

где κ — масштабный коэффициент, определим коэффициенты a_{ji} системы ортогональных функций таким образом, чтобы весовая функция $w(t) = 1$. Рассчитаем коэффициенты как элементы полинома Лежандра

$$a_{ji} = \sqrt{2\kappa(2i+1)} \sum_{j=0}^i (-1)^j (i+j)! / (i-j)! (j!)^2,$$

тогда система e — функции Лежандра $\{\varphi_i(t)\}$ будет обладать свойством ортонормальности, т.е.

$$\int_a^b \varphi_n(t) \varphi_m(t) dt = \delta_{mn},$$

где δ_{mn} — символ Кронекера; $\delta_{mn} = 0$ при $m \neq n$; $\delta_{mn} = 1$ при $m = n$.

Если известна передаточная функция (1) системы для рассматриваемого возмущения, целесообразно коэффициенты Фурье определить через моменты μ_i искомого оригинала относительно ортогонального базиса $\{\varphi_i(t)\}$. В соответствии с рекомендациями [2] известную точность вычисления моментов дает выражение (для e — функций Лежандра)

$$\mu_i = \int_0^{\infty} h(t) e^{-st} dt = W(s) \Big|_{s=\kappa(2i+1)}^{i=0 \dots n}, \quad (4)$$

где κ — масштабный коэффициент, после чего получаем коэффициенты Фурье

$$c_n = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i [(-1)^j (i+j)! / (i-j)! (j!)^2] \mu_j. \quad (5)$$

Связь моментов с коэффициентами Фурье может быть выражена зависимостью

$$c_n = \sum_{j=0}^n a_{jn} \mu_j / \sqrt{2\kappa(2n+1)},$$

а совокупность коэффициентов разложения $\{c_i\}$ импульсной переходной функции называется ортогональной спектральной характеристикой (ОСХ) сигнала. Для вычисления ОСХ в ряде случаев успешно применяются полиномы и многочлены Лагерра, где $\mu_i = d^i W(s) / ds^i$, $c_n = \kappa \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i [(-\kappa)^j i! / (i-j)! (j!)^2] \mu_j$, а также экспоненциальные многочлены вида:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_0(t) = a_{00} e^{-\kappa t}, \\ \varphi_1(t) = a_{01} e^{-\kappa t} + a_{11} e^{-2\kappa t}, \\ \dots \\ \varphi_n(t) = a_{0n} e^{-\kappa t} + a_{1n} e^{-2\kappa t} + \dots + a_{nn} e^{-n\kappa t}. \end{array} \right.$$

где коэффициенты a_{ji} определяются как

$$a_{ji} = \sqrt{2ki} \sum_{j=1}^i (-1)^{i+j} (i+j-1)! / (i-j)! (j-1)!.$$

Полученная ОСХ может быть использована для [2] оценки устойчивости рассматриваемого сигнала или определения точности ведения режима управляющей системой при заранее заданном виде переходного процесса. При этом обычный квадратичный критерий ошибки приводит к неравенству Бесселя, которое в конечном счете дает определитель вида

$$\sum_{i=1}^{\infty} c_i^2 < \infty, \quad (6)$$

являющийся для конечного числа членов в то же время критерием устойчивости. Оценка временной погрешности выполнения заданного графика может быть произведена с помощью интегрального критерия [3] подобно неравенству Бесселя

$$\int_0^T h(t)f(t)dt \geq \sum_{i=0}^n c_i \xi_i, \quad (7)$$

где $h(t)$ искомая функция (или заданная) ; $f(t) = \frac{1}{t^{h'(t)}}$ — производная вспомогательная функция; $\{ \xi_i \}$ — ОСХ функции $f(t)$

Выбор масштабного коэффициента в наибольшей степени зависит от комплексно-сопряженных корней, ближайших к мнимой оси [1] . Поскольку для колебательного звена справедливо равенство $k_0 = 2/T = 2\omega_0$, где ω_0 — частота собственных колебаний звена при расчете сложной системы допустимо коэффициент k определять по наименее инерционному контуру, принимая доминирующую постоянную времени его в качестве масштабной.

Использование изложенного алгоритма при расчете переходных характеристик и показателей качества работы систем предполагает следующие этапы:

- составление матрицы объекта и системы в целом для получения эквивалентной передаточной функции, описывающей систему (сигнал) в анализируемом режиме (и выбор масштабного коэффициента) ;

- выбор ортогонального базиса $\{ \varphi_i(t) \}$ и полиномов разложения для определения способа расчета моментов;

- расчет матриц коэффициентов разложений и определение ОСХ сигналов (системы) ;

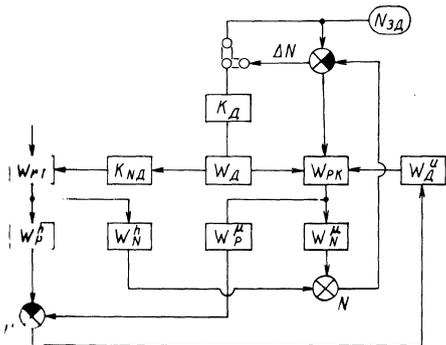


Рис. 1. Расчетная схема АСР мощности энергоблока:

$N_{зд}$ — заданная мощность; $W_P^h, W_N^h, W_P^μ, W_N^μ$ — передаточные функции каналов наблюдения объекта; $W_{PT}, W_{PK}, W_D, W_D^μ$ — передаточные функции регуляторов турбины и котла, дифференциаторов связи и инвариантности; K_D и K_{ND} — варьируемые коэффициенты передачи.

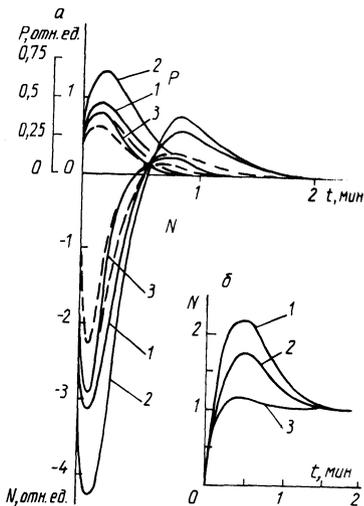


Рис. 2. Импульсные (а) и разгонные (б) кривые по мощности N и давлению пара p для схем с использованием в контуре связи:

1 — производной заданной мощности; 2 — производной рассогласования мощностей ΔN ; 3 — случай второй с коррекцией коэффициента передачи K_{ND}

Таблица 1.

Значения ОСХ рассчитываемых кривых

Номер серии	Параметр	Индексы						
		1	2	3	4	5	6	7
1	$N \quad c_i$	-1,98	3,20	3,48	1,92	1,15	0,76	0,5
	$p \quad c_i$	0,95	0,36	0,20	0,14	0,10	0,08	0,07
2	$N \quad c_i$	-3,31	3,77	5,06	3,05	1,79	1,07	0,62
	$p \quad c_i$	1,14	0,33	-0,19	-0,25	-0,20	-0,15	-0,12
3	$N \quad c_i$	-3,53	1,05	2,40	1,73	1,20	0,87	0,63
	c_i	-3,17	0,10	1,20	0,96	0,72	0,56	0,45
	$N \quad c_i$	0,81	0,31	0,0	-0,07	-0,08	-0,07	-0,06
	$p \quad c_i$	0,61	0,24	0,04	-0,01	-0,03	-0,03	-0,03

— оценка устойчивости режима или точности выполнения задания по имеющимся критериям;

— расчет и построение переходных характеристик анализируемой системы, оценка показателей качества ее работы.

Использование в ходе расчета ортонормированных функций с весом $\omega(t) = 1$ существенно уменьшает объем вычислений и повышает точность полученных характеристик.

Схема расчета предоставляет широкие возможности для оптимизации структуры исходной системы или ее настройки. Используя ОСХ рассмотренных сигналов, критерием оптимизации при заданных условиях управления объектом можно избрать неравенство Бесселя (6) или выражение (7), что в конечном счете определяется требованиями к точности реализации режима. Если более жестко регламентируется качество подавления различного рода z возмущений, целесообразно применить интегральный критерий

$$\int_0^T \sum_1^{z,l} [h_{z1}(t)]^2 dt = > \min, \quad (8)$$

где $h_{z1}(t)$ — импульсная переходная функция для l выходных параметров многомерной системы.

Следуя изложенной методике, выполним расчет переходных характеристик системы, являющейся аналогом промышленной АСР мощности энергоблока [4] тепловой электростанции, приведенной на рис. 1. Отличительной особенностью исследуемой системы считаем общий для регуляторов котла и турбины контур дифференцирования сигнала рассогласования мощностей ΔN (заданной и фактической), в который введено устройство амплитудного снижения сигнала коррекции в зависимости от точности поддержания давления пара p_T . Структурные особенности системы затрудняют применение к ней известных способов упрощения и преобразования схемы, что и обусловило использование изложенного метода.

В соответствии с формулой Мейсона для характерных возмущений получаем передаточные функции интересующих каналов регулирования, после чего по формулам (4) и (5) определяем значения моментов и ОСХ соответствующих им сигналов (табл. 1). При этом масштабный коэффициент получаем в результате оценки высокочастотной постоянной времени котельного контура $T_E = 28-10$ с, т.е. $k \approx 0,2-0,07$. В таблице приведены расчетные данные для мощности N и давления p схем с дифференцированием заданной мощности (первая серия) и рассогласования мощностей (вторая серия), возмущенных заданием.

Рассчитав систему (3) ортогональных функций, по формуле (2) находим импульсные переходные кривые АСР мощности для исследуемых контуров. При оптимизации настройки регуляторов в циклах расчета использовался функционал (8), после чего получены данные третьей серии (табл. 1), выполненной с вариацией коэффициента усиления дифференциатора связности. Импульсные пере-

ходные кривые (рис. 2, а), а также кривые разгона (рис. 2, б), полученные в результате расчета АСР мощности, приведены на рис. 2.

Сопоставление переходных характеристик трех избранных серий расчетов приводит к следующему выводу. Производная заданной мощности повышает скорость изменения нагрузки в форсированных режимах, а дифференцирование сигнала рассогласования мощностей, кроме того, нормирует переходные процессы по качеству отработки задания. Использование импульсных кривых третьей серии позволяет экстраполировать переходный процесс при нелинейном изменении коэффициента усиления дифференциатора связи, что дает основания для дальнейшего усовершенствования схемы.

Таким образом, ортогональный метод моментов позволяет с высокой точностью произвести расчет и оптимизацию многосвязных систем. Затраты машинного времени зависят от сложности системы и для исследуемой АСР не превышают 25—30 мин (на ЕС-1022) при вариации четырех переменных. В результате расчета обосновано применение принципа амплитудного снижения сигнала производной в общем контуре коррекции регуляторов АСР мощности, определены близкие к оптимальным параметры настройки системы, выявлены необходимые условия качественной ее работы при изменяющейся динамике объекта. Основные выводы исследования модели подтверждаются результатами промышленными испытаниями АСР мощности на энергоблоках Лукомльской ГРЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солодовников В.В., Дмитриев А.Н., Егупов Н.Д. Ортогональный метод анализа и синтеза САУ на основе понятия моментов. — В кн.: Автоматическое управление и вычислительная техника. М.: Машиностроение, 1968, вып. 8, с. 30—86.
2. Бойков А.Д., Ледяев С.Ф. Спектральный метод исследования динамики автоматических систем управления. — Саранск: Мордов.ун-т им. Н.П.Огарева, 1979. — 55 с.
3. Литвинец В.И., Рубахин В.Б., Назаров В.И. Оценка временной погрешности аппроксимации кривых ортогональным методом моментов. — В кн.: Научные и прикладные проблемы энергетики. Минск: Выш. шк., 1982, вып. 10, с. 95—98.
4. Система автоматического управления энергоблоком сверхкритических параметров / В.И.Литвинец, Г.Т.Кулаков, В.В.Молев и др. — Изв. вузов. Энергетика, 1980, № 8, с. 40—45.

УДК 621.314.53

В.А.СЕЛИВАНОВ,
В.Н.БАШАРИМОВА (ММИ)

СИНТЕЗ САУ ТИРИСТОРНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С УЧЕТОМ ЗОНЫ ПЕРЕРЫВИСТОГО ТОКА

При проектировании тиристорных широкорегулируемых электроприводов с подчиненным регулированием параметров возникает необходимость решения задач, направленных на повышение дина-