

ВЫБОР КОЭФФИЦИЕНТОВ СТАБИЛИЗАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На основе понятия результата разработан алгоритм согласованного выбора настроек автоматических регуляторов возбуждения. Для анализа динамических свойств объекта исследования используется математическая модель, формируемая по экспериментальным данным.

Ключевые слова: автоматический регулятор возбуждения, устойчивость, электроэнергетическая система, результат.

Необходимый уровень устойчивости электроэнергетических систем (ЭЭС) в основном обеспечивается работой автоматических регуляторов возбуждения (АРВ), которыми оснащены генераторы электростанций [1].

В настоящее время актуальна проблема повышения пропускной способности системообразующих связей ЭЭС, ограничиваемой по условиям устойчивости. Решение этой проблемы требует разработки и совершенствования алгоритмов, обеспечивающих согласованный выбор настроек каналов стабилизации АРВ.

Ранее для решения указанной проблемы были разработаны алгоритмы [2–4], основанные на частотных методах анализа устойчивости ЭЭС. Такие алгоритмы осуществляют последовательный для каждой станции расчет кривых Д-разбиения. При этом коэффициенты стабилизации выбираются, исходя из наиболее достижимой степени устойчивости на каждом этапе. Однако, в связи со сложностью используемой целевой функции данные алгоритмы не всегда позволяют обеспечить приемлемые демпферные свойства энергосистем с большим числом АРВ.

Другой подход к решению обозначенной проблемы реализуют методы, основанные на расчете собственных значений матрицы коэффициентов линеаризованных дифференциальных уравнений Горева-Парка [5–7]. Но, такие методы и разработанные на их базе алгоритмы обладают недостатками, затрудняющими оперативное управление многомашинной ЭЭС:

- характеризуются высокой размерностью используемых дифференциальных уравнений, требующих значительного объема расчетов;
- допускают усреднение на значительных временных интервалах данных об элементах крупных узлов и подсистем ЭЭС, что часто приводит к несоответствию формируемой математической модели изменяющейся режимной ситуации.

В работах [8, 9] было показано, что для практической настройки регуляторов возбуждения может использоваться математическая модель ЭЭС, формируемая по экспериментальным частотным характеристикам параметров стабилизации. Такой подход позволяет избежать погрешностей моделирования, характерных для описанных выше расчетных методов, а так же своевременно согласовывать настройки АРВ с текущими условиями работы энергосистемы.

Учитывая достоинства решений, предложенных в работах [8, 9], авторами данной статьи разработан новый алгоритм согласованного выбора на-

строек АРВ, который позволяет исключить недостатки вышеописанных алгоритмов.

Программная реализация процедур алгоритма проведена в среде MATLAB.

Предлагаемый авторами алгоритм основан на понятии результата. Результатом называется функция коэффициентов двух многочленов, обращение которой в нуль является условием необходимым и достаточным для существования общего корня этих многочленов [10. С. 9].

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_l, \dots – настройки каналов 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 полинома (1).

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

Рассмотрим поэтапно работу алгоритма на примере энергосистемы, для улучшения демпферных свойств которой необходимо выбрать настройки АРВ трех эквивалентных генераторов. Будем считать, что эти генераторы оснащены микропроцессорными АРВ.

На первом этапе, используя методику, предложенную в работе [8], получим математическую модель исследуемой ЭЭС в виде полинома (1). Для этого, вначале, выделим в системе контуры регулирования, которые включают каналы стабилиза-

ции по изменению частоты напряжения Δf и ее производной f' . Такой подход обусловлен тем, что на выделенные каналы АРВ возложена функция демпфирования низкочастотных колебаний. Для описания динамических свойств 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 (рис. 1) 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.

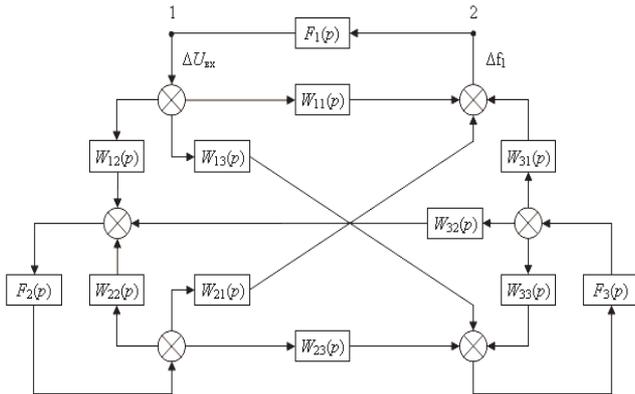


Рис. 1. Трехконтурное структурное представление исследуемой энергосистемы

Используя формулу Мейсона [8] запишем в соответствии с рис. 1 передаточную функцию регулируемой ЭЭС от входа 1 к выходу 2:

$$W_p = \frac{W_{11} + \bar{W}_{12}F_2 + \bar{W}_{13}F_3 + \bar{W}_{123}F_2F_3}{1 - (W_{11}F_1 + W_{22}F_2 + W_{33}F_3 + \bar{W}_{12}F_1F_2 + \bar{W}_{13}F_1F_3 + \bar{W}_{23}F_2F_3 + \bar{W}_{123}F_1F_2F_3)}, \quad (3)$$

где \bar{W}_{12} , \bar{W}_{13} , \bar{W}_{23} , \bar{W}_{123} – симметричные взаимные передаточные функции, которые формируются минорами матрицы:

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

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

Ранее авторами данной статьи проводился анализ динамических свойств современных микропроцессорных АРВ. По результатам анализа была составлена передаточная функция для выделенных каналов стабилизации:

$$F(p) = \frac{2p}{(1+2p)} \cdot \frac{k_{0f}}{(1+0.2p)} + 0.5p \cdot \frac{k_{1f}}{1+0.5p}, \quad (5)$$

где k_{0f} – коэффициент стабилизации по отклонению частоты напряжения; k_{1f} – коэффициент стабилизации по производной частоты напряжения.

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

$$F_i(p) = \frac{(p^2 + 2p) \cdot k_{0fi} + (0.2p^3 + 1.1p^2 + 0.5p) \cdot k_{1fi}}{0.2p^3 + 1.5p^2 + 2.7p + 1} = \frac{f_i'}{f_i}. \quad (6)$$

Подставляя выражение (6) в знаменатель (3), получим в общем виде характеристический полином анализируемой энергосистемы:

$$D(p) = \Delta_n f_1 f_2 f_3 - W_{11}' f_1' f_2' f_3' - W_{22}' f_1' f_2' f_3' - W_{33}' f_1' f_2' f_3' - \bar{W}_{12}' f_1' f_2' f_3' - \bar{W}_{13}' f_1' f_2' f_3' - \bar{W}_{23}' f_1' f_2' f_3' - \bar{W}_{123}' f_1' f_2' f_3', \quad (7)$$

где W_{ij}' , \bar{W}_{ij}' , \bar{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 с рассматриваемой методикой была разработана процедура параметрической идентификации ЭЭС, которая включает в себя 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 функцией методом наименьших квадратов.

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

На втором этапе последовательно выполняются две процедуры: 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 ЭЭС для текущей режимной ситуации. Данный показатель определяется модулем действительной части, ближайшей к мнимой оси пары сопряженных комплексных корней полинома (1).

Третий этап – расчет вспомогательной функции. Эта процедура включает в себя 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 случае необходимо найти такие коэффициенты стабилизации АРВ, которые обеспечат равенство шести доминирующих корней полинома (1) из общего их количества n корням вспомогательной функции.

На четвертом этапе для решения поставленной задачи составим по правилу Сильвестра матрицу результата:

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

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

Согласно теореме о результате [10. С. 23] 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, формируемой из матрицы M удалением ее $m-1$ первых и последних строк и $2m-2$ последних столбцов; $R_1(D, Q), \dots, R_{m-1}(D, Q)$ – определители матриц, формируемых из предыдущей матрицы поочередной заменой ее последнего столбца каждым из следующих за ним столбцов матрицы M .

Отметим, что указанные определители представляют собой нелинейные функции, содержащие в качестве переменных настройки каналов стабилизации.

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

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

Численное решение полученной системы уравнений 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 расчет производится заново, начиная с третьего этапа. В рассматриваемом 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, но, как правило, за несколько итераций удается достичь приемлемых значений настроек АРВ.

Для проверки работоспособности нового алгоритма был проведен машинный эксперимент по расчету оптимальных настроек каналов стабилизации АРВ для генераторов Иркутской энергосистемы.

Поставленная цель была достигнута решением следующих задач:

- сбор данных об элементах Иркутской энергосистемы (параметры линий электропередач, трансформаторов, генераторов, реакторов, устройств управления);
- формирование модели энергосистемы в Simulink;
- проверка адекватности разработанной модели реальной работе энергосистемы;
- расчёт типового режима, имеющего место в Иркутской энергосистеме;
- подача возмущающих воздействий в выбранных точках ЭЭС и запись временных характеристик, отражающих динамические свойства системы;
- выполнение процедур алгоритма согласованного выбора настроек АРВ.

Исследования проводились с помощью пакетов SimPowerSystems и Simulink системы Matlab. SimPowerSystems использовался для формирования моделей различных устройств ЭЭС: силовой части, систем регулирования, измерения и управления. Пакет Simulink использовался для разработки блоков систем возбуждения, в том числе АРВ и проведения имитационного моделирования.

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

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

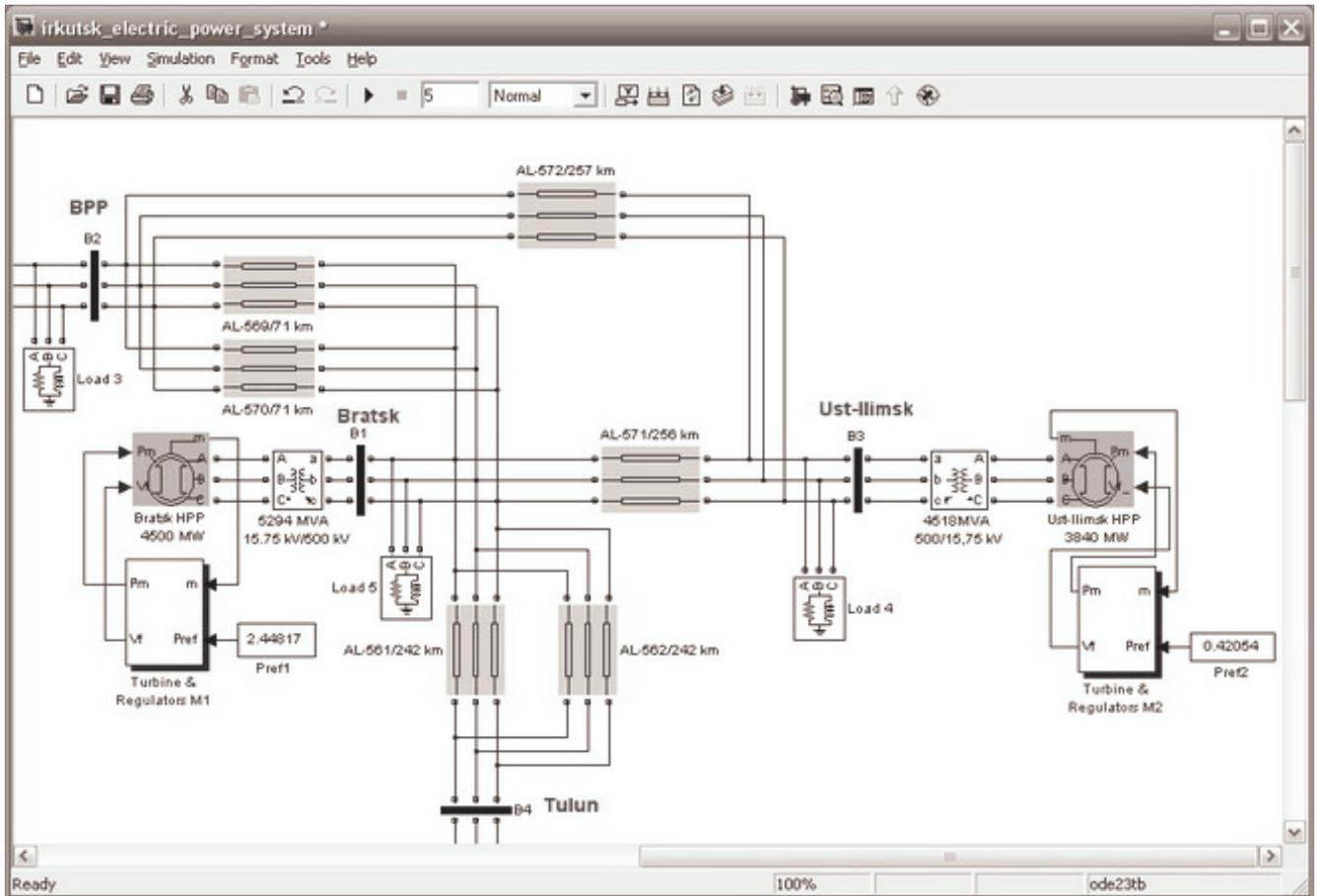


Рис. 2. Фрагмент модели Иркутской энергосистемы в Simulink

Таблица 1

Результаты расчета доминирующих корней

Доминирующие корни			Настройки АРВ					
№ корня	Действительная часть	Мнимая часть	Братская ГЭС		Красноярская ГЭС		Усть-Илимская ГЭС	
			k_{of}	k_{1f}	k_{of}	k_{1f}	k_{of}	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_{of}	k_{1f}	k_{of}	k_{1f}	k_{of}	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						

Для того чтобы начать моделирование с установившегося режима производилась инициализация синхронных 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 выбраны режим выработки заданной активной мощности при поддержании постоянного статорного напряжения.

После подачи возмущающих воздействий и выполнения процедур двух первых этапов алгоритма было получено математическое описание ЭЭС в виде полинома (1). Результаты расчета доминирующих корней этого полинома при установленных на генераторах настройках АРВ представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, 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 сведены в табл. 2.

Расчеты, проведенные авторами с помощью программного обеспечения REGIM, SBORKA и POISK, разработанного Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом, полностью подтвердили результаты, приведенные в табл. 2. Это говорит о правильной работе алгоритма и о возможности его использования для согласованного выбора настроек АРВ по условию обеспечения в ЭЭС требуемого уровня демпфирования переходных процессов.

Таким образом, авторами на основе понятия результата предложен и обоснован алгоритм согласованного выбора настроек АРВ в многомашинных энергосистемах.

В новом алгоритме для описания динамических свойств ЭЭС используется математическая модель, формируемая по экспериментальным частотным характеристикам.

На базе машинного эксперимента показано, что разработанный алгоритм позволяет эффективно решать задачу улучшения демпферных свойств ЭЭС.

Предложенный алгоритм существенно снижает размерность задачи выбора настроек АРВ и может быть использован в условиях реальной эксплуатации энергосистем для повышения их устойчивости.

Литература

1. Овчаренко, Н. И. Автоматика электрических станций и электроэнергетических систем : учеб. для вузов / Н. И. Овчаренко ; под ред. А. Ф. Дьякова. — М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. — 504 с.
2. Литкенс И. В. Выбор настроек АРВ в многомашинной энергосистеме / И. В. Литкенс, Н. Г. Филинская // Электричество. —1986. — № 2. — С.15—9.
3. Зеккель, А. С. Оценка качества регулирования и методика настройки стабилизации АРВ генераторов / А. С. Зеккель // Электричество. — 1988. — № 5. — С. 15-21.
4. Абдул-Заде, В. М. Выбор настроек АРВ генераторов по результатам анализа статической устойчивости / В. М. Абдул-Заде, Д. Г. Алиев, А. М. Гусейнов // Электричество. —1990. — № 3. — С. 54 — 58.
5. Симеонова, К. Ж., Вопросы выбора параметров АРВ в сложных электроэнергетических системах / К. Ж. Симеонова, В. А. Строев // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1987. — № 5. — С. 61-71.
6. Масленников, В. А. Программное обеспечение для расчетов колебательной статической устойчивости энергосистем / В. А. Масленникова // Изв. высш. учеб. заведений. Энергетика. —1995. — № 3 -4. — С. 33 — 38.
7. Maslennikov, V. A. Software "POISK" — Advanced Information Technology for Power Systems Stability Control / V. A. Maslennikov , S. M. Ustinov // Proceedings of International Conference on Informatics and Control (ICI&C'97), Russia, June 10-13 1997 . — St. Petersburg, 1997. — vol. 2. — P. 696 — 703.
8. Дойников, А. Н. Построение математической модели для централизованного регулирования возбуждения генераторов в сложной энергосистеме по выборкам реальных сигналов / А. Н. Дойников // Электрификация металлургических предприятий Сибири : сб. ст. — Томск : Изд-во Том. ун-та, 1999. — Вып. 8. — С. 198 -202.
9. Дойников, А. Н. Анализ динамических свойств и синтез моделей электроэнергетических систем по режимным частотным характеристикам / А. Н. Дойников, Т. А. Григорьева // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. — Иркутск : ИИТМ ИрГУПС, 2005.— С. 91 — 102.
10. Калинина, Е. А. Теория исключения : учеб. пособие / Е. А. Калинина, А. Ю. Утешев. — СПб.: Изд-во НИИ химии СПбГУ, 2002. — 72 с.