

статические и динамические свойства силового управляемого преобразователя, входящего в состав электропривода.

Указанные особенности подробно изложены в [14] при описании методики проведения имитационных экспериментов в ППП *MatLab-Simulink* с автоматизированным определением статических и динамических характеристик тиристорного электропривода постоянного тока на примере двигателей независимо возбуждения средней мощности.

Выводы

Таким образом, на протяжении всего развития автоматизированного электропривода ведутся интенсивные поиски эффективных методов теоретического исследования статических и динамических свойств

полупроводникового (тиристорного) электропривода постоянного тока. Теория переходных процессов и динамики управляемых вентильных систем до сих пор является наименее исследованной областью автоматизированного электропривода. Причем многообразие систем регулируемого электропривода порождает многообразие методов их расчета и проектирования, существенная часть которых в значительной степени между собой взаимосвязана. В последние годы с возникновением компьютерных технологий, опирающихся на мощные прикладные пакеты программ, основное внимание исследователей уделяется методам имитационного моделирования, позволяющим решать указанные задачи с высоким быстродействием и автоматизацией процессов исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нейман Л.Р. Обобщенный метод анализа переходных и установившихся процессов в цепях с преобразователями с учетом активных сопротивлений // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1972. № 2. С. 3-15.
2. Руденко В.С., Жуйков В.Я., Коротеев И.Е. Расчет устройств преобразовательной техники. Киев: Техніка, 1980. 135 с.
3. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970. 320 с.
4. Шипилов В.П. Автоматизированный вентильный электропривод. М.: Энергия, 1969. 400 с.
5. Динамика вентильного электропривода постоянного тока / Н.В. Донской, А.Г. Иванов, В.М. Никитин и др.; Под ред. А.Д. Поздеева. М.: Энергия, 1975. 224 с.
6. Управляемый выпрямитель в системах автоматического управления / Н.В. Донской, А.Г. Иванов, В.М. Никитин, А.Д. Поздеев; Под ред. А.Д. Поздеева. М.: Энергоатомиздат, 1984. 352 с.
7. Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие для вузов. М.: Энергия, 1979. 616 с.
8. Сен П. Тиристорные электроприводы постоянного тока: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
9. W. Shepherd, L.N. Huley. Power Electronics and Motor Control, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
10. Католиков В.Е., Динкель А.Д., Седунин А.М. Тиристорный электропривод с реверсом возбуждения двигателя рудничного подъема. М.: Недра, 1990. 382 с.
11. Перельмутер В.М., Сидоренко В.А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
12. Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами / Под ред. О.В. Слежановского. М.: Энергоатомиздат, 1986. 240 с.
13. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystes и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
14. Каверин В.В., Эм Г.А. Имитационное моделирование полупроводникового электропривода постоянного тока // Тр. унта / КарГТУ. 2010. № 3. С. 96-99.

УДК 622.0025:621.314.632

Оптимизация выбора оборудования АСУ ТП по комплексу технико-экономических критериев (часть I)

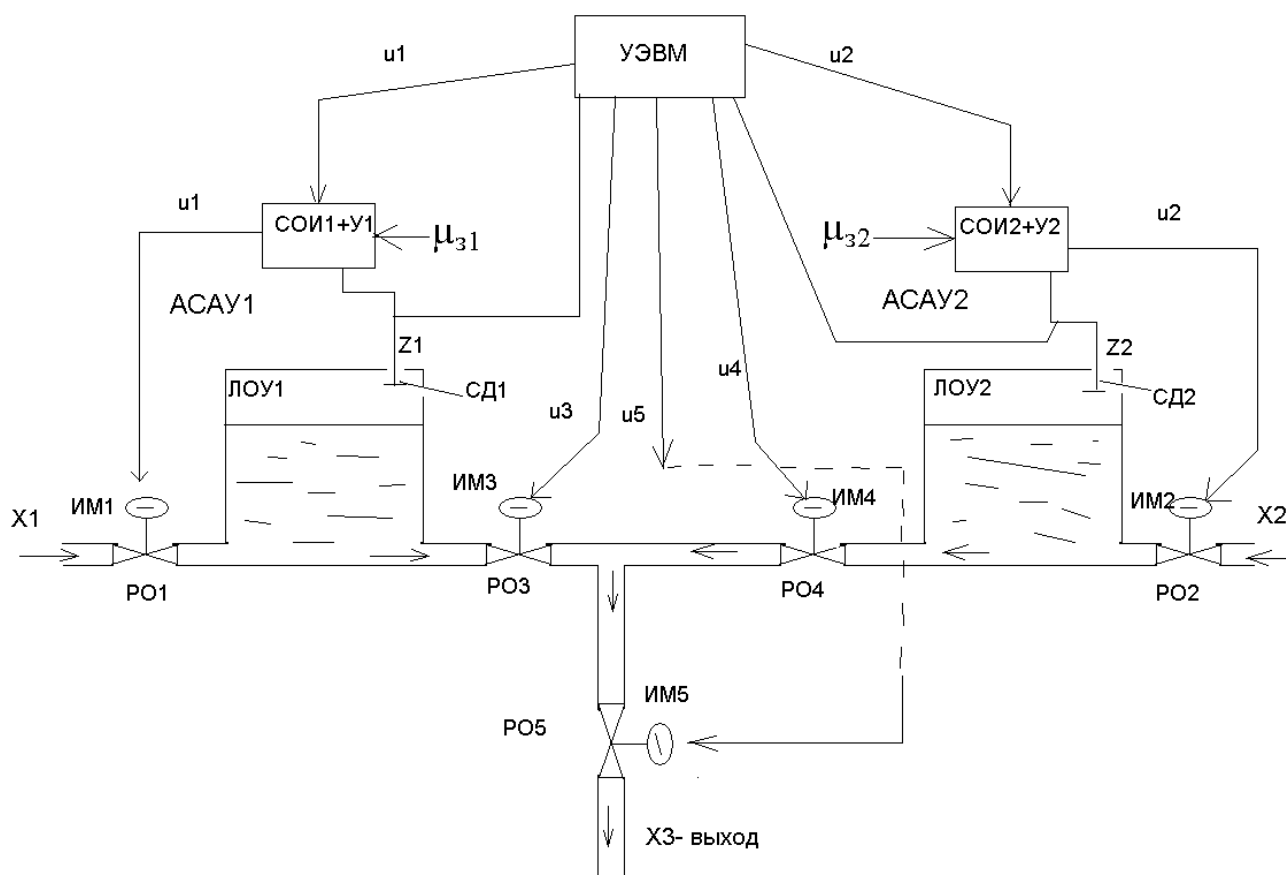
Б.Н. ФЕШИН, д.т.н., профессор кафедры АПП,
К.М. СУЛЕЙМЕНОВ, магистрант кафедры АПП,
Н.С. СУЛЕЙМЕНОВ, магистрант кафедры АПП,
Карагандинский государственный технический университет

Ключевые слова: автоматизация, система, управление, технология, процессы, контроль, регулирование, управление, оборудование, выбор, критерии, ограничения, алгоритмы, оптимальные, параметры, динамика.

На рынке технических средств и систем автоматизации нет ограничений на выбор оборудования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Проблема заключается в обосновании приоритетов многокритериальной оптимизации и выполнении ограничений на отдельные

устройства и систему в целом. Определим область анализа для функциональной схемы АСУ ТП, изображенной на рисунке, системами автоматического контроля, регулирования и управления.

АСУ содержит две подсистемы АСУ₁ и АСУ₂ с локальными САУ₁ и САУ₂ (ЛСАУ₁ и ЛСАУ₂) и верх-



Функциональная схема АСУ ТП

ним уровнем управления от управляющей ЭВМ (УЭВМ).

Система относится к классу иерархических децентрализованных АСУ и имеет технические средства, представленные: средствами измерения физических величин (СД₁ и СД₂); системами отображения, обработки информации и выработки управляющих воздействий (СОИ₁+У₁, СОИ₂+У₂); комплексами исполнительных механизмов (ИМ₁, ..., ИМ₅), изменяющих (с помощью регулирующих органов РО₁, ..., РО₅) потоки вещества в объектах ЛОУ₁, ЛОУ₂ и в суммарном потоке X₃(t).

Особое место занимают средства связи (интерфейс) между основными функциональными компонентами. Их свойства и характеристики определяются особенностями подобъектов и основных технических средств САУ.

Очевидно, что основой для правильного выбора технических средств АСУ ТП являются свойства объектов управления и требования к их автоматизации, формулируемые в результате тщательного анализа режимов работы машин, механизмов, устройств и агрегатов, входящих в технологический процесс, а также опыт автоматизации подобных объектов-аналогов. Предположим, что эти этапы успешно выполнены и стоит задача выбора технических средств (оборудования) систем автоматического контроля (САК), регулирования (САР) и управления (САУ), тогда в их составе будут присутствовать следующие основные технические элементы:

– средства сбора информации (в САК, САР, САУ);

– средства обработки, отображения информации и выработки управляющих воздействий (в САК, САР, САУ);

– средства воздействия на технологический процесс (в САР и САУ).

Очевидно, что в САУ и САР присутствуют элементы САК, поэтому выбор оборудования АСУ ТП не является отдельной задачей САК, САР или САУ, но есть смысл начать с САК, с обязательным учетом объединяющих факторов, в первую очередь свойств объекта контроля и управления (ОКУ).

Алгоритм выбора технических средств САК, САР и САУ

Классифицируем возможные варианты САК, типизируем их по следующим признакам:

- 1) по месту установки «измерил-отобразил» (САК₁);
- 2) «измерил-передал-отобразил» (САК₂);
- 3) «измерил-преобразовал-передал-преобразовал-отобразил» (САК₃);
- 4) «измерил-преобразовал-передал-преобразовал-положил в базу данных – по требованию отобразил» (САК₄);
- 5) «измерил-преобразовал-передал-преобразовал-положил в базу данных – сравнил с эталоном-принял решение-положил в базу данных и/или – по требованию отобразил» (САК₅);
- 6) «измерил-преобразовал – сравнил с эталоном-принял решение-положил в базу данных и/или - передал- преобразовал – отобразил» (САК₆);
- 7) интегрированный объект, включающий любой

из вариантов, упомянутых выше, а также математическую модель, позволяющую восстанавливать и прогнозировать ненаблюдаемые сигналы (САК_7).

В предлагаемой классификации САК_1 и САК_2 относятся к исторически первым средствам автоматизации. Последующие типы позволяют «уложить» в них самые изощренные конструкции САК, вплоть до использования спутниковых средств связи для приёма и передачи контрольной информации. Составим список критериев и ограничений для выбора оборудования, ранжированных по приоритетам множества свойств и характеристик САК физического сигнала:

- 1) характеристики, свойства и ограничения ОКУ;
- 2) наименование и диапазоны изменения;
- 3) функциональное назначение средства измерения;
- 4) характеристика места установки;
- 5) характеристика среды в местах передачи сигнала;
- 6) требования к процессу хранения и отображения сигнала;
- 7) требования к функциональности оборудования САК;
- 8) ограничения по надёжности и ремонтпригодности оборудования САК;
- 9) ограничения по метрологическим характеристикам оборудования САК;
- 10) ограничения по стоимости оборудования САК.

Объект во многом определяет конструкцию и качество проектируемых САК, САР, САУ. Рассмотрим проблемы, связанные с объектом в интегрированной САК_7.

В [1, 2] показано, что в иерархических системах управления технологическими процессами на верхнем уровне управления успешно могут быть использованы, в качестве эталона, линеаризованные модели машин и механизмов, агрегатов и установок (как ОКУ), параметры которых должны идентифицироваться и адаптироваться с периодичностью, не влияющей на эффективность формирования управляющих воздействий. При этом рекомендуется среди процессов, характеризующих работу ОКУ, выделять «медленные» и «быстрые», инвариантные в той или иной степени друг другу.

Независимым аргументом в дискретных моделях ОКУ будет являться интервал дискретности td и время наблюдения дискретных процессов $Tr = k \cdot td$, в течение которых в иерархических САК, САР, САУ ОК должны будут решены следующие задачи:

- прием информации от датчиков, установленных на ОКУ, отдельно для «медленных» и «быстрых» процессов;
- идентификация и адаптация параметров математических моделей с необходимой точностью;
- вычисление оценок ненаблюдаемых координат математических моделей;
- проведение вычислительных операций по расчету оптимальных управлений отдельных ОКУ;
- принятие решений по управлению отдельными ОКУ и ТП в целом;
- формирование оптимальных управлений для ОКУ.

Интервал дискретности td в общем случае индивидуально подбирается для каждого ОКУ и может определяться в виде диапазона $td = \{td_{\min}, td_{\max}\}$, где верхнее значение td_{\max} выбирается при допустимости увеличения ошибки воспроизведения сигнала, а td_{\min} – с целью повысить точность воспроизведения сигнала.

Алгоритмы получения дискретных моделей из непрерывных, в координатах пространства состояний в виде

$$\left. \begin{aligned} \dot{X} &= A \cdot X(t) + B \cdot U(t) + F \cdot f(t), \\ Z(t) &= C \cdot X(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

могут быть разработаны на основе работ Л. Заде, Ч. Дезоера, Дж. Медич, Х. Квакернаак, Р. Сиван и др. [1]. При этом форма представления дискретных моделей с учетом задач, решаемых на последующих этапах синтеза ОКУ САК, САР, САУ, будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} X((k+1) \cdot td) &= AD \cdot X(k \cdot td) + \\ &+ BD \cdot U(k \cdot td) + FD \cdot f(k \cdot td), \\ Z(k \cdot td) &= CD \cdot X(k \cdot td), \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где td – период (интервал) дискретности оценки элементов векторов X, U, f, Z на верхнем уровне управления ОКУ;

$(k+1) \cdot td = t_{k+1}, k \cdot td = t_k$ – моменты времени оценки и измерения.

Другой распространенной формой дискретной математической модели является система уравнений вида

$$\left. \begin{aligned} X[k+1] &= AD \cdot X[k] + BD \cdot U[k] + FD \cdot f[k], \\ Z[k] &= CD \cdot X[k], \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где k – номер точки на временном отрезке $t = \{t_0, T_{\max}\}$ анализа динамики процессов, происходящих в ОКУ, при описании объекта или системы моделими типа (2), (3), а $t_0 \leq t \leq T_{\max}, t = k \cdot td$.

В (2), (3): $X(t)$ – соответственно вектор координат пространства состояний; $Z(t)$ – измеряемых (наблюдаемых) сигналов; $U(t)$ – управляющих и $f(t)$ – возмущающих воздействий.

В иерархических ОКУ САК, САР, САУ возможны следующие варианты формирования дискретных моделей и размещения их в памяти УВК.

Для всех режимов работы ОКУ множества стационарных состояний формируется множество матриц AD, BD, FD, CD моделей (2), (3) по предлагаемому ниже алгоритму, а затем эти матрицы размещаются в памяти УВК.

Матрицы моделей (2), (3) рассчитываются УВК в момент поступления запросов от головной (супервизорной) программы ОКУ САК, САР, САУ.

Супервизорная ОКУ САК (САР, САУ) начинает работать с моделями «проектными» (т.е. по 1-му варианту), а затем параметры модели адаптируются по данным реальных измерений. Выбор того или иного варианта возможен при наличии информации о затратах машинного времени для вычисления элементов моделей матриц, времени извлечения информации из памяти ЭВМ, объеме памяти, необходимой для хране-

ния элементов матриц, существующего резерва памяти ЭВМ и частоте пересчета параметров дискретных моделей, зависящей от численного значения td . Факторами, определяющими это значение td , являются:

- свойства и характеристики ОКУ по реально измеряемым сигналам;
- свойства и характеристики датчиков;
- свойства и характеристики возмущений (для САР и/или САУ, например утечки жидкости в ОКУ, тормозные моменты на валах двигателей исполнительных механизмов, изображенных на рисунке);
- расстояния от ОКУ до УВК;
- тип, свойства и характеристики канала связи между ОКУ и УВК;
- свойства и характеристики помех, накладываемых на реально измеряемые сигналы.

Обозначим вектор измеряемых сигналов ОКУ $Z(t)$ или $Z(k \cdot td)$, а его компоненты, относящиеся к ОКУ, соответственно: $Z_{ок1}$, $Z_{ок2}$ (для ЛОУ1 и ЛОУ2).

Есть смысл рассматривать ситуацию наличия «полного» вектора измеряемых сигналов $Z(t)$ ($Z(k \cdot td)$) или его сокращенные, по какой-либо причине, варианты. Допустимая по точности воспроизведения координат дискретность td измерения элементов векторов $Z_{ок1}$, $Z_{ок2}$ определяется на основании теоремы Котельникова [3], в соответствии с которой для непрерывных сигналов время обработки сигнала – Δt_c и граничная частота спектра сигнала f_c , связаны соотношением $f_c = 1/2 \cdot \Delta t_c$. Непрерывный сигнал со спектром, ограниченным частотой f_c , может быть заменен дискретным сигналом, квантованным по времени с интервалом $td \leq 1/2 \cdot f_c$. В то же время, если частота повторения импульсов f_0 , модулирующих непрерывный сигнал, удовлетворяет условию $f_0 \geq f_c$ и спектр сигнала f существует в интервале частот

$$0 \leq f \leq (f_0 - f_c), \quad (4)$$

то исследование дискретной системы сводится к исследованию ее приведенной непрерывной части, и, следовательно, подобная дискретная система может анализироваться, разрабатываться, проектироваться и настраиваться с помощью методов проектирования непрерывных САУ [1].

Опыт эксплуатации и исследований ОКУ показывает, что в основном возмущение многих объектов A имеет нормальный закон распределения [4]:

$$\varphi(A) = \frac{1}{\delta_A \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \text{EXP} \left(\frac{A_i - A}{2 \cdot \delta_A^2} \right)^2, \quad (5)$$

где A , A_i , δ_A – среднее значение основного возмущения, то же на некотором участке статической характеристик ОКУ и среднее квадратичное отклонение основного возмущения. Предположим, что возмущением является момент нагрузки на одном из приводов исполнительных механизмов, а корреляционные функции измеряемых сигналов при действии этого возмущения аппроксимируются экспоненциально-косинусными выражениями типа [5]

$$R(\tau) = f \left(\sum [D_i \cdot \text{EXP}(-\alpha_i \cdot |\tau|), b_i \cdot \cos(\lambda_i \cdot \tau)] \right). \quad (6)$$

Соответствующие спектральные плотности, определяемые известной формулой

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} d\tau = 2 \int_0^{\infty} R(\tau) \cdot \cos(\omega\tau) d\tau,$$

представляют дробно-рациональные выражения типа

$$S(\omega) = f \left(\left[\frac{D_i}{2\pi} \left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega + \lambda)^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \lambda)^2} \right); \frac{D_i}{2\pi} \cdot b_i \frac{\alpha}{\omega^2 + \lambda^2} \right] \right), \quad (7)$$

где τ – интервал времени оценки R , а D_i , λ , ω , λ , b_i – параметры корреляционных и спектральных функций.

Из закономерностей (5), (6), (7) можно предположить, что в первом приближении законы изменения процессов, происходящих в ОКУ, тоже являются процессами с нормальными законами распределения, вторичными по отношению к основному возмущению подьобъектов. Тогда для решения задач настоящей работы применимы методы корреляционной и спектральной теории.

На этапах анализа и проектирования ОКУ САК, САР, САУ численные значения постоянных времени подьобъектов, а также длительности переходных процессов t_n по различным каналам, позволяют в первом приближении провести разделение процессов, происходящих в ОКУ, на «медленные» и «быстрые». Параметры амплитудно-частотных, корреляционных и спектральных функций, такие как f_n , f_c – частота полосы пропускания и частота среза, а также положения теоремы Котельникова допускают возможность предварительной оценки, для, в общем случае случайного, непрерывного измеряемого сигнала $Z(t)$, интервала дискретности td , допустимой точности воспроизведения сигналов σ_{Σ} , минимальной длины реализации T_r и соответственно n дискретных выборочных значений из нее [1].

В ОКУ САК, САР, САУ оценки td , T_r , и n могут корректироваться по предлагаемому ниже алгоритму, основанному на вычислении корреляционных и спектральных функций по данным пассивных измерений.

Теоретические предпосылки алгоритма поиска оптимального значения $td = td_{opt}$ по критерию минимальной суммарной ошибки σ_{Σ} приводятся в работах В.А. Котельникова, И.Т. Турбовича, П.М. Чеголина [6]. В настоящей работе итерационная модификация этого алгоритма разработана с помощью понятия «интервал корреляции» [5].

Алгоритм определения td_{opt} в ОКУ САК, САР, САУ

1. Предварительное значение td для сигнала $Z_i(t)$ определяется в соответствии с теоремой Котельникова по априорным данным ОКУ [3, 5, 6].

2. Для выбранного канала связи между ОКУ и УВК определяется по априорным данным отношение помехи к напряжению сигнала U_n/U_c в полосе частот Δf , а также интенсивность нормальных флюктуационных помех δn [7].

3. Выбирается предварительное значение T_r

$$T_r > \{ \max(3 \div 5) T_c, T_c = 1/f_c \}.$$

4. С учетом стационарности измеряемых сигналов ОКУ [8], на основании эргодической теоремы, вычис-

ляются ординаты корреляционной функции измеряемого сигнала $R_{z_i(\tau)}$ на интервале наблюдения

$$T = \{0, T_r\}.$$

Для вычисления ординат корреляционной функции $R_{z_i(\tau)}$ применим алгоритм, использующий «скользящий метод вычисления оценки корреляционной функции» [9]. При этом обеспечивается уменьшение требуемой оперативной памяти ЭВМ приблизительно в 10^3 раз.

5. Вычисляется оценка интервала корреляции $\tau_{кор}$ [9] по формуле

$$\tau_{кор} = \int_0^{\infty} |R_{z_i}(\tau)| d\tau \approx \int_0^{T_r} |R_{z_i}(\tau)| d\tau \approx \sum_{j=1}^{Nm} |R_{z_i}(\tau_j)|, \quad (8)$$

где j, N_m – номер ординаты R_{z_i} и размерность массива ординат корреляционной функции R_{z_i} .

6. Осуществляют проверку

$$|R_{z_i}(\tau_{N_m})| \leq \xi, \quad (9)$$

где ξ – некоторая малая положительная величина, определяющая степень допустимой погрешности замены точного значения корреляционной функции $R_{z_i(\tau)}$ ее приближенным значениям $R_{z_i(\tau_j)}$ в (8). Обычно принимают $\xi = 0,05$ [9].

Если условие (9) не выполняется, то, увеличив значение T_r по крайней мере в 2 раза, возвращаются к пункту 4.

7. Вычисленное значение $\tau_{кор}$ позволяет определить диапазон частот для анализа спектральной функции сигнала $\omega = \{0, \omega_{max}\}$, где

$$\omega_{max} \approx \frac{\pi}{2 \tau_{кор}}. \quad (10)$$

8. В [9] показано, что представление непрерывной функции $Z_i(t)$ в виде дискретной последовательности ординат, описываемых рядом Котельникова $Z_i(k \cdot td)$, характеризуется относительной среднеквадратичной ошибкой воспроизведения $Z_i(t)$, удовлетворяющей неравенству

$$\delta_{ep}^2 = \frac{[Z_i(t) - Z_i(k \cdot td)]^2}{Z_i(t)} \leq (3+Q) \frac{Ec}{E}, \quad (11)$$

где

$$Q = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\int_{\omega_c}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega}{\int_{\omega_c}^{\omega_c + (2m+1)\omega_c} |S(\omega)|^2 d\omega}, \quad (12)$$

$S(\omega)$ – спектральная функция сигнала $Z_i(t)$;

E – общая энергия спектра;

Ec – энергия, приходящаяся на часть спектра за пределами ω_c ;

Q – функция убывания модуля спектральной функции $S(\omega)$.

Там же [9] показано, что при быстром убывании значения спектральных функций $S(\omega)$ и при небольших m справедливо условие $Q \ll 3$ и тогда

$$\delta_{ep}^2 \leq 3 \frac{Ec}{E}. \quad (13)$$

Отношение Ec/E можно вычислить по формуле

$$\frac{Ec}{E} = \frac{\int_{\omega_c}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^{\omega_{max}} |S(\omega)|^2 d\omega} = \frac{\int_{\omega_c}^{\omega_{max}} |S(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^{\omega_{max}} |S(\omega)|^2 d\omega}, \quad (14)$$

тогда

$$\delta_{ep}^2 \approx 3 \frac{\int_{\omega_c}^{\omega_{max}} |S(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^{\omega_{max}} |S(\omega)|^2 d\omega}. \quad (15)$$

С учетом того, что в памяти УВК по рассматриваемому алгоритму должны храниться ординаты корреляционной функции $R_{z_i}(\tau)$, последнее соотношение преобразуем следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta_{ep}^2 &= 3 \int_{\omega_c}^{\omega_{max}} \left[2 \int_0^{\infty} R_{z_i}(\tau) \cos(\omega \cdot \tau) d\tau \right]^2 d\omega / \\ &/ \int_0^{\omega_{max}} \left[2 \int_0^{\infty} R_{z_i}(\tau) \cos(\omega \cdot \tau) d\tau \right]^2 d\omega \approx 3 \sum_{\omega_k = \omega_c + k \Delta\omega, k=0}^{\omega_{max} - N\omega} \Delta\omega \times \\ &\times \left[2 \sum_{\tau_j = td_j, j=0}^{T_r - N_r} R_{z_i}(\tau_j) (\cos(\omega_k \cdot \tau_j)) td \right]^2 / \\ &/ \sum_{\omega_k = k \cdot \Delta\omega, k=0}^{\omega_{max} - N\omega} \Delta\omega \left[2 \sum_{\tau_j = td_j, j=0}^{T_r - N_r} R_{z_i}(\tau_j) (\cos(\omega_k \cdot \tau_j)) td \right]^2. \end{aligned} \quad (16)$$

В (16): $N\omega, N_m$ – количество дискретных значений на интервалах соответственно $\omega = \{0, \omega_{max}\}$ и $T = \{0, T_r\}$.

В первом приближении принимаются значения $N\omega = 100, N_m = T_r / td$, тогда $\omega = \omega_{max} / N\omega$. Вычисление δ_{ep}^2 по формуле (11) в этой процедуре алгоритма не проводится.

9. В [9] показано, что нормальные помехи δ_n зависят от интервала дискретности td по формуле

$$\delta_n = \frac{2 \delta^2}{U_m^2 td} = \left(\frac{U_{\pi}}{U_c} \right) = k_{nc}, \quad (17)$$

где $\frac{1}{2} U_m^2 td$ – максимальная удельная энергия сигнала $Z_i(t)$.

Возможен вариант, что заданным значением будет не $k_{nc} = U_n / U_c$, а максимальная амплитуда сигнала $|Z_i(t)| = U_m$.

В любом случае формулы (16) и (17) позволяют получить зависимость суммарной среднеквадратичной ошибки δ_{Σ} от интервала дискретности

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_{ep}^2}. \quad (18)$$

Оптимальное значение $t_{онм}$ определяется условием

$$\frac{\partial \delta_{\Sigma}}{\partial td} = 0. \quad (19)$$

Аналитический вид условия (19) может быть получен путем аппроксимации $S(\omega)$ выражением типа (7), но необходимости решения этой задачи в ОКУ САК, САР, САУ при наличии массива ординат $R_{z_i}(\tau_j)$ нет, так как для дальнейших расчетов требуются только численные значения td_{opt} в функции от заданных значений δ , Um (или k_{nc}), ω_c , ω_{max} . Поэтому для выполнения условия (19) предлагается воспользоваться численными процедурами определения оптимума функции (19) при конкретных значениях ω_{max}

ω_c , $\Delta\omega$ и T_r .

10. Поиск оптимума функции (19) возможен методами параметрической оптимизации: градиентным, симплексным, а в случае необходимости определения зависимостей

$$\delta_{ep} = f(td, \omega_c, \omega_{max}, T_r), \quad (20)$$

или

$$td = f(\delta_{ep}, \omega_c, \omega_{max}, T_r), \quad (21)$$

эффективен комплексный алгоритм планирования факторных экспериментов и крутого восхождения в направлении антиградиента функции (21).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат.лит., 1987. 712 с.
2. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем. М.: Наука, 1972. 424 с.
3. Фельдбаум А. А. и др. Теоретические основы связи и управление. М.: Физматгиз, 1963. 932 с.
4. Позин Е. З. Сопrotивляемость угля разрушению режущими инструментами. М.: Наука, 1972. 239 с.
5. Докукин А. В., Красников Ю. Д., Хургин З. Л. Статистическая динамика горных машин. М.: Машиностроение, 1978. 238 с.
6. Турбович И. Т. Некоторые обобщения теоремы Котельникова // Радиотехника. 1956. 11. № 4.
7. Ильин В. А. Телеуправление и телеизмерение. М.: Энергия, 1974. 408 с.
8. Солодовников В. В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. М.: Физматгиз. 656 с.
9. Романенко А. Ф., Сергеев Г. А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. М.: Советское радио, 1968. 256 с.