

## Ресурсы стабилизации напряжения синхронного генератора APB сильного действия<sup>1</sup>

Д.В. Армеев, А.В. Чехонадских, Г.Б. Нестеренко  
ФГБОУВО «Новосибирский государственный технический университет»  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
E-mail: alchekh@ngs.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Распространение в энергетике новых типов генерирующих и распределительных систем, с одной стороны, и расширение технических возможностей регулирования с помощью устройств силовой электроники, с другой, стимулируют синтез алгоритмов управления, которые обеспечивали бы устойчивую работу электрогенератора в локальной сети с учетом ее особенностей и ограничений. Оптимальные настройки APB, реализующего ПИД или ПДД<sub>2</sub>-управление, остаются актуальным направлением теории регулирования. Наряду с этим синтез систем, оптимальных по степени устойчивости при числе настраиваемых параметров более трех, остается малоизученным в связи с крайней сложностью возникающих оптимизационных проблем.

**Материалы и методы:** Нелинейная модель синхронного генератора с APB, реализующим ПИДД<sub>2</sub>-управление, построена в Matlab (Simulink) и линеаризована относительно действующих значений установившегося режима. Оптимальные по степени устойчивости расположения полюсов линейной САУ найдены алгебраическими средствами с помощью анализа критических корневых диаграмм, что позволяет определять оптимальные и субоптимальные расположения без ненадежных и обременительных численных процедур. Контроль переходных процессов и качественная оценка подавления типичного возмущения проводились в нелинейной модели.

**Результаты:** Для четырехпараметрической ПИДД<sub>2</sub>-системы найдено экстремальное расположение полюсов с практически неограниченной степенью устойчивости, что достигается при чрезмерных значениях параметров регулирования. При фиксации интегрального либо пропорционального коэффициентов управления оптимизацией по трем параметрам получено удовлетворительное время подавления возмущения при отсутствии перерегулирования.

**Выводы:** настройка ПИДД<sub>2</sub>-управления позволяет достигать практически любой степени устойчивости линеаризованной модели генератора с APB за счет соответствующего увеличения коэффициентов регулирования. Целесообразным оказывается поиск оптимального регулятора с заданием приемлемого значения одного из коэффициентов. Это открывает перспективу стабилизации этим же методом двух- и трехмашинных систем APB сильного действия в локальных сетях электроснабжения.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, стабилизация напряжения, установившийся режим, статическая устойчивость, полиномиальный синтез, ПИДД<sub>2</sub>-управление, оптимальное расположение полюсов, критические корневые диаграммы.

## Resources of voltage stabilization of a synchronous generator by a multiparametric excitation controller

D.V. Armeyev, A.V. Chekhonadskikh, G.B. Nesterenko  
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation  
E-mail: alchekh@ngs.ru

### Abstract

**Background:** The wider use of new types of generation and distribution systems in the power industry, on the one hand, and the expansion of technical control options thanks to power electronics devices, on the other hand, stimulate the design of control algorithms which ensure stable operation of power generators in local networks with their specific conditions and limitations. The optimal settings of an automatic excitation controller, implementing PID or PDD<sub>2</sub> control, remain the topical area of control theory. However, the problem of designing control systems of optimal stability with more than three control parameters is not studied well yet due to the extreme complexity of optimization problems.

**Materials and methods:** The nonlinear model of a synchronous generator with an automatic excitation controller, implementing PIDD<sub>2</sub> control, was constructed in Matlab (Simulink) and linearized relative to the current values of the steady-state mode. The pole locations of the linear automatic control system ensuring the optimal stability were found algebraically by analyzing critical root diagrams, which allowed finding the optimal and suboptimal pole locations without

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию № 2014/138, проект 1052.

unreliable and cumbersome numerical procedures. Transient control and qualitative estimation of typical perturbation suppression were carried out in the non-linear model.

**Results:** Extreme pole locations have been found for a four-parameter PIDD<sub>2</sub> system with almost unlimited relative stability, which is achieved by setting excessive control parameter values. By fixing the proportional or the integral coefficient of optimization control by three control parameters the authors managed to achieve a satisfactory time of disturbance suppression without overshooting.

**Conclusions:** PIDD<sub>2</sub>-control setting enables reaching practically any stability degree of the linearized model of the generator with an automatic excitation controller through an appropriate control coefficient increase. It seems expedient to search for the optimal regulator by setting an acceptable value of one of the coefficients. This approach may be promising for stabilizing by the same method two- and three-generator systems with a multiparameter excitation controller in local power supply networks.

**Key words:** synchronous generator, voltage regulation, steady state mode, static stability, polynomial design, PIDD<sub>2</sub> control, optimal pole location, critical root diagrams.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2017.1.024-032

**Состояние вопроса.** Одна из важнейших задач в производстве, передаче и распределении электроэнергии – поддержание заданного напряжения в узлах энергосистемы. Требования к уровню напряжения в сетях задаются, с одной стороны, условиями эксплуатации электрооборудования, а с другой – спецификой синхронной параллельной работы синхронных машин, в частности генераторов. Параллельная работа электроэнергетических систем, как правило, рассматривается в аспектах статической устойчивости нормального режима (способности системы возвращаться к исходному или близкому к нему режиму после малых возмущений) и динамической устойчивости (восстановление параметров режима после значительных возмущений, вызванных, в первую очередь, авариями, короткими замыканиями и т.п. [1]).

Каждый из современных силовых синхронных генераторов оснащается автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ) сильного действия, действие которых необходимо и в нормальных, и в аварийных режимах. Их настройка находится в ведении специалистов ОАО «Системный оператор ЕЭС» и в сложившихся условиях не составляет трудной задачи<sup>2</sup>.

Однако общемировая тенденция в энергетике включает совершенствование электроэнергетических систем на основе инновационных технологий, среди которых «умные» сети типа SmartGrid или близкие к ним интеллектуальные электроэнергетические системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС), гибкие линии электропередачи (FACTS), широкомасштабные системы векторных измерений (WAMS) и близкие по смыслу системы мониторинга переходных режимов (СМПР), сети распределенной генерации, включающие нетрадиционные источники энергии, современные гибридные накопители энергии и др. [2, 3].

Такое обилие новых технологий и техники качественно меняет поведение энергосистем, что особенно проявляется в сетях типа SmartGrid

с большим количеством и разнообразием источников электроэнергии. В этих условиях стандартные структуры регуляторов и способы их настройки оказываются недостаточными [2, 4, 5].

Мы рассматриваем задачу, связанную с регулированием напряжения в нормальном режиме и влиянием АРВ сильного действия на статическую устойчивость. Следует подчеркнуть, что традиционная для энергетики задача настройки АРВ с точки зрения теории регулирования осложняется тем, что АРВ воздействует на напряжение, а устойчивость энергосистемы контролируется, прежде всего, по углу электропередачи.

Основная функция АРВ в нормальном режиме – поддерживать напряжение на выводах генератора (или сборных шинах станции) с помощью регулирования напряжения возбуждения, в результате чего должны изменяться ток возбуждения, поле ротора машины, ЭДС и, в конечном итоге, регулируемое напряжение.

Входной величиной регулятора является отклонение напряжения от некоторого заданного значения (напряжения уставки  $U_y$ ). Критически важным для статической устойчивости оказывается эволюция другого параметра – взаимного угла  $\delta$  ротора генератора относительно вектора напряжения электрической системы  $U_C$ , причем электромагнитный процесс в обмотке возбуждения описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка относительно угла  $\delta$ .

В зависимости от системы возбуждения классифицируют АРВ двух типов. При электромагнитном возбуждении используется регулятор пропорционального действия (ПД), что обычно обусловлено ограниченными ресурсами исполнительного устройства. При получении тока возбуждения с помощью силовой электроники применяется регулятор сильного действия (СД), в алгоритм которого включаются также производные отклонения напряжения и накопленное отклонение, т.е. интеграл, и др. [1].

Задача синтеза АРВ в последнем варианте сводится к выбору коэффициентов усиления при измеряемом отклонении напряжения и его производных в целях возможно быстрой стабилизации напряжения генератора  $U_T$  при сохранении устойчивости по углу  $\delta$  [1, 6].

<sup>2</sup> См.: Стандарт организации «Требования к системам возбуждения и автоматическим регуляторам возбуждения сильно-го действия синхронных генераторов». – М.: ОАО «СО ЕЭС», 2012. [http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO\\_ES\\_AER\\_SA.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO_ES_AER_SA.pdf)

**Материалы и методы.** Общеизвестным подходом к нахождению коэффициентов регулятора системы автоматического управления (САУ) является линеаризация дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы, чтобы иметь возможность применения хорошо разработанной теории линейных систем и, в частности, перехода в частотную область. В этом случае основные критерии устойчивости связаны с расположением полюсов САУ в левой комплексной полуплоскости, что обеспечивает статическую устойчивость системы, а возможно и большой сдвиг полюсов влево – лучшее время подавления возмущения. Для нахождения области в пространстве параметров, которая соответствует устойчивым значениям полюсов, используются различные приемы – от классического метода D-разбиения [7, 8] до современной теории робастных систем [7–10].

Однако метод D-разбиения эффективен для регуляторов с одним или двумя параметрами, а синтез трехпараметрических ПИД-регуляторов остается актуальным направлением ТАУ [10]. Настройка ПДД<sub>2</sub>-регуляторов, традиционно используемых в АРВ СД, осуществляется, главным образом, на основе методов с квадратичным функционалом качества, в ряде случаев приводящих итерационный процесс на границу устойчивости, либо эмпирически, что не гарантирует оптимальности. При синтезе электромеханических устройств, удовлетворяющих сложным критериям качества управления с применением наблюдателей, возникают разнообразные проблемы, новые подходы к решению которых предлагаются в [11]. Этим и рядом других факторов определяется практическая значимость создания новых подходов к настройке систем управления электрических машин и, в частности, АРВ.

Синтез оптимального четырехпараметрического ПИДД<sub>2</sub>-регулятора осуществлен нами с помощью линеаризованной модели генератора в относительных единицах. Выбор действующих значений установившегося режима и переходных процессов замкнутой САУ проводился с помощью нелинейной модели, созданной стандартными средствами Matlab (Simulink). Для нахождения оптимальных по степени устойчивости замкнутой системы значений параметров используется метод оптимизации расположения полюсов САУ [12–14]. Это отличает метод, использованный нами от подхода [15], где оптимизация настроек ПДД<sub>2</sub>-регулятора возбуждения синхронного генератора решалась методом конечного градиента.

**Уравнения генератора и его устойчивость в установившемся режиме.** Основное уравнение, связывающее генератор и источник энергии мощностью  $P_T$ , выглядит следующим образом [1]:

$$\frac{d^2}{dt^2} \delta = \frac{18000}{T_j} (P_T - P_G). \quad (1)$$

При этом в самом генераторе активная и реактивная составляющие мощности связаны нелинейными уравнениями с напряжением возбуждения  $E_q$  и углом электропередачи  $\delta$ :

$$P_G = E_q^2 Y_{11} \sin \alpha_{11} + E_q U_c Y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}); \quad (2)$$

$$Q_G = E_q^2 Y_{11} \cos \alpha_{11} + E_q U_c Y_{12} \cos(\delta - \alpha_{12}).$$

Связи напряжений (см. ниже) в обмотке возбуждения выражаются уравнениями:

$$E_q = \frac{E'_q - (x_d - x'_d) U_c Y_{12} \cos(\delta - \alpha_{12})}{1 - (x_d - x'_d) Y_{11} \cos \alpha_{11}}; \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} E'_q = \frac{1}{T_{d0}} (E_{qe} - E_q).$$

Наконец, связь напряжения генератора с активной и реактивной составляющими мощности выражается соотношением

$$U_G = U_c^{-1} \sqrt{(U_c^2 + Q_G x_{in})^2 + (P_G x_{in})^2}. \quad (4)$$

Значения параметров объекта в относительных единицах (о.е.) были приняты следующими (см. [16]):

- мощность первичного источника (например, турбины)  $P_T = 0,5$  о.е.;
- постоянная механической инерции  $T_j = 1,703$  с;
- собственная и взаимная проводимости ветвей генератора  $Y_{11} = Y_{12} = 0,4$  о.е.;
- дополняющие фазные углы сопротивления  $\alpha_{11} = \alpha_{12} = 0$ ;
- напряжение системы  $U_c = 1$  о.е.;
- постоянная времени обмотки возбуждения при разомкнутой обмотке статора  $T_{d0} = 5$  с;
- синхронное и переходное реактивное сопротивление по продольной оси  $x_d = 2,3$  о.е.,  $x'_d = 0,329$  о.е. соответственно;
- внешнее сопротивление  $x_{in} = 0,2$  о.е.

Нелинейная модель такого объекта была построена в пакете Matlab (Simulink). Рассчитанный при этих значениях установившийся режим разомкнутой системы (т.е. неуправляемого генератора) характеризуется следующими действующими значениями переменных:

- угол электропередачи  $\delta \approx 34,64^\circ$ ;
- активная мощность генератора  $P_G = 0,5$  о.е.;
- реактивная мощность генератора  $Q_G \approx 1,212$  о.е.;
- напряжение генератора  $U_G \approx 1,246$  о.е.;
- ЭДС холостого хода (напряжение возбуждения) и вынужденная ЭДС  $E_q = E_{qe} \approx 2,2$  о.е.;
- переходная ЭДС  $E'_q \approx 1,114$  о.е.

Если одна из двух параллельных линий, связывающих генератор с энергосистемой, отключается, возникает типичный ступенчатый скачок напряжения  $\Delta U_G \approx +0,04$  о.е., который вводился в нелинейную модель в качестве возмущения. При подаче такого возмущения модель демонстрирует умеренную устойчивость по всем режимным переменным: время стабилизации

переходных процессов по напряжению  $U_T$  и углу  $\delta$  около 18 с; но она не обладает астатизмом, так как напряжение устанавливается на значении  $U_T \approx 1,357$  о.е.

Стандартная процедура стабилизации ПД-регулятора (при  $K_i = K_2 = 0$ ) для нелинейной модели приводит к вполне удовлетворительной скорости стабилизации – время окончания переходных процессов чуть более 1 с, правда, при сохраняющейся статической ошибке:  $U_T \approx 1,253$  о.е. (вместо  $U_T \approx 1,246$  о.е.).

Ручная настройка ПИД-регулятора (в нашем случае при  $K_2 = 0$ ) может привести, например, к таким значениям параметров управления:  $K_i \approx 31,58$ ;  $K_p \approx 26,94$ ;  $K_1 \approx -4,13$ ; они обеспечивают астатизм системы и удовлетворительную скорость стабилизации (время завершения переходных процессов около 2,5 с); однако при этом возникает значительное перерегулирование (overshoot): возмущающий скачок  $\Delta U_T \approx +0,04$  продолжается в начальной фазе процесса 0,0 – 0,2 с дальнейшим его нарастанием до  $\Delta U_T \approx +0,065$ .

**Линеаризованная модель генератора и передаточная функция замкнутой системы.** Уравнения генератора (1)–(4), линеаризованные относительно значений установившегося режима, в операторной форме принимают вид:

$$s^2 \Delta \delta = -10569,6 \Delta P_T; \quad (5)$$

$$\Delta P_T = 0,2274 \Delta E_q + 0,7240 \Delta \delta; \quad (6)$$

$$\Delta Q_T = 1,4390 \Delta E_q + 0,5252 \Delta \delta; \quad (7)$$

$$\Delta E_q = 4,7259 \Delta E'_q + 2,1179 \Delta \delta; \quad (7)$$

$$s \Delta E'_q = 0,2 (\Delta E_{qe} - \Delta E_q); \quad (7)$$

$$1,246 \Delta U_T = 0,2485 \Delta Q_T + 0,02 \Delta P_T. \quad (8)$$

Исключая из (5)–(8) все переменные и выражая контролируемую переменную  $\Delta U_T$  через контролирующее воздействие  $\Delta E_{qe}$ , получаем передаточное соотношение генератора (plant):

$$\Delta U_T = \frac{N_{pl}(s)}{D_{pl}(s)} \Delta E_{qe} = \frac{2(1,4288 s^2 + 9559,2585) \Delta E_{qe}}{10,4029 s^3 + 9,8326 s^2 + 1,32555 s + 75243,968}.$$

Поскольку корни знаменателя попадают в правую полуплоскость, такой объект оказывается неустойчив к возмущениям в канале возбуждения; это не противоречит отмеченной выше устойчивости нерегулируемого генератора к возмущению на выводах. Техническое содержание и возможные причины подобной неустойчивости рассмотрены в [17, 18].

Для реализации АРВ сильного действия отрицательная обратная связь замыкается ПИДД<sub>2</sub>-регулятором (controller), все блоки которого (пропорциональный, интегральный и оба дифференциальных) хорошо отработаны на

практике<sup>3</sup>. Поэтому его передаточная функция вместе с измерительным  $W_1(s)$  и исполнительным  $W_2(s)$  устройствами (рис. 1), которые моделировались аperiодическими звеньями с постоянными времени, принятыми равными 0,04 и 0,05 соответственно, принимает следующий вид:

$$\Delta E_{qe} = W_2(s) \frac{N_{con}(s)}{D_{con}(s)} W_1(s) \Delta U_T = \frac{K_i + K_p s + K_1 s^2 + K_2 s^3}{s(1 + 0,04s)(1 + 0,05s)} \Delta U_T.$$

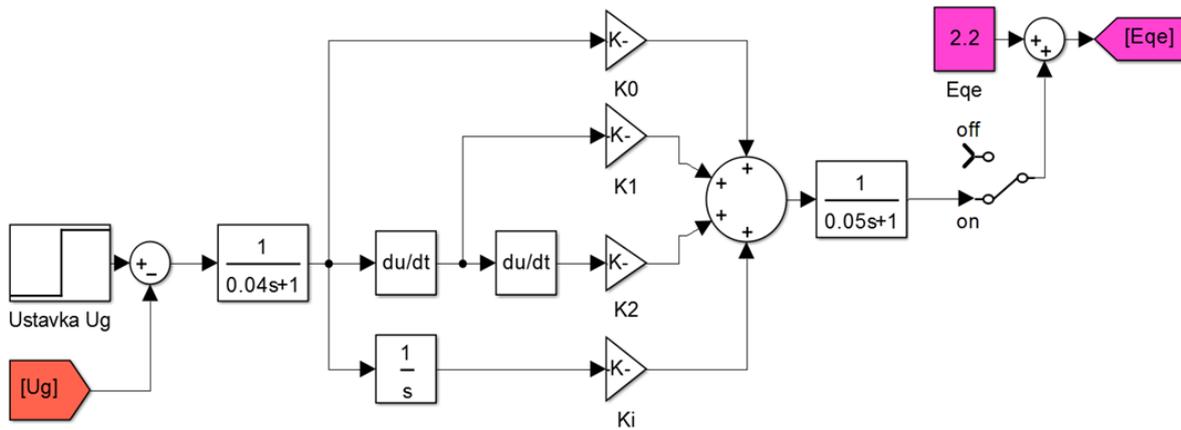
Из Диофантова соотношения  $f(s) = D_{pl}(s)D_{con}(s) + N_{pl}(s)N_{con}(s)$  получается приведенный характеристический многочлен замкнутой системы:

$$F(s) = s^6 + (45,9452 + 137,3469 K_2) s^5 + (13248,64 + 137,347 K_1) s^4 + (5,8110 + 137,347 K_p + 918903,56 K_2) s^3 + (6696538,4 + 137,347 K_i + 918903,56 K_1) s^2 + (3616491,3 + 918903,56 K_p) s + 918903,56 K_i. \quad (9)$$

**Ресурсы стабилизации АРВ настройкой ПИДД<sub>2</sub>-управления.** В самом сжатом виде идея отыскания параметров управления, обеспечивающих наибольшую степень устойчивости САУ с регулятором пониженного порядка, следующая. Рассмотрим наибольшую действительную часть полюсов системы (иными словами, правую границу расположения полюсов на комплексной плоскости) как целевую функцию, зависящую от параметров управления<sup>4</sup>. Минимизация этой функции, т.е. смещение влево правой границы, сначала оказывается сдвигом одного характеристического корня или комплексной пары; с какого-то момента на границе оказывается несколько действительных корней (кратный корень) или комплексных пар, и сдвиг должен осуществляться для всего ансамбля правых корней; пока таких корней немного, возможна дальнейшая минимизация [13]; когда же число связей между корнями, обусловленное их нахождением на правой границе, совпадает с числом параметров управления, дальнейшая минимизация может оказаться невозможной: в пространстве параметров возникает нульмерное критическое многообразие – одна или несколько точек.

<sup>3</sup> Благодаря современным датчикам, быстродействие которых существенно превосходит характерное время развития переходных процессов, ДД<sub>2</sub>-регуляторы убедительно реализуют теоретическую передаточную функцию  $K_1 s + K_2 s^2$ . Стоит отметить, что возможности современной силовой электроники значительно ослабляют требование правильности (properness) регулятора.

<sup>4</sup> Понятие гурвицевой функции  $H(K) = \max \operatorname{Re} z_k$  как правой границы расположения полюсов в зависимости от вектора  $K$  свободных параметров управления расширяет общепринятое понятие степени устойчивости системы, допуская значения любого знака и тем самым включая в себя также «степень неустойчивости».

Рис. 1. Модель ПИДД<sub>2</sub>-регулятора в MATLAB(Simulink)

Вариантов подобных граничных расположений действительных корней и комплексных пар несколько, они зависят от числа параметров управления и называются критическими корневыми диаграммами [14]. В случае четырех свободных параметров возникает 13 диаграмм, которые и были нами изучены.

Часть из них не реализуется из-за недостаточной степени характеристического многочлена (9), другие не допускают устойчивых полюсов. Например, трехкратная комплексная пара полюсов  $z_{1-6} = x \pm iy$  возникает только при  $x \approx 7,234; 30,924$ , т.е. при заведомо неустойчивой системе.

Единственное найденное устойчивое решение соответствует двукратному действительному корню  $x_{1,2} \approx -36,448$  почти на одной вертикали с двойной комплексной парой, также почти кратной:  $z_{3,4} \approx -36,446 \pm 66,786i$  и  $z_{5,6} \approx -36,449 \pm 66,787i$ . Это решение соответствует значениям коэффициентов управления, два из которых неоправданно велики:  $K_i \approx 48447,2$ ;  $K_p \approx 3874,62$ ;  $K_1 \approx 113,312$ ;  $K_2 \approx 1,2577$ .

Этот глобальный минимум гурвицевой функции

$$H(K_i, K_p, K_1, K_2) = \max \operatorname{Re}(z_1, \dots, z_6) \approx -36,45$$

соответствует чрезмерно высокой с практической точки зрения степени устойчивости  $\sim \exp(-36,45t)$ ; как замечено выше, он достигнут при не имеющих практического смысла значениях коэффициентов АРВ.

Из этого следует важный вывод: ПИДД<sub>2</sub>-регулятор позволяет достигать практически любой степени устойчивости замкнутой системы ценой увеличения значений коэффициентов регулятора, возможно, за рамками технической целесообразности.

**Замечание.** Моделирование переходных процессов в пакете MATLAB(Simulink) для экстремальных значений параметров  $K_i, K_p, K_1, K_2$  дает весьма высокую скорость подавления возмущения: начальный отрезок графика  $U_f(t)$

практически вертикален, а завершение переходных процессов по напряжению происходит за 0,2 с; однако процессы по мощности и углу устанавливаются только за 1,2 с (рис. 2). Очевидно, что процессы в нелинейной модели не оправдывают степени устойчивости линейной модели по переменной  $U_f$  за счет сравнительно более медленного подавления возмущения переменных  $P_f$  и  $\delta$ .

Тем самым вопрос об оптимальности ПИДД<sub>2</sub>-управления сводится к согласованию достаточной скорости стабилизации с приемлемыми значениями параметров регулятора  $K_i$  и  $K_p$ . Таким образом, остается установить, какие приемлемые значения коэффициентов регулятора обеспечивают удовлетворительное качество подавления возмущений. Это приводит к задачам поиска условного экстремума гурвицевой функции  $H(K_{i,p,1,2})$  при фиксации одного из коэффициентов регулятора.

**Ресурсы стабилизации АРВ настройкой ПДД<sub>2</sub>-управления.** Первая возможность заключается в задании интегрального параметра: положим  $K_i = 50$ .

Список критических корневых диаграмм в этом случае сокращается до восьми [14], из которых теоретически нереализуемыми оказываются две<sup>5</sup>.

Поиск реализующихся устойчивых критических расположений полюсов приводит трехкратному действительному корню на одной вертикали с простой комплексной парой, что выражается в следующих значениях полюсов: корни  $z_1 \approx -4,338$ ,  $z_{2,3} \approx -4,363 \pm 0,014i$  представляют собой «почти трехкратный» действительный корень, который находится практически на той же вертикали, что и комплексная пара  $z_{4,5} \approx -4,354 \pm 110,930i$ ; шестой корень  $z_6 \approx -45,162$  расположен значительно левее.

<sup>5</sup> Это находящиеся на одной вертикали четыре простые комплексные пары либо три пары и действительный корень – в обоих случаях число корней превышает степень характеристического многочлена.

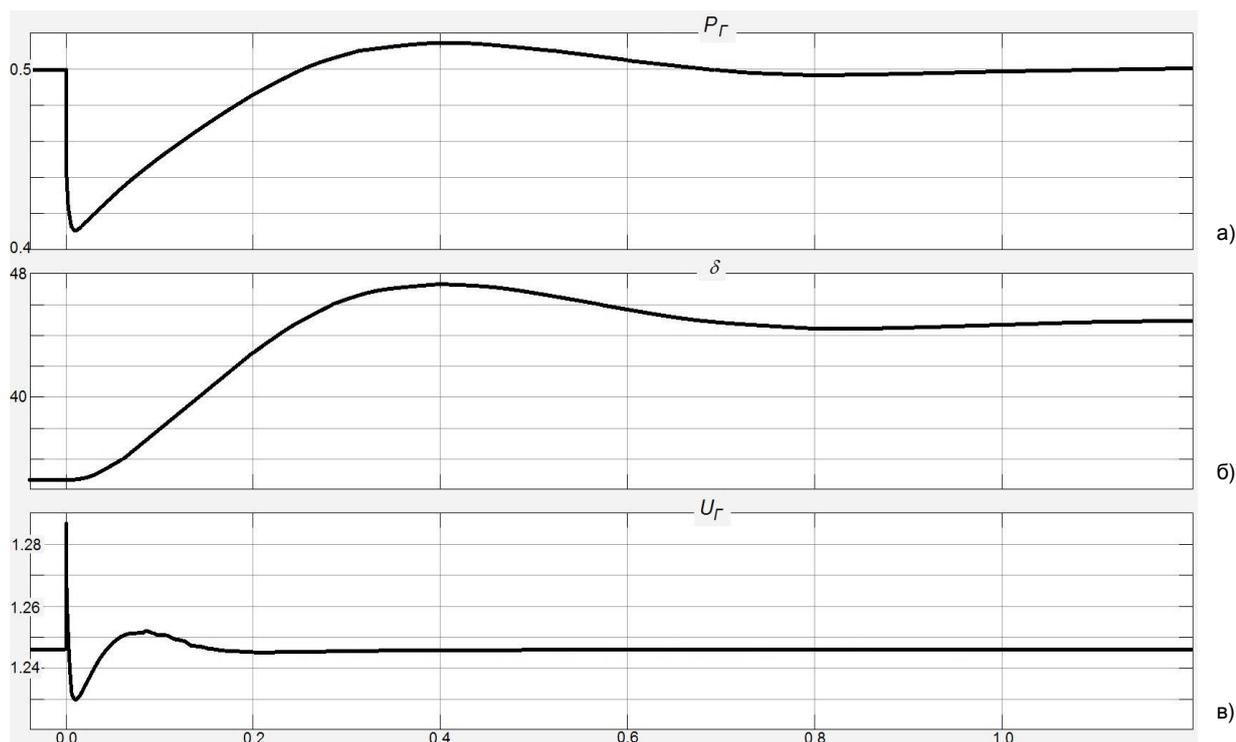


Рис. 2. Переходные процессы по мощности  $P_r$  (а), углу электропередачи  $\delta$  (б) и напряжению генератора  $U_r$  (в) в нелинейной модели генератора с ПИД<sub>2</sub>-регулятором при значениях коэффициентов, соответствующих максимальной степени устойчивости линеаризованной модели

Это расположение полюсов возникает при параметрах управления  $K_p \approx 31,657$ ,  $K_1 \approx 1,409$ ,  $K_2 \approx 0,153$  (как условлено выше,  $K_i = 50$ ).

Время стабилизации при этом около 2,5 с; однако при моделировании процессов с такими параметрами управления в нелинейной модели возникает заметное перерегулирование: если начальное возмущение  $\Delta U_r = 0,040$  о.е., то в переходном процессе через 0,2 с возникает всплеск  $\Delta U_r(0,2) \approx 0,052$  о.е.

**Замечание.** Критическое корневое расположение другого типа: двукратный действительный корень  $z_{1,2} \approx -0,05$  на одной вертикали с простыми парами  $z_{3,4} \approx -0,05 \pm 81,71i$  и  $z_{5,6} \approx -0,05 \pm 1647,15i$  находится практически на границе устойчивости и за счет большой колебательности второй из них теряет смысл; слишком велики и значения двух коэффициентов:  $K_p \approx 1981,6$  и  $K_1 \approx 19705,7$  ( $K_2 \approx -0,33$ ).

**Ресурсы стабилизации APB настройкой ИДД<sub>2</sub>-управления.** Фиксируем коэффициент пропорционального усиления  $K_p = 50$ . Список возможных критических диаграмм тот же, и наибольшая устойчивость достигается при аналогичном расположении корней: «почти трехкратный действительный» корень  $z_1 \approx -5,379$ ,  $z_{2,3} \approx -5,396 \pm 0,010i$  находится приблизительно на той же вертикали, что и про-

стая пара  $z_{4,5} \approx -5,391 \pm 110,831i$ ; шестой корень  $z_6 \approx -44,306$  находится существенно левее.

Такое расположение полюсов достигается при параметрах управления  $K_i \approx 93,0$ ,  $K_1 \approx 3,522$ ,  $K_2 \approx 0,184$ . Переходные процессы при таких значениях параметров в нелинейной системе также дают несколько более убедительный результат (рис. 3). Время подавления возмущения чуть больше 2 с, перерегулирование по напряжению не возникает.

Нелинейная модель с таким регулятором демонстрирует также удовлетворительную робастность, сохраняя форму и численные значения переходных процессов при изменении параметров управления на  $\pm 5\%$ .

**Замечание.** Еще одно решение с меньшей степенью устойчивости реализуется при параметрах управления  $K_i \approx 15,62$ ,  $K_1 \approx 54,80$ ,  $K_2 \approx 23,21$ . Степень устойчивости  $H(K_{i,1,2}) \approx -0,869$  достигается при аналогичном расположении полюсов: «почти трехкратный действительный» корень  $z_1 \approx -0,8695$ ,  $z_{2,3} \approx -0,869 \pm 0,005i$  находится на одной вертикали с комплексной парой  $z_{4,5} \approx -0,8690 \pm 82,300i$ , а шестой корень  $z_6 \approx -3229,4$  – далеко слева.

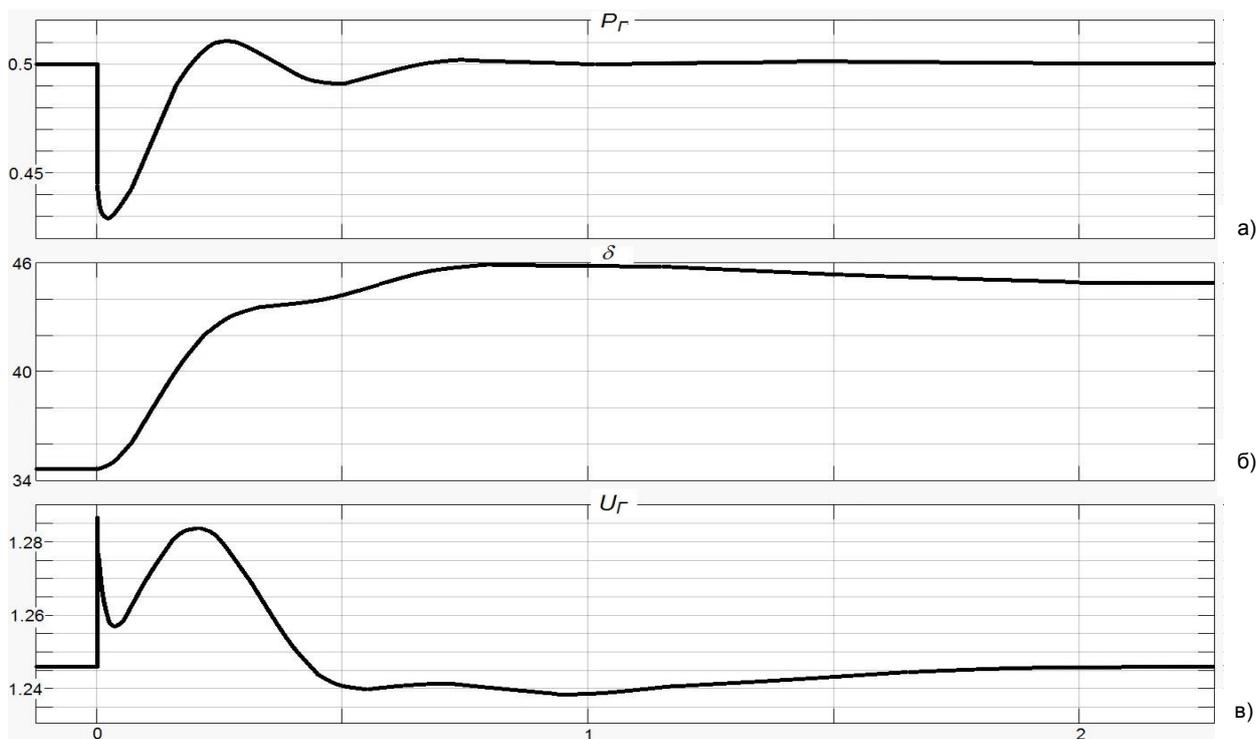


Рис. 3. Переходные процессы по мощности  $P_r$  (а), углу электропередачи  $\delta$  (б) и напряжению генератора  $U_r$  (в) в нелинейной модели генератора с ПИДД<sub>2</sub>-регулятором при значениях коэффициентов регулятора  $K_i \approx 93,0$ ,  $K_i \approx 93,0$ ,  $K_p = 50$ ,  $K_1 \approx 3,522$ ,  $K_2 \approx 0,184$

Однако при моделировании управления с такими параметрами регулятора нелинейная система оказывается неустойчивой. По-видимому, это объясняется сравнительно большими значениями дифференциальных коэффициентов  $K_{1,2}$  и резким всплеском управляющего воздействия, возникающим при численной аппроксимации неограниченных первой и второй производных ступенчатого возмущения. Технически это означало бы недопустимо высокую чувствительность к шумам.

**Результаты.** Моделирование синхронного генератора с ПИДД<sub>2</sub>-регулятором возбуждения осуществлялось двумя способами: поиск оптимального регулятора осуществлялся с помощью модели, линеаризованной для действующих значений установившегося режима, а подбор самого установившегося режима и контроль переходных процессов для оптимальных регуляторов выполнялись в нелинейной модели, построенной стандартными средствами пакета Matlab.

Хотя переходные процессы в нерегулируемом генераторе оказались устойчивы к скачкообразному возмущению на шинах, принятые параметры установившегося режима в линеаризованной модели привели к неустойчивым полюсам передаточной функции объекта (от вынужденной ЭДС  $E_{qe}$  в качестве контролирующего воздействия к напряжению на зажимах  $U_r$  в качестве контролируемой величины) и тем самым к содержательной задаче его стабилизации.

Оптимальные регуляторы для линеаризованной модели находились алгебраическими

средствами с помощью критических корневых диаграмм и корневых многочленов по той же схеме, как это было сделано в [12–14].

Четырехпараметрический ПИДД<sub>2</sub>-регулятор обеспечивает практически неограниченную степень устойчивости линеаризованной системы за счет чрезмерно больших значений коэффициентов усиления; однако при моделировании такого регулятора в нелинейной системе подавление возмущения происходит быстро, но немгновенно (на этом сказывается более медленное протекание процессов стабилизации угла электропередачи и мощности). Это приводит к задаче поиска оптимального регулятора в рамках принятых ограничений на параметры управления.

Среди рассмотренных возможностей наилучший результат был получен при фиксированном пропорциональном коэффициенте  $K_p = 50$ ; удовлетворительное время подавления возмущения и отсутствие перерегулирования достигнуты при умеренных значениях и невысокой чувствительности к изменениям других коэффициентов усиления.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют рассчитывать на успешное применение этого метода (линеаризации нелинейной модели относительно значений установившегося режима, поиска оптимальных настроек ПИДД<sub>2</sub>-регулятора возбуждения линейной модели методом критических корневых диаграмм и контроля переходных процессов в нелинейной модели при найденных параметрах управления) для эффективной стабилизации двух- и трехмашинных систем генерации электроэнер-

гии в локальных сетях. Отдельного изучения заслуживает вопрос о связи степени устойчивости линеаризованной модели со временем подавления возмущения в исходной нелинейной модели.

#### Список литературы

1. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
2. **Momoh J.** SMART GRID Fundamentals of Design and Analysis // IEEE PRESS. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.
3. **Kassakian J., Schmalensee R.** The future of the electric grid: An interdisciplinary MIT study. Technical report / Massachusetts Institute of Technology, 2011.
4. **Demeo A., Peterson M.L.** Community Smart Grid Utilizing Dynamic Demand Response and Tidal Power for Grid Stabilization // Smart Grid and Renewable Energy. – 2013. – No 4. – P. 465–472.
5. **Sharaf A.M., Gandoman F.H.** FACTS Based Stabilization for Smart Grid Applications // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2014. – Vol. 8, No 11. – P. 1807–1811.
6. **Lakshma Naik V.** A Comparison Scheme of Dynamic Voltage for Smart Electric Grid Stabilization and Efficient Utilization using FACTS // International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 6, Issue 2. – P. 353–364.
7. **Жданов П.С.** Вопросы устойчивости электрических систем. – М.: Энергия, 1979.
8. **Поляк Б.Т., Щербakov П.С.** Трудные задачи линейной теории управления. Некоторые подходы к их решению // Автоматика и телемеханика. – 2005. – № 5. – С. 7–46.
9. **Polyak B.T., Gryazina E.N.** Stability domain in the parameter space: D-decomposition revisited // Automatica. – 2006. – Issue 42. – P. 13–26.
10. **Datta A., Ho M.-T., Bhattacharyya S.R.** Structure and Synthesis of PID Controllers. – N.Y.: Springer, 2000.
11. **Анисимов А.А., Тарарыкин С.В., Аполонский В.В.** Параметрическая оптимизация электромеханических систем с регуляторами и наблюдателями состояния // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 2. – С. 21–26.
12. **Чехонадских А.В.** О ступенчато-дифференциальной оптимизации корней характеристического многочлена САУ // Науч. вестник НГТУ. – 2008. – № 4(33). – С. 205–208.
13. **Корюкин А.Н., Чехонадских А.В.** Предел устойчивости трехмассовой системы с регулятором 3-го порядка. Ч.1 // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2011. – № 4(66). – С. 3–22.
14. **Чехонадских А.В.** Экстремальные расположения полюсов систем автоматического управления с регулятором пониженного порядка // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 10. – С. 6–24.
15. **Armeev D.V., Chekhonadskikh A.V., Voevoda A.A.** Modal optimization of AVR for synchronous generator using the finite gradient // International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2015): proc., Omsk, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE, 2015.
16. **Шойко В.П.** Автоматическое регулирование в электрических системах. – Новосибирск: НГТУ, 2012.
17. **Хрущев Ю.В., Заподовников К.И., Юшков А.Ю.** Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.
18. **Москвин И.А.** Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 46–50.

#### References

1. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical

- transients in electric systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985. 536 p.
2. Momoh, J. SMART GRID Fundamentals of Design and Analysis. IEEE PRESS. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2012.
3. Kassakian, J., Schmalensee, R. The Future of the Electric Grid: An interdisciplinary MIT Study. Technical Report. Massachusetts Institute of Technology, 2011.
4. Demeo, A., Peterson, M.L. Community Smart Grid Utilizing Dynamic Demand Response and Tidal Power for Grid Stabilization. Smart Grid and Renewable Energy, 2013, no. 4, pp. 465–472.
5. Sharaf, A.M., Gandoman, F.H. FACTS Based Stabilization for Smart Grid Applications. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2014, vol. 8, no. 11, pp. 1807–11.
6. Lakshma Naik V. A Comparison Scheme of Dynamic Voltage for Smart Electric Grid Stabilization and Efficient Utilization using FACTS. International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology, 2015, vol. 6, issue 2, pp. 353–364.
7. Zhdanov, P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem* [Stability problems of electric systems]. Moscow, Energiya, 1979.
8. Polyak, B.T., Shcherbakov, P.S. Trudnye zadachi lineynoy teorii upravleniya. Nekotorye podkhody k ikh resheniyu [Difficult Problems of Linear Control Theory: Possible Approaches to their Solution]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2005, vol. 66, no. 5, pp. 681–718.
9. Polyak, B.T., Gryazina, E.N. Stability domain in the parameter space: D-decomposition revisited. Automatica, 2006, issue 42, pp.13–26.
10. Datta, A., Ho, M.-T., Bhattacharyya, S.R. Structure and Synthesis of PID Controllers. N.Y., Springer, 2000.
11. Anisimov, A.A., Tararykin, S.V., Apolonsky, V.V. Parametricheskaya optimizatsiya elektromekhanicheskikh sistem s regulyatorami i nablyudatelyami sostoyaniya [Parametrical optimization of regulators and state observers in electromechanical systems]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 2, pp. 21–26.
12. Chekhonadskikh, A.V. O stupenchatodifferentsial'noy optimizatsii korney kharakteristicheskogo mnogochlena SAU [On stage-differential optimization of control system characteristic roots]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2008, issue 4(33), pp. 205–208.
13. Koryukin, A.N., Chekhonadskikh, A.V. Predel ustoychivosti trekhmassovoy sistemy s regulyatorom 3-go poryadka, ch. 1 [Stability limit of a 3-mass system with a third-order controller, p. 1]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*, 2011, no. 4(66), pp. 3–22.
14. Chekhonadskikh, A.V. Ekstremal'nye raspolozheniya polyusov sistem avtomaticheskogo upravleniya s regulyatorom ponizhennogo poryadka [Extreme pole locations in automatic control systems with a reduced-order controller]. *Avtomatika i telemekhanika*, 2014, no. 10, pp. 6–24.
15. Armeev, D.V., Chekhonadskikh, A.V., Voevoda, A.A. Modal optimization of AVR for synchronous generator using the finite gradient. Proc. International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2015), Omsk, 21–23 May, 2015. Omsk, 2015.
16. Shoiko, V.P. *Avtomaticheskoe regulirovanie v elektricheskikh sistemakh* [Automatic control in electric systems]. Novosibirsk, NGTU, 2012, 195 p.
17. Khrushchev, Yu.V., Zapodovnikov, K.I., Yushkov, A.Yu. *Elektromekhanicheskie perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electrical power systems]. Tomsk, Izdatel'stvo TPU, 2012.
18. Moskvin, I.A. Kolebatel'naya staticheskaya ustoychivost' elektroenergeticheskoy sistemy [Oscillatory steady state stability of an electrical power system with an interconnection containing controlled series capacitors]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 46–50.

*Армеев Денис Владимирович*,  
ФГБОУВО «Новосибирский государственный технический университет»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем,  
e-mail: denarpost@yandex.ru

*Armejev Denis Vladimirovich*,  
Novosibirsk State Technical University,  
Associate Professor of the Department of Automated Electric Power Systems,  
e-mail: denarpost@yandex.ru

*Чехонадских Александр Васильевич*,  
ФГБОУВО «Новосибирский государственный технический университет»,  
доктор технических наук, профессор кафедры алгебры и математической логики,  
e-mail: alchekh@ngs.ru

*Chekhonadskikh Aleksandr Vasilyevich*,  
Novosibirsk State Technical University,  
Professor of the Department of Algebra and Mathematical Logic,  
e-mail: alchekh@ngs.ru

*Нестеренко Глеб Борисович*,  
ФГБОУВО «Новосибирский государственный технический университет»,  
магистрант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем,  
e-mail: nesterenkogbn@mail.ru.

*Nesterenko Gleb Borisovich*,  
Novosibirsk State Technical University,  
Master Course Student of the Department of Automated Electric Power Systems,  
e-mail: nesterenkogbn@mail.ru