

\* \* \*

## Новый подход к оптимизации регуляторов устройств для гибких линий с целью повышения устойчивости электроэнергетических систем<sup>1</sup>

СЯОПИН ЧЖАН

*Представлен новый подход к управлению демпфированием с помощью FACTS на множестве режимов. Задача расчета такого управления является задачей расчета оптимального регулятора с обратной связью по выходу для многомодельной системы, требования к управлению которой могут быть описаны нелинейными матричными неравенствами. Предлагаемое управление демпфированием с помощью FACTS может гарантировать удовлетворительную работу не на одном, а на множестве режимов. Представлены две стратегии управления: с одним регулятором и со многими регуляторами.*

**Ключевые слова:** энергосистемы, передачи переменного тока, оптимизация, повышение устойчивости

Устройства FACTS могут обеспечить дополнительное демпфирование при небольших возмущениях, если регуляторы демпфирования рассчитаны правильно [1]. В прошлом идеи подходов к разработке традиционного стабилизатора энергосистемы (PSS) применялись для построения регуляторов демпфирования на основе устройств FACTS [2, 3]. Однако эти устройства обыч-

*A new approach for control of damping in power systems using FACTS in a number of operating modes is presented. Calculation of such control boils down to a calculation of an optimal controller with an output feedback for a multimodel system, the control requirements for which can be described by nonlinear matrix inequalities. The proposed control of damping using FACTS can guarantee satisfactory operation in many rather than in one operating mode. Two control strategies with one and several controllers are presented.*

**Key words:** power systems, AC power transmission lines, optimization, enhancement of stability

но устанавливаются на линиях передачи, что затрудняет расчет регулятора демпфирования и выбор сигналов обратной связи.

В последние годы для разработки регуляторов демпфирования, основанных на устройствах FACTS (например, регуляторы  $H_{\psi}$  смешанной чувствительности [4, 5] и смешанные регуляторы  $H_2 / H_{\psi}$  с размещением полюсов), использовался метод линейного матричного неравенства (ЛМН) [6].

Вычислительные алгоритмы, основанные на ЛМН, которые отличаются от традиционных инст-

<sup>1</sup> Статья написана по результатам исследований в рамках Международного проекта ICOEUR (см. «Электричество», 2011, № 4).

рументов анализа, были исследованы в теории систем и теории управления [7]. Следует отметить, что упомянутые алгоритмы для расчета регуляторов демпфирования с помощью устройств FACTS основаны на базовой классической модели и могут хорошо работать при рассмотрении нормального режима. В прошлом при использовании метода ЛМН для разработки регулятора демпфирования основное внимание уделялось базовой модели, так как описания с помощью ЛМН функций управления, начиная от работы  $H_2$  и  $H_\infty$  до размещения полюсов в заданной области регулирования и установки ограничений для регулятора связи по выходу, широко обсуждались в теории управления [7–11]. Для решения задач ЛМН существуют программные комплексы, такие как Matlab LMI Control Toolbox [12, 13].

Однако, если послеаварийный режим существенно отличается от нормального, регулятор, настроенный на нормальный режим, может не сработать должным образом с точки зрения эффективности управления. Если же интерес представляют несколько режимов при относительно большом возмущении, эти режимы могут рассматриваться с помощью разных линейных моделей. В этой ситуации расчет регулятора демпфирования заключается в нахождении общего регулятора с обратной связью по выходу для многомодельной системы. Однако распространение описания ЛМН и связанных с ним методов параметризации и преобразования на регулирование с обратной связью по выходу для расчета регулятора демпфирования для многомодельной системы сопряжено с определенными трудностями.

Для традиционного подхода ЛМН, основанного на базовой модели, матричные ограничения на размещение полюсов  $H_2$ ,  $H_\infty$  и т.д. нелинейны относительно переменных матрицы регулятора и матрицы Ляпунова, которые могут быть параметризованы множеством матриц [10, 11]. Это приводит к системе ЛМН, удобной для решения с использованием алгоритмов выпуклой оптимизации. Однако параметризация явно зависит от матриц состояний системы, и метод параметризации не может применяться для многомодельной системы, так как матрицы состояний системы будут разными для каждой модели многомодельной системы, которая соответствует конкретному режиму. Такие методы параметризации не могут быть использованы для нахождения общего регулятора для многомодельной системы.

Для того чтобы преодолеть трудности, вызванные необходимостью параметризации [10, 11], для многомодельной системы при обратной связи по выходу был предложен двухэтапный метод для общей линейной модели с матрицами  $(A, B, C, D)$ .

В статье концепция двухэтапного подхода, основанного на ЛМН, к решению задачи с нелинейным матричным неравенством (НМН) применяется для расчета регулятора демпфирования с обратной связью по выходу для многомодельной системы. Подробно выводится формулировка размещения полюсов в заданной области с помощью НМН. Этот подход применяется для расчета регулятора демпфирования электроэнергетических систем с компенсатором STATCOM с учетом передовых внутренних регуляторов развязки этого компенсатора. Затем этот подход применяется в двух стратегиях управления. Первая стратегия управления должна определить один регулятор демпфирования для всех режимов, представляющих интерес. Вторая стратегия управления должна определить разные регуляторы демпфирования. Каждый регулятор может управлять несколькими интересующими нас режимами, и вместе они должны охватить все режимы. Для регулирования демпфирования с помощью компенсатора STATCOM для конкретного уровня рабочей нагрузки один из регуляторов демпфирования управляется и запускается в реальном времени через систему SCADA/EMS, в то время как остальные регуляторы демпфирования отключены.

**Двухэтапный подход с использованием ЛМН для многомодельной системы с ограничениями на размещение полюсов в заданной области. А. Модель системы с множеством режимов.** Множество линеаризованных моделей, представляющих собой множество режимов системы, задаются уравнениями:

$$\dot{x} = A_i x + B_i u; \quad (1)$$

$$y = C_i x + D_i u, \quad (1a)$$

где  $i$  – номер режима:  $i = 1, 2, \dots, N$  ( $N$  – общее число рассматриваемых режимов);  $y$  – выходной сигнал станции – сигнал обратной связи;  $u$  – входной сигнал регулятора.

Для случая управления демпфированием электроэнергетической системы сигналом обратной связи может служить угловая скорость генератора  $D\omega$  или отклонение активной мощности  $DP$  в линии передачи. Уравнения (1) и (1a) описывают многомодельную систему, в которой каждая модель соответствует одному режиму.

**Б. Двухэтапный подход с использованием ЛМН для многомодельной системы.** Цель решения задачи (1) и (1a) заключается в нахождении регулятора с обратной связью по выходу  $u(s) = K(s)y(s)$  для многомодельной системы, который локализует собственные значения всех линеаризованных моделей (1) и (1a) в заданной области. Регулятор с обратной связью по выходу предположительно может быть

построен с помощью двухэтапного подхода с использованием ЛМН:

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c u; u = Kx_c. \quad (2)$$

На первом этапе переменная  $K$  может быть определена путем нахождения регулятора с обратной связью по состоянию, удовлетворяющего всем целям расчета с помощью ЛМН. На втором этапе матричные переменные  $A_c$ ,  $B_c$  могут быть определены путем нахождения регулятора с обратной связью по выходу. При этом основной принцип заключается в том, что выходной сигнал регулятора с обратной связью по выходу должен быть сопоставим с выходным сигналом регулятора с обратной связью по состоянию, построенного на первом этапе. Этот двухэтапный подход решает проблему ограничения, существующего в подходе с ЛМН, основанном на базовой модели, который не может применяться для многомодельной системы.

Вывод уравнений двухэтапного подхода, основанного на ЛМН для многомодельной системы, приведен в приложении.

**Две стратегии управления.** Для применения двухэтапного подхода при расчете устройства демпфирования с FACTS существует две стратегии. Первая стратегия заключается в том, что один регулятор демпфирования определяется и используется для всех режимов. Вторая стратегия предполагает вместо использования одного регулятора демпфирования для всех режимов расчет и использование множества регуляторов демпфирования. Каждый из регуляторов демпфирования соответствует нескольким режимам.

Преимущество первой стратегии управления для многих режимов заключается в том, что можно определить только один регулятор демпфирования. Однако по мере возрастания числа рассматриваемых режимов растет и размерность двухэтапной задачи ЛМН. Следовательно, решить задачу управления для большой системы будет очень сложно, и нет гарантии, что решение будет найдено.

Считается, что регулятор демпфирования с FACTS обычно рассчитывается для разных режимов, которые соответствуют разным уровням нагрузки. Если все уровни нагрузки сгруппировать в сегменты нагрузки, каждый из которых покрывает несколько уровней нагрузки, тогда для каждого сегмента нагрузки можно рассчитать регулятор демпфирования с использованием двухэтапного подхода на основе ЛМН.

Преимущество второй стратегии управления заключается в том, что задача расчета с помощью ЛМН относительно небольшая и легкая для решения и соответствующие регуляторы демпфирования могут обеспечить более эффективное управле-

ние по сравнению с использованием первой стратегии управления. Парадигма управления для многомодельной системы, основанная на второй стратегии управления, показана на рис. 1, где регулятор демпфирования 1 запускается ограничением уровня нагрузки  $Pd_1^{\min} \leq Pd_1 \leq Pd_1^{\max}$  через систему SCADA/EMS, в то время как другие регуляторы демпфирования отключены.

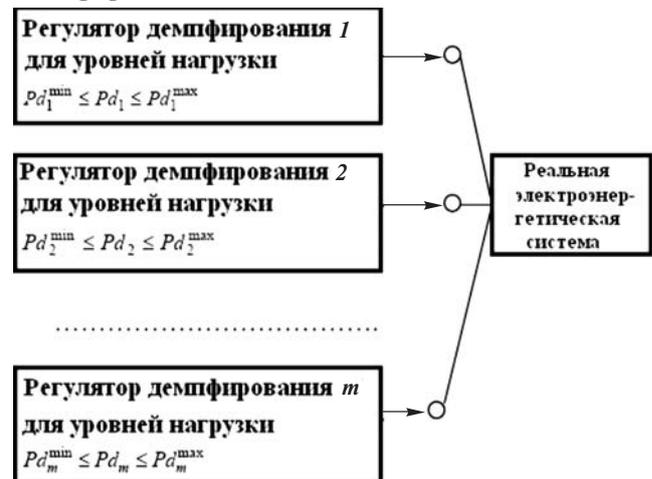


Рис. 1. Структурная схема второй стратегии регулирования

**Моделирование компенсаторов STATCOM в многомашинной системе.** А. Тестовая система с четырьмя машинами, состоящая из двух подсистем. Эта система (без статического компенсатора) (рис. 2) была специально разработана для исследования низкочастотных электромеханических колебаний в большой объединенной системе [16]. Она была изменена, чтобы включить устройства FACTS для исследования улучшения демпфирования межсистемной моды колебаний. Модель системы была создана в качестве демонстрационной для системного стабилизатора в модуле SimPowerSystems Matlab/Simulink. В данном исследовании в демонстрационной версии Matlab добавлен один компенсатор STATCOM в узле 7 (см. рис. 2).

Конденсаторы, установленные в узлах 7 и 8, вместе со статическим компенсатором должны поддерживать уровень напряжения нагрузки близким к 1 отн. ед. Два системных стабилизатора, установленные на генераторах 2 и 4, удалены. Ком-

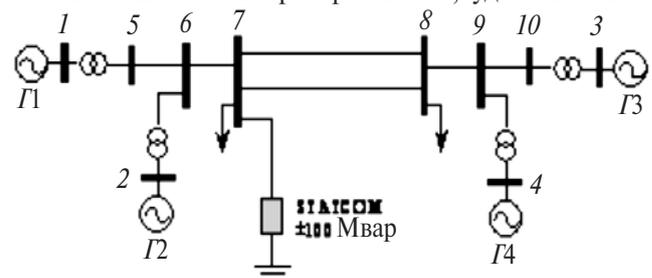


Рис. 2. Схема тестовой системы

пенсатор STATCOM используется для улучшения демпфирования межсистемных мод колебаний вместе с двумя другими стабилизаторами на генераторах 1 и 3.

**Б. Моделирование статического компенсатора.** Регулирование внутренней развязки  $d-q$  компенсатора STATCOM рассматривается с точки зрения стратегии регулирования напряжения с помощью ШИМ [17]. Выходной сигнал регулятора демпфирования прибавляется к эталонному значению регулирования узлового напряжения.

Локальные сигналы, которые несут ценную информацию о межсистемной моде колебаний, могут рассматриваться как входные сигналы для устройств демпфирования со статическим компенсатором. В статье поток активной мощности линии 6–7 (рис. 2) выбирается в качестве входного сигнала для статического компенсатора, установленного в узле 7. Моделирование других компонентов электроэнергетической системы для разработки устройства демпфирования рассматривалось в [18–20].

**Результаты расчета. А. Сравнение эффективности управления с использованием двух стратегий управления.** Изменяя переток активной мощности из 1-й подсистемы во 2-ю, можно получить большое число эксплуатационных режимов. В проводимом исследовании рассматриваются четыре разных уровня передаваемой мощности (100, 200, 300 и 400 МВт).

При использовании первой стратегии управления все четыре режима (уровня нагрузки) анализируются одновременно, рассчитывается один регулятор демпфирования с помощью компенсатора STATCOM на базе двухэтапного подхода с использованием ЛМН в виде:

$$K(s) = \frac{0,004(s + 45242)(s + 73,75)}{(s^2 + 8895s + 215735)} \cdot \frac{(s^2 + 1,10s + 47,92)(s + 0,23)}{(s^2 + 1,69s + 48,31)(s + 0,29)} \quad \text{®}$$

При второй стратегии управления уровни нагрузки делятся на две группы. Уровни 100 и 200 МВт относятся к 1-й группе, а уровни нагрузки 300 и 400 МВт – ко 2-й группе. Регулятор, основанный на уровнях 1-й группы, имеет

$$K(s) = \frac{0,0012(s + 171660)(s + 57,35)}{(s + 933,28)(s + 145,76)} \cdot \frac{(s^2 + 2,99s + 47,78)(s + 0,68)}{(s^2 + 3,89s + 57,74)(s + 2,05)} \quad \text{®}$$

а для уровней 2-й группы

$$K(s) = \frac{0,0013(s + 15781)(s + 33,64)}{(s^2 + 437,5s + 66959)} \quad \text{®}$$

$$\text{®} \frac{(s^2 + 2,77s + 71,06)(s + 0,25)}{(s^2 + 1,85s + 72,40)(s + 0,62)}$$

В данном исследовании переток активной мощности по линии 6–7 выбирается в качестве входного сигнала. Область размещения полюсов выбирается в качестве сектора  $z > 0,1$ . Возмущения создаются ступенчатыми изменениями в опорном входном сигнале по напряжению на генераторе 2.

Результаты нелинейного имитационного моделирования приведены на рис. 3, из которого следует, что расчет многомодельной системы, основанный на 2-й стратегии, более эффективен для управления системой.

**Б. Влияние задержки в передаче управляющих сигналов.** С внедрением WAMS становится возможным комплексное управление электроэнергетическими системами. Для этого необходимо оценить влияние задержки в передаче управляющих сигналов на эффективность управления FACTS на основе дополнительных исследований. Из результатов испытаний, представленных на рис. 4, видно, что при задержке передачи сигнала на 10 мс эффективность управления FACTS сопоставима с эффективностью без задержки передачи.

**Приложение.** Разработка двухэтапного подхода ЛМН представлена в следующем виде [15].

**А. Первый этап: определение матричной переменной К.** Рассмотрим линейную инвариантную во времени систему (1). Регулятор с обратной связью по состоянию можно представить в виде

$$u = Kx. \quad \text{(П-1)}$$

Соответствующая замкнутая система с регулятором (1) имеет вид

$$\dot{x} = A_{cl,i}x \quad \text{(П-2)}$$

при  $A_{cl,i} = (A_i + B_iK)$  и  $i = 1, 2, \dots, N$ .

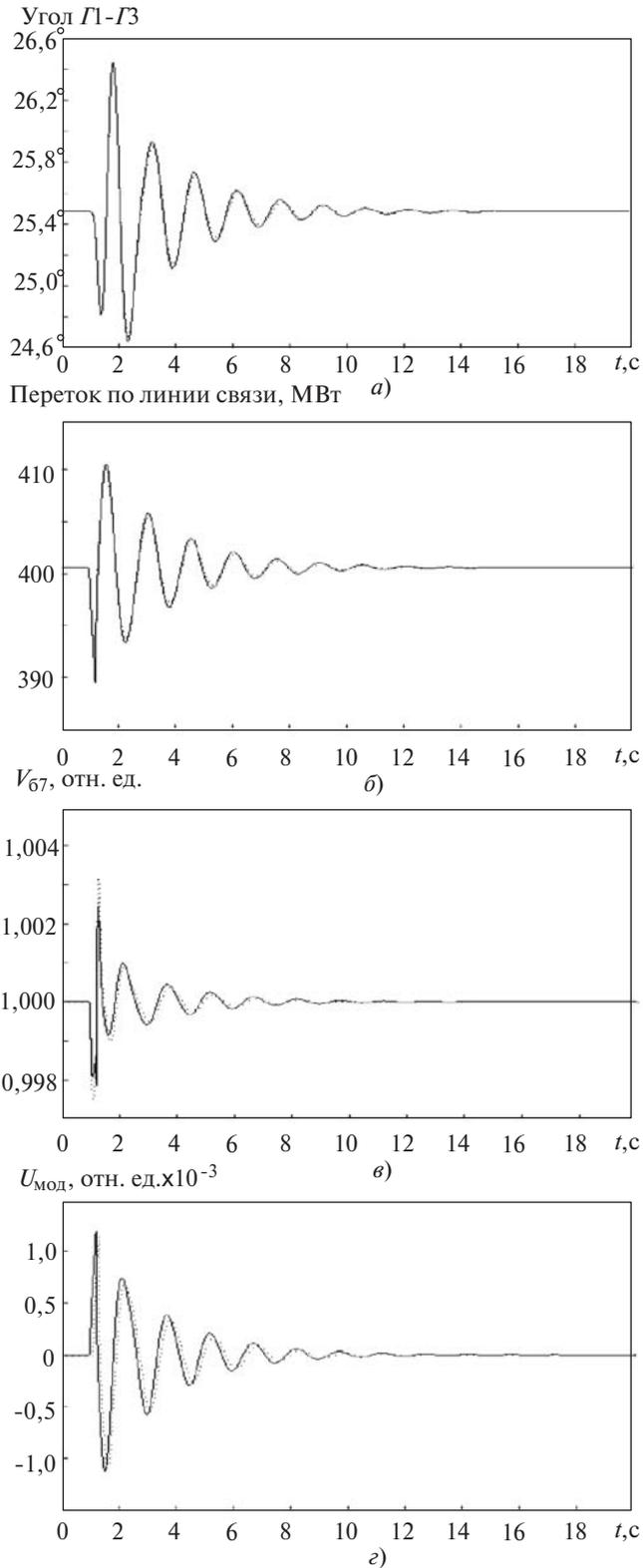
Область линейных матричных неравенств определяется по выражению, приведенному в [10]:

$$D = \{z \in \mathbb{C} : f_D(z) = a + zb + \bar{z}b^T < 0\}. \quad \text{(П-3)}$$

Семейство матриц  $A_{cl,i}$  в (П-2) является  $D$ -устойчивым, т.е. все собственные значения каждой матрицы находятся в области  $D$  линейных матричных неравенств, если существует такая симметричная положительная матрица  $P$ , что

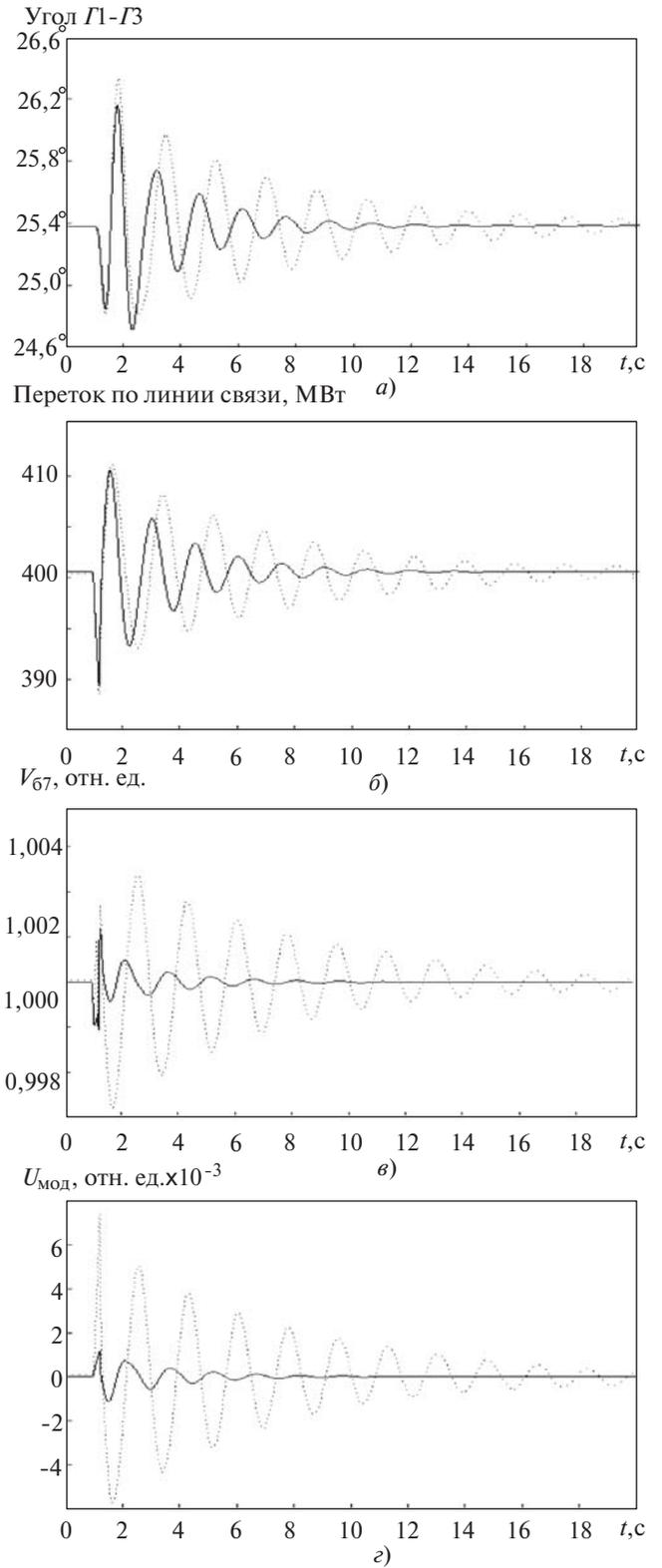
$$M_D(A_{cl,i}, P) = a \ddot{A} P + b \ddot{A} (A_{cl,i}, P) + b^T \ddot{A} (P A_{cl,i}^T) = a \ddot{A} P + b \ddot{A} [(A_i + B_iK)P] + b^T \ddot{A} [P(A_i + B_iK)^T] < 0, \quad \text{(П-4)}$$

где  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $\ddot{A}$  – кронекерово произведение матриц.



**Рис. 3.** Результаты испытаний в четырехмашинной системе, состоящей из двух подсистем с компенсатором STATCOM: — управление демпфированием, основанное на 1-й стратегии управления; - - - - - то же на 2-й стратегии

Матричные неравенства (П-3) нелинейны в терминах матричных переменных  $K$  и  $P$  вследствие наличия члена  $KP$  и его транспозиции  $PK^T$ . Уравнение (П-3) состоит из нелинейных матричных нера-



**Рис. 4.** Результаты испытаний в четырехмашинной системе, состоящей из двух подсистем при управлении демпфированием с помощью компенсатора STATCOM: — без задержки передачи управляющих сигналов; - - - - - с задержкой 100 мс

венств и не может быть решено с использованием выпуклых алгоритмов для задач линейных матричных неравенств. Для этой цели вводятся следующие изменения в переменных:  $X = P$ ;  $Y = KP$ .

Нелинейные матричные неравенства (П-4) можно преобразовать в следующие линейные матричные неравенства относительно новых матричных переменных  $X, Y$ :

$$M_D(A_{cl,i}, P) = a \ddot{A} P + b \ddot{A} [(A_i + B_i K)P] + b^T \ddot{A} [P(A_i + B_i K)^T] < 0; \tag{П-5}$$

$$a \ddot{A} X + b \ddot{A} (A_i X + B_i Y) + b^T \ddot{A} (A_i X + B_i Y)^T < 0.$$

Таким образом, линейные матричные неравенства для многомодельной системы (1) с регулятором с обратной связью по состоянию  $u = Kx$  с учетом кластеризации полюсов замкнутой системы в искомой области линейных матричных неравенств можно представить в следующем виде:

$$a \ddot{A} X + b \ddot{A} (A_i X + B_i Y) + b^T \ddot{A} (A_i X + B_i Y)^T < 0, \tag{П-6}$$

$$X > 0,$$

где  $i = 1, 2, \dots, N$ .

Задачу линейных матричных неравенств, описанных с помощью (П-6), можно решить посредством матричных переменных  $X$  и  $Y$ , используя методы выпуклой оптимизации. Соответствующий оптимальный коэффициент усиления регулятора с обратной связью по состоянию задается уравнением

$$K = Y^* (X^*)^{-1} \tag{П-7}$$

с оптимальным решением линейных матричных неравенств  $X^*, Y^*$ .

На первом этапе для многомодельной системы можно найти полный регулятор с обратной связью, удовлетворяющий целям расчетов. Этот метод управления с обратной связью по состоянию позволяет преодолеть ограниченность регулятора с обратной связью по выходу, что приводит к ограничениям по нелинейным матричным неравенствам для многомодельной системы. Здесь необходимо упомянуть, что расчет регулятора с обратной связью по состоянию, основанный на линейных матричных неравенствах, позволяет рассматривать многоцелевой расчет.

**Б. Второй этап: определение матричных переменных  $A_c$  и  $B_c$ .** Допустим, что полный регулятор с обратной связью определен на первом этапе для многомодельной системы (1) без учета сигнала обратной связи  $y$ . На данном этапе задача определения матричных переменных  $A_c$  и  $B_c$  становится задачей нахождения динамического регулятора с обратной связью по выходу для замены регулятора с обратной связью по состоянию, чтобы характеристики

замкнутой системы для обоих регуляторов были сопоставимы или эквивалентны друг другу.

Многомодельную систему можно представить в виде (1). Полный регулятор с обратной связью по состоянию, удовлетворяющий целям расчетов, определяется для многомодельной системы на первом этапе в виде (П-1).

Задача заключается в нахождении регулятора с обратной связью по выходу  $u(s) = K(s)y(s)$ , который может заменить (П-1). Форма пространства состояний регулятора с обратной связью по выходу может быть представлена в виде (2).

Соответствующие уравнения пространства состояний замкнутой системы с регулятором с обратной связью по выходу будут:

$$\dot{x}_{cl} = A_{cl,i} x_{cl}, \tag{П-8}$$

где  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $x_{cl}^T = [x^T, x_c^T]$  и

$$A_{cl,i} = \begin{bmatrix} A_i & B_i K & \ddot{0} \\ B_c C_i & A_c + B_c D_i K & \ddot{0} \end{bmatrix} \tag{П-9}$$

Регулятор с обратной связью по выходу (П-8) может быть идентичным или сопоставимым с регулятором с обратной связью по состоянию (2), если  $x_c \otimes x$  при  $t \otimes \forall$ , т.е.

$$\tilde{x} = x - x_c \otimes 0, t \otimes \forall.$$

С учетом приведенной выше концепции изменение вектора состояния вводится следующим образом:

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \tilde{x} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x_c \end{bmatrix} \tag{П-10}$$

где  $T = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix}$

Замкнутая система относительно преобразованная базиса заменяется на

$$\dot{\tilde{x}} = \bar{A}_{cl,i} \tilde{x}, \tag{П-11}$$

где  $\bar{A}_{cl,i} = T A_{cl,i} T^{-1} =$

$$= \begin{bmatrix} A_i + B_i K & -B_i K \\ A_i + B_i F - B_c(C_i + D_i K) - A_c & A_c + B_c D_i K - B_i K \end{bmatrix} \tag{П-12}$$

$i = 1, 2, \dots, N$ .

Динамическая система (П-11) эквивалентна замкнутой системе (П-9). Блок  $A_i + B_i K$  в (П-12) определяет динамику состояний системы, если связующие члены выражения не учитываются. Свойства устойчивости  $A_i + B_i K$  обеспечивались расчетами на первом этапе, что также гарантирует расположение собственных значений в заданной

области. Матричные переменные регулятора  $A_c, B_c$  определяются так, чтобы вся система (П-11) удовлетворяла всем целям расчетов.

Здесь целью является размещение полюсов. Для подхода, основанного на линейных матричных неравенствах, все собственные значения матрицы замкнутой системы (П-12) находятся в области  $D$  линейных матричных неравенств, определяемой в (П-3), если и только если существует симметричная положительная матрица  $P$ , такая, что

$$M_D(A_{cl,i}, P) = a \ddot{A} P + b \ddot{A} (PA_{cl,i}) + b \ddot{A} (\bar{A}_{cl,i}, P) < 0, \quad (\text{П-13})$$

где  $i = 1, 2, \dots, N$ ;

$$\bar{P}A_{cl,i} = \begin{pmatrix} \dot{e} & A_i + B_i K & -B_i K & \dot{u} \\ \dot{e} & A_i + B_i F - B_c(C_i + D_i K) - A_c & A_c + B_c D_i K - B_i K & \dot{u} \end{pmatrix} \quad (\text{П-14})$$

Исходя из (П-14),  $\bar{P}A_{cl,i}$  и его транспозиция нелинейны по отношению к переменным  $P, A_c$  и  $B_c$ . Что касается нелинейных членов, выбирается матрица Ляпунова с блочно-диагональной структурой:

$$P = \begin{pmatrix} \dot{e} X & 0 \\ \dot{e} & Y \dot{u} \end{pmatrix} \quad (\text{П-15})$$

где  $X > 0$  и  $X = X^T$ ;  $Y > 0$  и  $Y = Y^T$ .

Заменив матрицы  $P$  в (П-14) на (П-15), получаем:

$$\bar{P}A_{cl,i} = \begin{pmatrix} \dot{e} & X(A_i + B_i K) & -XB_i K & \dot{u} \\ \dot{e} & Y(A_i + B_i K) - YB_c(C_i + D_i K) - YA_c & YA_c + YB_c D_i K - YB_i K & \dot{u} \end{pmatrix} \quad (\text{П-16})$$

Затем вводим изменения в переменных:  $Z = YA_c$  и  $G = YB_c$ . С учетом новых матричных переменных  $X, Y, Z$  и  $G$  (П-16) представляет собой линейные неравенства. Здесь параметризация регулятора неявно зависит от матриц пространства состояний  $A_i, B_i, C_i$  и  $D_i$  системы. Таким образом, ее можно использовать для расчета регулятора с обратной связью по выходу для многомодельных систем при политопной неопределенности.

Линейные матричные неравенства для многомодельной системы (1) с кластеризацией всех полюсов замкнутой системы в искомой области линейных матричных неравенств формулируются следующим образом:

$$\begin{aligned} & a \ddot{A} \begin{pmatrix} \dot{e} X & 0 \\ \dot{e} & Y \dot{u} \end{pmatrix} \\ & + b \ddot{A} \begin{pmatrix} \dot{e} & X(A_i + B_i K) & -XB_i K & \dot{u} \\ \dot{e} & Y(A_i + B_i K) - G(C_i + D_i K) - Z & Z + GD_i K - YB_i K & \dot{u} \end{pmatrix} \\ & + b \ddot{A} \begin{pmatrix} \dot{e} (A_i + B_i K)^T X & (A_i + B_i K)^T Y - (C_i + D_i K)^T G^T - Z^T & \dot{u} \\ \dot{e} & - (B_i K)^T X & Z^T + (D_i K)^T G^T - (B_i K)^T Y & \dot{u} \end{pmatrix} < 0, \end{aligned}$$

(П-17)

 $X > 0; Y > 0,$ 

где  $i = 1, 2, \dots, L$ ;  $X = X^T$ ;  $Y = Y^T$ .

Обозначив оптимальное решение через  $X^*, Y^*, Z^*, G^*$ , соответствующие матрицы регулятора с обратной связью по выходу (2) задаются выражениями:

$$A_c = (Y^*)^{-1} Z; B_c = (Y^*)^{-1} G.$$

**Вывод.** Новый подход к управлению демпфированием с помощью FACTS при большом числе эксплуатационных режимов является фактически задачей расчета оптимальных регуляторов с обратной связью по выходу для многомодельной системы, требования по управлению которой можно описать нелинейными матричными неравенствами. Расчетный подход позволяет перевести первоначальные НМН в линейные матричные неравенства посредством соответствующих параметризации и преобразования. Они применимы для расчета регулирования демпфирования с помощью FACTS, обеспечивающих удовлетворительную эффективность не для одного режима, а для широкого диапазона эксплуатационных режимов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arabi S., Hamadanizaden H., Fardanesh B. Convertible static compensator performance studies on the NY State transmission system. – IEEE Trans. on Power Systems, 2002, vol. 17, № 3.
2. Larsen E.V., Sanchez-Gasca J.J., Chow J.H. Concept for design of FACTS controllers to damp power swings. – IEEE Trans. on Power Systems, 1995, vol. 10, № 2.
3. Pourbeik P., Gibbard M.J. Damping and synchronizing torques induced on generators by FACTS stabilizers in multi-machine power systems. – IEEE Trans. on Power Systems, 1996, vol. 11, №4.
4. Pal B.C., Coonick A. H., Jaimoukha I.M., El-Zobaidi H. A Linear Matrix Inequality approach to robust damping control design in power systems with superconducting magnetic energy storage device. – IEEE Trans. on Power Systems, 2000, vol. 15, №1.
5. Pal B.C. Robust damping of interarea oscillations with unified power-flow controller. – IEE Proc. «Gener. Transm. Distrib.», 2002, vol. 149, №6.
6. Farsangi M.M., Song Y.H., Tan M. Multiobjective design of damping controllers of FACTS devices via mixed  $H_2/H_\infty$  with regional pole placement. – Int. J. Electr. Power Energy Syst., 2003, vol. 25, №5.
7. Boyd S., Ghaoui L. E., Feron E., Balakrishnan V. Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory. – Philadelphia: SIAM, 1994.
8. Khargonekar P.P., Rotea M.A. Mixed  $H_2/H_\infty$  control: a convex optimization approach. – IEEE Trans. on Automatic Control, 1991, vol. 36, №7.
9. Iwasaki T., Skelton R. All controllers for the general  $H_\infty$  control problem: LMI existence conditions and state-space formulas. – Automatica, 1994, vol. 30, №8.
10. Chilali M., Gahinet P.H. design with pole placement constraints: an LMI approach. – IEEE Trans. on Automatic Control, 1996, vol. 41, №3.

11. **Scherer C., Gahinet P., Chilali M.** Multiobjective output-feedback control via LMI optimization. – IEEE Trans. on Automatic Control, 1997, vol. 42, №7.
12. **Gahinet P., Nemirovski A., Laub A.J., Chilali M.** LMI Control Toolbox User's Guide. – The Math Works, Inc., 1995.
13. **Vanantwerp J.G., Braatz R.D.** A tutorial on linear and bilinear matrix inequalities. – Journal of Process Control, 2000, vol. 10, №4.
14. **Kanev S., Scherer C., Verhaegen M., De Schutter B.** Robust output-feedback controller design via local BMI optimization. – Automatica, 2004, vol. 40, №7.
15. **Xue C.-F.** Modelling and Control of Flexible AC Transmission Systems: PhD Thesis. – School of Engineering, University of Warwick, UK, December, 2005.
16. **SimPowerSystems** MATLAB SIMULINK: Release 14. – The Math Works Inc., 2005.
17. **Schauder C., Mehta H.** Vector analysis and control of advanced static VAR compensators. – IEE Proc. «Gener. Transm. Distrib.», 1993, vol. 140, № 4.
18. **Kundur P.** Power System Stability and Control. – New York: McGraw-Hill, 1994.
19. **Sauer P.W., Pai M.A.** Power System Dynamics and Stability. – New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1998.
20. **Klein M., Roger G.J., Kundur P.A.** Fundamental Study of Inter-area Oscillations in Power Systems. – IEEE Trans. on Power Systems, 1991, vol. 6, № 3.

*А в т о р : Сяо-Пин Чжан получил степень доктора философии в области электротехники в Юго-Восточном университете (Китай) в 1993 г. Старший преподаватель в Уорикском университете (Англия)*