

APPLIED METHOD FOR CARRIER FREQUENCY RESTORATION OF TELEMETRY SYSTEMS SIGNAL BY DIGITAL PROCESSING

The paper considers the issue of restoring the level of the telemetry signal carrier frequency at digital processing in the automatic carrier control tract and the calculation of the threshold for taking the decision about the validity of received symbol of information from the spacecraft and carrier rocket. We describe the applied method and algorithm for calculating the level of the carrier frequency and the level of threshold for taking the decision based on histogram processing of the signal from the output of the frequency detector.

Keywords: control system, signal processing, telemetry.

© Зайцев О. В., 2010

УДК 621.311

И. В. Игнатъев, А. Е. Ковров

АЛГОРИТМ ВЫБОРА НАСТРОЕК АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ В МНОГОМАШИННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Предложен программно реализованный алгоритм согласованного выбора настроек автоматических регуляторов возбуждения. Алгоритм основан на понятии результата и работает применительно к математической модели энергосистемы, сформированной по экспериментальным частотным характеристикам.

Ключевые слова: автоматический регулятор возбуждения, результат, устойчивость.

Обеспечение устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) и демпфирование колебаний осуществляется автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ), которыми оснащены генераторы электростанций [1].

В настоящее время актуальна задача согласованного выбора коэффициентов стабилизации АРВ по условию обеспечения в многомашиной ЭЭС требуемого качества переходных процессов.

Для решения этой задачи ранее были разработаны алгоритмы [2–4], основанные на методе Д-разбиения. Эти алгоритмы предполагают поочередный для каждой станции выбор настроек АРВ по рассчитанным областям устойчивости. При этом переход от одной станции к другой осуществляется в направлении повышения степени устойчивости системы. Однако в связи со сложностью используемой целевой функции эти алгоритмы не всегда обеспечивают приемлемые демпферные свойства энергосистем с большим числом АРВ.

Другой подход к решению поставленной задачи заключается в использовании алгоритмов, которые основаны на расчете собственных значений матрицы коэффициентов линеаризованных дифференциальных уравнений Горева–Парка [5–7]. Но такие алгоритмы обладают недостатками, затрудняющими оперативное управление многомашиной ЭЭС. Они характеризуются высоким порядком дифференциальных уравнений и требуют значительного объема расчетов, а также допускают усреднение на значительных временных интервалах данных об элементах крупных узлов и подсистем ЭЭС, что часто приводит

к несоответствию формируемой математической модели и текущей режимной ситуации.

В работах [8; 9] было показано, что математическая модель ЭЭС может быть получена в виде характеристического полинома по экспериментальным частотным характеристикам параметров стабилизации. Такой подход позволяет избежать многих допущений и погрешностей моделирования, характерных для описанных выше расчетных методов, а также снизить размерность задачи выбора настроек АРВ, своевременно согласовав их с текущими условиями работы энергосистемы.

Авторами данной статьи предлагается новый алгоритм согласованного выбора настроек АРВ для многомашиных ЭЭС, который позволяет учесть достоинства решений, предложенных в [8; 9], и исключить недостатки разработанных ранее алгоритмов. Программная реализация нового алгоритма проведена в среде MatLab.

Описание алгоритма согласованного выбора настроек АРВ. Разработанный авторами алгоритм основан на понятии результата [10]. *Результатом* называется функция коэффициентов двух многочленов, обращение которой в нуль является условием, необходимым и достаточным для существования общего корня этих многочленов.

В качестве первого многочлена рассмотрим характеристический полином исследуемой энергосистемы

$$D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_{n-1} p + a_n, \quad (1)$$

в коэффициенты которого входят настройки каналов стабилизации АРВ. В общем виде можно записать

$$a_i = a_{i0} + \sum_{j=1}^r a_{ij} k_j + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r a_{ijk} k_j k_k + \sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^r a_{ijkl} k_j k_k k_l + \dots,$$

где r – количество генераторов, оснащенных АРВ; k_j, k_k, k_p, \dots – коэффициенты стабилизации.

Корни полинома (1) с наименьшими по модулю действительными частями определяют степень статической устойчивости анализируемой ЭЭС и называются доминирующими.

Второй многочлен – вспомогательная функция

$$Q(\lambda) = b_0 \lambda^m + b_1 \lambda^{m-1} + b_2 \lambda^{m-2} + \dots + b_{m-1} \lambda + b_m, \quad (2)$$

корни которой выбираются равными требуемым значениям доминирующих корней.

Задача заключается в том, чтобы за счет вариации коэффициентов стабилизации и, следовательно, a_i обеспечить равенство доминирующих корней полинома (1) корням полинома (2). При этом полученные коэффициенты АРВ должны соответствовать значениям настроек, реализуемым на практике.

Рассмотрим этапы работы алгоритма на примере энергосистемы, для улучшения демпферных свойств которой необходимо согласовать настройки АРВ трех эквивалентных генераторов. Будем считать, что все генераторы оснащены микропроцессорными АРВ.

На первом этапе, основываясь на методике, предложенной в работе [8], получим математическую модель исследуемой ЭЭС в виде полинома (1). Для этого вначале выделим в системе контуры регулирования, которые включают каналы стабилизации по изменению частоты напряжения Δf и ее производной f' . Такой подход обусловлен тем, что в АРВ на выделенные каналы возложена функция демпфирования низкочастотных колебаний. Для математического описания этих каналов будем использовать передаточные функции $F_1(p), F_2(p)$ и $F_3(p)$, индексы которых соответствуют порядковым номерам генераторов.

Оставшуюся часть энергосистемы, включая другие каналы АРВ, отразим симметрично относительно выделенных контуров через собственные $W_{11}(p), W_{22}(p), W_{33}(p)$ и взаимные $W_{12}(p), W_{13}(p), W_{21}(p), W_{23}(p), W_{31}(p), W_{32}(p)$ передаточные функции режимных параметров стабилизации (рис. 1).

Далее, используя формулу Мейсона [8], запишем передаточную функцию регулируемой ЭЭС от входа 1 к выходу 2:

$$W_p = \frac{W_{11} + \overline{W}_{12} F_2 + \overline{W}_{13} F_3 + \overline{W}_{123} F_2 F_3}{1 - (W_{11} F_1 + W_{22} F_2 + W_{33} F_3 + \overline{W}_{12} F_1 F_2 + \overline{W}_{13} F_1 F_3 + \overline{W}_{23} F_2 F_3 + \overline{W}_{123} F_1 F_2 F_3)}, \quad (3)$$

где $\overline{W}_{12}, \overline{W}_{13}, \overline{W}_{23}, \overline{W}_{123}$ – симметричные взаимные передаточные функции, которые формируются соответственно минорами и определителем матрицы:

$$\overline{W} = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Отметим, что в выражениях (3) и (4), как и в последующих сложных математических соотношениях, для упрощения записи опущен оператор p .

Авторами данной статьи ранее проводился анализ динамических свойств современных микропроцессорных АРВ, по результатам которого была составлена передаточная функция для выделенных в ЭЭС каналов стабилизации:

$$F(p) = \frac{2p}{(1+2p)} \frac{k_{0f}}{(1+0,2p)} + 0,5p \frac{k_{1f}}{1+0,5p}, \quad (5)$$

где k_{0f} – коэффициент стабилизации по отклонению частоты, $k_{0f} = 0 \dots 15$, в относительных единицах напряжения возбуждения/Гц; k_{1f} – коэффициент стабилизации по производной частоты, $k_{1f} = 0 \dots 5$, в относительных единицах напряжения возбуждения/Гц/с.

Приводя формулу (5) к общему знаменателю, запишем передаточную функцию каналов стабилизации для АРВ i -го генератора:

$$F_i(p) = \frac{(p^2 + 2p)k_{0fi} + (0,2p^3 + 1,1p^2 + 0,5p)k_{1fi}}{0,2p^3 + 1,5p^2 + 2,7p + 1} = \frac{f'_i}{f_i}. \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в знаменатель (3), получим характеристический полином исследуемой ЭЭС в общем виде:

$$D(p) = \Delta_n f_1 f_2 f_3 - W'_{11} f'_1 f_2 f_3 - W'_{22} f_1 f'_2 f_3 - W'_{33} f_1 f_2 f'_3 - \overline{W}'_{12} f'_1 f'_2 f_3 - \overline{W}'_{13} f'_1 f_2 f'_3 - \overline{W}'_{23} f_1 f'_2 f'_3 - \overline{W}'_{123} f'_1 f'_2 f'_3, \quad (7)$$

где $W'_{ij}, \overline{W}'_{ij}, \overline{W}'_{ijk}$ – числители собственных и взаимных передаточных функций режимных параметров стабилизации; Δ_n – общий знаменатель этих функций.

Для расчета численных значений нулей и полюсов передаточных функций, входящих в формулу (7), авторами в соответствии методикой параметрической идентификации ЭЭС [9] разработана процедура, которая включает следующие шаги:

1) определение с помощью дискретного преобразования Фурье комплексных выборок собственных и взаимных частотных характеристик разомкнутой системы по измеренным в точках 1 и 2 (см. рис. 1) временным характеристикам замкнутой ЭЭС;

2) анализ конфигурации полученных частотных характеристик с целью выявления доминирующих полюсов и нулей, определяющих основные динамические свойства энергосистемы в диапазоне существенных частот;

3) аппроксимация остаточной частотной характеристики сглаживающей дробно-рациональной функции методом наименьших квадратов.

Подставляя в выражение (7) нули и полюсы, найденные на шаге 2, получим многопараметрическую модель анализируемой ЭЭС в виде полинома (1). В результате каждый коэффициент этого полинома будет содержать нелинейную комбинацию искомым настроек АРВ.

Второй этап работы алгоритма согласованного выбора настроек АРВ включает выполнение двух процедур: расчет корней характеристического полинома и анализ их расположения на комплексной плоскости.

Первая процедура выполняется после подстановки в выражение (1) значений коэффициентов стабилизации, установленных в АРВ каждого генератора.

Вторая процедура позволяет количественно оценить степень устойчивости анализируемой системы для теку-

щей режимной ситуации. Этот показатель определяется модулем действительной части, ближайшей к мнимой оси пары сопряженных комплексных корней полинома (1).

Третий этап работы алгоритма относится к процедуре расчета вспомогательной функции и включает следующие шаги:

1) из всей совокупности корней характеристического полинома, отвечающих электромеханическим составляющим движения системы, выбираются $m = 6$ доминирующих корней. Число m определяется количеством согласуемых коэффициентов стабилизации;

2) исходя из условия обеспечения требуемого качества переходных процессов в ЭЭС, задается желаемое расположение выбранных доминирующих корней на комплексной плоскости, т. е. их действительная и мнимая части;

3) по заданным значениям доминирующих корней рассчитываются коэффициенты b_i функции (2). Таким образом, в рассматриваемом нами случае необходимо найти такие коэффициенты стабилизации, которые обеспечат равенство шести доминирующих корней полинома (1) из общего их количества n корням вспомогательной функции;

4) для решения поставленной задачи по правилу Сильвестра составляется матрица результата, порядок которой равен $m + n$:

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & a_0 & a_1 & \dots & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n \\ 0 & 0 & \dots & a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} & a_n & 0 \\ \cdot & \cdot \\ a_0 & a_1 & \dots & a_{n-2} & a_{n-1} & a_n & \dots & 0 & 0 & 0 \\ b_0 & b_1 & \dots & b_{m-1} & b_m & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_0 & \dots & \dots & b_{m-1} & b_m & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot \\ 0 & \dots & \dots & 0 & b_0 & \dots & \dots & b_m & 0 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & b_0 & \dots & \dots & b_m & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где элементы, расположенные выше a_0 , b_m и ниже b_0 и a_n , равны нулю.

Согласно теореме о результате [10], для существования m общих корней многочленов (1) и (2) необходимо и достаточно выполнение условия

$$R(D, Q) = R_1(D, Q) = R_2(D, Q) = \dots = R_{m-1}(D, Q) = 0,$$

где $R(D, Q)$ – определитель матрицы, которая формируется из матрицы M удалением ее $m - 1$ первых и последних строк и $2m - 2$ последних столбцов; $R_1(D, Q), R_2(D, Q), \dots, R_{m-1}(D, Q)$ – определители матриц, которые формируются из предыдущей матрицы поочередной заменой ее последнего столбца каждым из следующих за ним столбцов матрицы M .

Отметим, что указанные в теореме о результате определители представляют собой нелинейные функции, содержащие в качестве переменных коэффициенты стабилизации АРВ.

В соответствии с этой теоремой рассчитаем определители $R(D, Q), R_1(D, Q), \dots, R_5(D, Q)$ и запишем систему нелинейных уравнений:

$$\begin{cases} R(D, Q) = 0, \\ R_1(D, Q) = 0, \\ R_2(D, Q) = 0, \\ R_3(D, Q) = 0, \\ R_4(D, Q) = 0, \\ R_5(D, Q) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

Численное решение системы уравнений (10) с помощью вычислительных процедур системы MatLab позволяет с заданной точностью найти коэффициенты стабилизации, которые обеспечивают доминирующим корням полинома (1) требуемые значения.

Если в результате расчета полученные настройки АРВ не соответствуют реализуемым на практике значениям, то корни вспомогательной функции изменяются и рас-

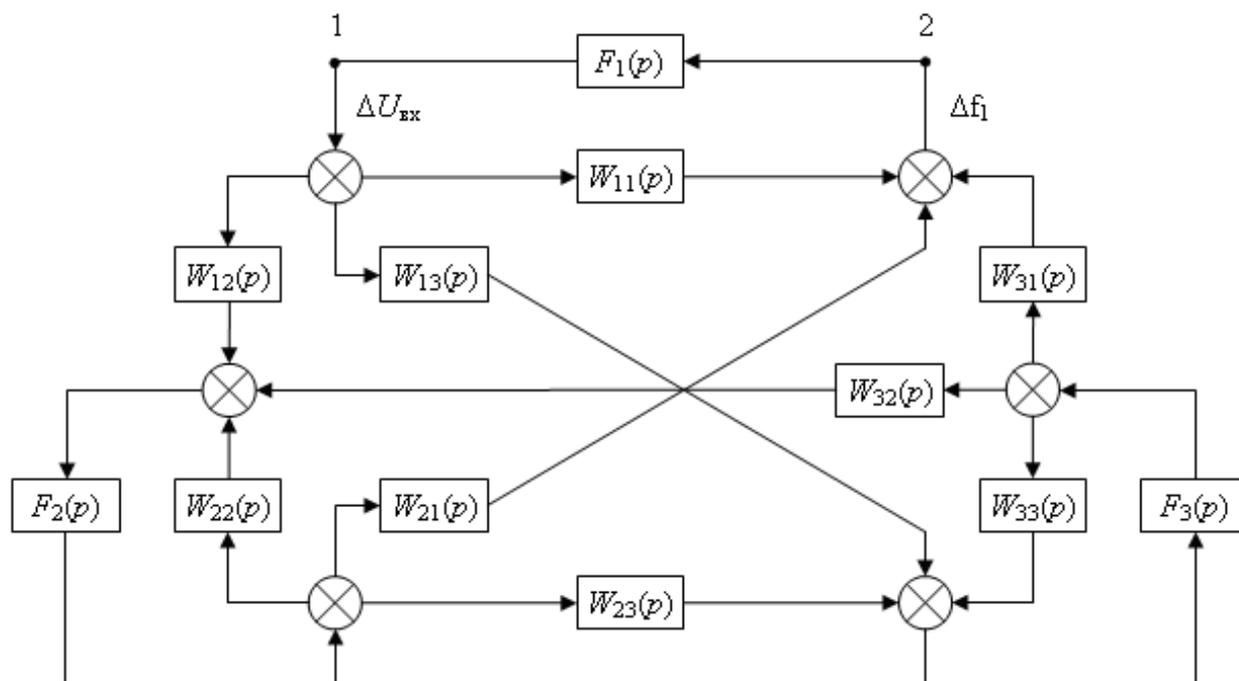


Рис. 1. Трехконтурное структурное представление энергосистемы

чет производится заново, начиная с третьего этапа. В рассматриваемом в данной статье случае изменение корней функции (2) основано на движении двух крайних пар доминирующих корней навстречу друг другу.

Таким образом, решение поставленной задачи может носить итерационный характер, хотя достичь приемлемых значений настроек АРВ удается, как правило, за несколько итераций.

Пример расчета. Для проверки работоспособности разработанного алгоритма был проведен машинный эксперимент по расчету оптимальных настроек АРВ для генераторов Иркутской энергосистемы.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

- сбор данных об элементах Иркутской энергосистемы (параметров линий электропередач, трансформаторов, генераторов, реакторов и устройств управления);
- формирование модели энергосистемы в пакете Simulink;
- проверка адекватности разработанной модели реальной работе энергосистемы;
- расчет типового режима, используемого в Иркутской энергосистеме;

– подача возмущающих воздействий в выбранных точках ЭЭС (см. рис. 1) и запись полученных временных характеристик, отражающих динамические свойства системы;

– выполнение процедур алгоритма согласованного выбора настроек АРВ.

Исследования проводились с помощью пакетов расширений SimPowerSystems и Simulink системы MatLab. Пакет SimPowerSystems использовался для формирования моделей различных устройств ЭЭС: силовой части, систем регулирования, управления и измерения. Пакет Simulink применялся для разработки блоков микропроцессорных АРВ и осуществления имитационного моделирования.

Иркутская энергосистема была представлена эквивалентной моделью (рис. 2), содержащей генераторы Братской, Усть-Илимской и Красноярской ГЭС. Генерация Иркутской ГЭС также была учтена в нагрузке.

При формировании типового режима использовались данные диспетчерских ведомостей по основным системообразующим линиям 500 кВ Иркутской энергосистемы.

Для того чтобы начать моделирование с установившегося режима, производилась инициализация синхрон-

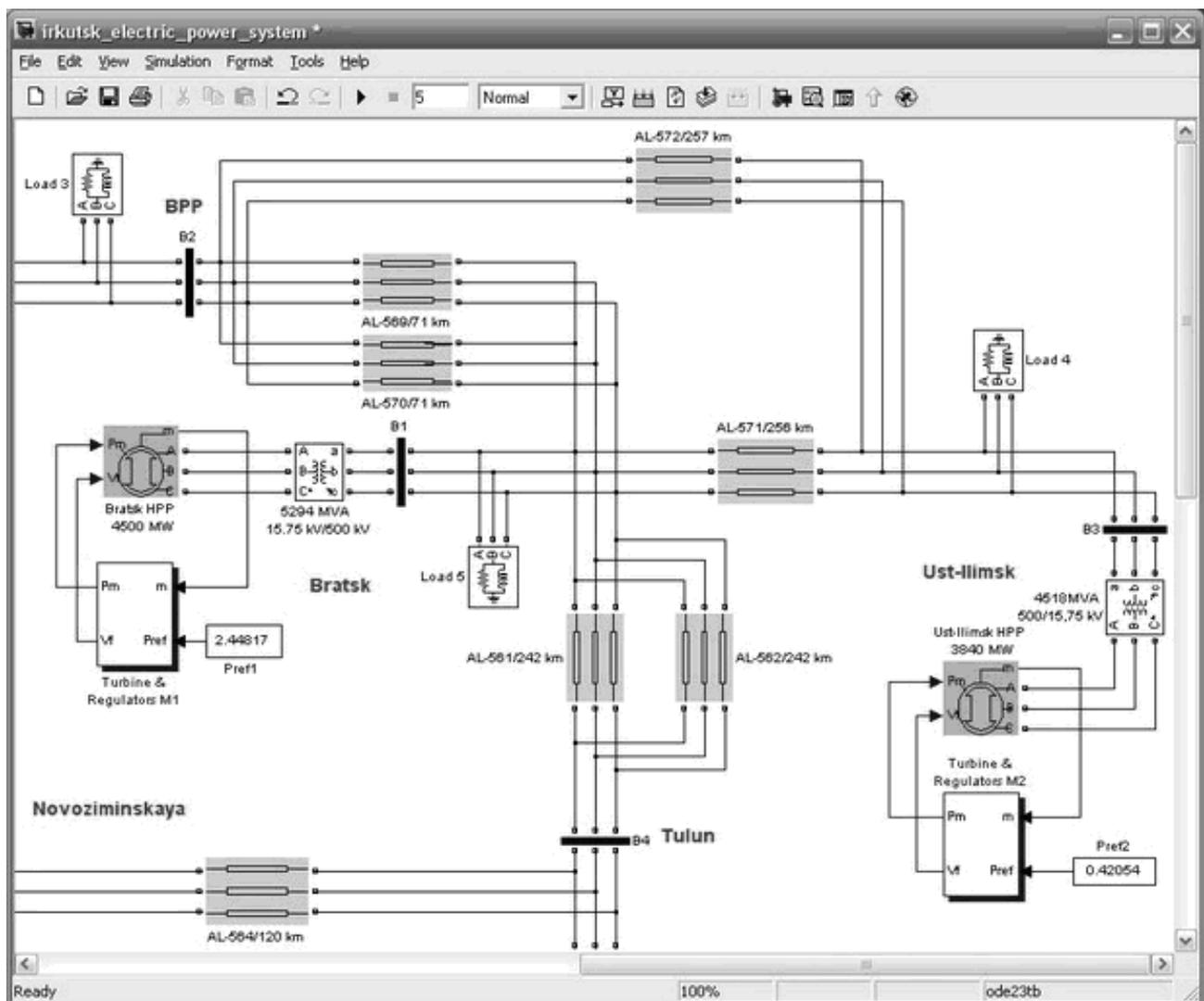


Рис. 2. Фрагмент Иркутской энергосистемы, представленный в пакете Simulink

ных генераторов и АРВ для заданного уровня нагрузки. Инициализация подразумевает установку для эквивалентного генератора Братской ГЭС режима двунаправленной передачи мощности, для Усть-Илимской и Красноярской ГЭС выбран режим выработки заданной активной мощности при поддержании постоянного статорного напряжения.

После подачи возмущающих воздействий и выполнения процедур двух первых этапов алгоритма согласованного выбора настроек АРВ было получено математическое описание ЭЭС в виде полинома (1), порядок которого составил $n = 28$. Результаты расчета доминирующих корней этого полинома при установленных на генераторах настройках АРВ представлены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 показывает, что анализируемая система обладает плохими демпферными свойствами, поскольку пара доминирующих корней с мнимыми частями $\omega = 7,22$ рад/с имеет низкое затухание $\alpha = 0,23$. Для такого режима необходимо изменение настроек АРВ с целью повышения устойчивости ЭЭС. В соответствии с этим в качестве корней вспомогательной функции были заданы значения с действительной частью $\alpha < -0,6$.

В результате выполнения процедур следующих этапов алгоритма были рассчитаны коэффициенты стабилизации, которые обеспечивают доминирующим корням полинома (1) заданное затухание. Результаты расчетов новых настроек АРВ приведены в табл. 2.

Расчеты, проведенные авторами с помощью программного обеспечения REGIM, SBORKA и POISK, разработанного в Санкт-Петербургском государственном техническом университете, полностью подтвердили результаты, приведенные в табл. 2. Это говорит об эффективности работы алгоритма и о возможности его использования для согласованного выбора настроек АРВ по условию обеспечения в ЭЭС требуемого уровня демпфирования переходных процессов.

Таким образом, авторами были получены следующие результаты:

- на основе понятия результата предложен и обоснован алгоритм согласованного выбора настроек АРВ в многомашинных энергосистемах;
- новый алгоритм работает применительно к математической модели, синтезированной по экспериментальным данным;
- на базе машинного эксперимента показано, что предложенный алгоритм позволяет эффективно решать задачу обеспечения требуемого качества переходных процессов в ЭЭС;
- разработанный алгоритм позволяет существенно снизить размерность задачи выбора настроек АРВ и может быть использован в условиях реальной эксплуатации энергосистем для повышения их устойчивости.

Библиографические ссылки

1. Овчаренко Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем : учебник для вузов / под ред. А. Ф. Дьякова. М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
2. Литкенс И. В., Филинская Н. Г. Выбор настроек АРВ в многомашинной энергосистеме // Электричество. 1986. С. 15–19.
3. Зеккель А. С. Оценка качества регулирования и методика настройки стабилизации АРВ генераторов // Электричество. 1988. № 5. С. 15–21.
4. Абдул-Заде В. М., Алиев Д. Г., Гусейнов А. М. Выбор настроек АРВ генераторов по результатам анализа статической устойчивости // Электричество. 1990. № 3. С. 54–58.
5. Симеонова К. Ж., Строев В. А. Вопросы выбора параметров АРВ в сложных электроэнергетических системах // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1987. № 5. С. 61–71.

Таблица 1

Результаты расчета доминирующих корней

Доминирующие корни			Настройки АРВ					
№ корня	Действительная часть	Мнимая часть	Братская ГЭС		Красноярская ГЭС		Усть-Илимская ГЭС	
			k_{0f}	k_{1f}	k_{0f}	k_{1f}	k_{0f}	k_{1f}
1	-0,23	7,22	10	2	15	0	7	5
2	-0,23	-7,22						
3	-0,77	5,35						
4	-0,77	-5,35						
5	-0,97	6,34						
6	-0,97	-6,34						

Таблица 2

Результаты расчета настроек АРВ

Корни вспомогательной функции			Настройки АРВ					
№ корня	Действительная часть	Мнимая часть	Братская ГЭС		Красноярская ГЭС		Усть-Илимская ГЭС	
			k_{0f}	k_{1f}	k_{0f}	k_{1f}	k_{0f}	k_{1f}
1	-0,65	7,22	7	2	10	5	5	2
2	-0,65	-7,22						
3	-0,77	5,35						
4	-0,77	-5,35						
5	-0,8	6,34						
6	-0,8	-6,34						

6. Масленников В. А. Программное обеспечение для расчетов колебательной статической устойчивости энергосистем // Изв. вузов: Энергетика. 1995. № 3–4. С. 33–38.

7. Maslennikov V. A., Ustinov S. M. Software «POISK» / / Advanced Information Technology for Power Systems Stability Control : Proc. of Intern. Conf. on Informatics and Control (ICI&C'97). Vol 2. St. Petersburg, 1997. P. 696–703.

8. Дойников А. Н. Построение математической модели для централизованного регулирования возбуждения генераторов в сложной энергосистеме по выборкам реальных сигналов // Электрификация металлургических

предприятий Сибири / сост. и общ. ред. Б. И. Кудрина. Вып. 8. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 198–202.

9. Дойников А. Н., Григорьева Т. А. Анализ динамических свойств и синтез моделей электроэнергетических систем по режимным частотным характеристикам // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем / Иркут. гос. ун-т путей сообщения. Иркутск, 2005. С. 91–102.

10. Калинина Е. А., Утешев А. Ю. Теория исключения : учеб. пособие. СПб. : Изд-во С.-Петербург. гос. ун-та, 2002.

I. V. Ignatyev, A. E. Kovrov

THE CHOICE ALGORITHM OF AUTOMATIC EXCITATION REGULATOR SETTINGS FOR MULTIMACHINE ELECTRIC POWER SYSTEMS

A program-realized coordinated choice algorithm of automatic excitation regulator settings is presented. This algorithm is based on the resultant theory and uses a mathematical model which is synthesized by experimental frequency characteristics of the electric power system.

Keywords: automatic excitation regulator; resultant.

© Игнатъев И. В., Ковров А. Е., 2010

УДК 004.942+574.5

Ю. С. Петров, В. Е. Распопов

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Рассмотрены точечная имитационная и одномерная математические модели водных экосистем. Модели предназначены для изучения экосистем плесов Красноярского водохранилища и отдельных участков реки Енисей. Приведены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: математическая модель, математическое моделирование водных экосистем, вычислительный эксперимент.

В общем перечне актуальных задач, решаемых с помощью математического моделирования, экологические проблемы занимают особое место. Увеличение антропогенного воздействия на окружающую среду, вызванное интенсивным использованием природных ресурсов в процессе материального производства, приводит к нарушению экологического равновесия как локально в отдельных районах земного шара, так и глобально в масштабах планеты. Необходимость борьбы с антропогенным эвтрофированием водоемов и их загрязнением, принявшими глобальный характер, стимулировала проведение широкого круга исследований в области лимнологии, математического моделирования и экономики, связанных с проблемами сохранения, восстановления и эффективного использования природных ресурсов озер и искусственных водоемов.

Экологическое состояние водных объектов зависит от большого числа разнообразных факторов и процессов:

гидрофизических, гидробиологических, гидрохимических, метеорологических и антропогенных. При этом особое внимание следует обратить на гидрофизические процессы, которые в значительной мере формируют среду обитания гидробионтов, определяют перенос и седиментацию веществ, интенсивность загрязнения и самоочищения водоемов.

Проблема качества воды является комплексной проблемой, так как вода – это сложная физическая, биохимическая и экологическая система. Эффективным средством объективного анализа возникающих проблем в области гидробиологии являются методы, основанные на построении и изучении математических моделей водных экосистем. Использование математического моделирования и проведение вычислительного эксперимента позволяют предсказать динамику развития водной экосистемы, а также оценить последствия реализации различных проектов, связанных с воздействием на эту экосистему.