = [\mathbf{N}_1^T \mathbf{N}_2^T \dots \mathbf{N}_g^T]^T$ ,  $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_2^T \dots \mathbf{A}_g^T]^T$ ,  $\mathbf{a} = [\mathbf{a}_1^T \mathbf{a}_2^T \dots \mathbf{a}_g^T]^T$  в соответствии с числом координат, входящих в обобщенный критерий качества, то уравнение (3) можно представить в блочно-матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_1(\mathbf{a}) \\ \mathbf{y}_2(\mathbf{a}) \\ \vdots \\ \mathbf{y}_g(\mathbf{a}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{11}(\mathbf{a}) & \mathbf{W}_{11}(\mathbf{a}) & \dots & \mathbf{W}_{1g}(\mathbf{a}) \\ \mathbf{W}_{21}(\mathbf{a}) & \mathbf{W}_{22}(\mathbf{a}) & \dots & \mathbf{W}_{2g}(\mathbf{a}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{W}_{g1}(\mathbf{a}) & \mathbf{W}_{g2}(\mathbf{a}) & \dots & \mathbf{W}_{gg}(\mathbf{a}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{N}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{N}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11}(\mathbf{a}) & \mathbf{K}_{11}(\mathbf{a}) & \dots & \mathbf{K}_{1g}(\mathbf{a}) \\ \mathbf{K}_{21}(\mathbf{a}) & \mathbf{K}_{22}(\mathbf{a}) & \dots & \mathbf{K}_{2g}(\mathbf{a}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{K}_{g1}(\mathbf{a}) & \mathbf{K}_{g2}(\mathbf{a}) & \dots & \mathbf{K}_{gg}(\mathbf{a}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_g \end{bmatrix}. \quad (4)$$

При реализации условий динамической декомпозиции квадратичные блочные матрицы могут быть представлены в виде диагональных блочных матриц и уравнение (4) может быть записано в виде  $g$  матричных уравнений

$$\mathbf{y}_i(\mathbf{a}_i) = \mathbf{W}_{ii}(\mathbf{a}_i)\mathbf{N}_i + \mathbf{K}_{ii}(\mathbf{a}_i)\mathbf{A}_i, \quad i = \overline{1, g},$$

содержащих составляющие векторов  $\mathbf{y}_i$ ,  $\mathbf{N}_i$ ,  $\mathbf{A}_i$ ,  $\mathbf{a}_i$ , элементы которых относятся только к собственным основным сепаратным системам. Такое представление существенно упрощает синтез ЭПС.  $S(\omega)$

Таким образом, с учетом принятых альтернатив построения ЭПС необходимо найти решение, для которого

$$Q^* = \min \left[ Q = \sum_{i=1}^g b_i \overline{y_i^2(\mathbf{a})} \right], \quad \overline{y_i^2(\mathbf{a})} \leq \frac{1}{9}c_i, \quad i = \overline{g+1, r}, \quad \mathbf{a} \in M_a. \quad (5)$$

Элементами вектора  $\mathbf{a}$  являются коэффициенты инерции и параметры упругих связей электроприводов, параметры регуляторов, частоты среза и коэффициенты соотношения сопрягающих частот амплитудно-частотных характеристик систем, соответствующие передаточным функциям заданного вида для сепаратных систем управления. Изменением  $\mathbf{a}$  относительно начального вектора  $\mathbf{a} = \mathbf{a}_0$  находится значение  $\mathbf{a}^*$ , удовлетворяющее критерию (5) и устанавливающее: на первом этапе синтеза – базовый вариант системы управления среди принятых альтернатив структур и элементов, полосы пропускания сепаратных систем, коэффициенты инерции ведущих элементов механизма; на втором этапе синтеза – уточненные варианты электромагнитных и механических подсистем; на третьем этапе – параметры регуляторов сепаратных систем и оценки достижимых показателей критерия качества с учетом уточненных моделей электромагнитной и механической подсистем. Решение задачи синтеза выполняется на ПК методами нелинейного программирования. Динамическая декомпозиция системы обеспечивается на каждом уровне и во всей системе в целом.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков В. А., Ярыгин М. А., Ануфриев А. С. Системный анализ многодвигательных автоматизированных электроприводов рабочих машин и технологических комплексов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. Вып. 6. С. 63–70.
2. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации / М. П. Белов, О. И. Зементов, А. Е. Козярук и др.; под ред. В. А. Новикова, Л. М. Чернигова. М.: Изд. центр «Академия», 2006. 368 с.
3. Ганиев Р. Н. Оптимизация экструзионного процесса шинопроизводства применением частотно-регулируемого электропривода: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Чебоксары, 2012. 34 с.
4. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем / А. А. Колесников, Л. Н. Рассудов, В. А. Новиков и др.; под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч. 3. 656 с.

V. A. Novikov, A. S. Anufriev, R. M. Nuriakhmetov

### *CRITERIA AND MODELS OF ELECTRIC DRIVE SYSTEMS IN PROBLEM OF MAKING OPTIMAL DECISIONS*

*The analysis of generalized and particular criteria, used on stages of designing and exploiting of multi-motor electric drive systems, is given. Generalized criterion contains particular criteria, representing productivity, quality of technology and power consumption of systems. Models of systems besides traditional electromagnetic and mechanical variables contain technological and energetical variables.*

**Multi-motor electric drive systems, generalized and particular criteria of solutions optimization, productivity, quality of technology, power consumption of systems**