

УДК 621.321

**ОБЛАСТЬ СТАБИЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ  
СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПИДД<sub>2</sub>-РЕГУЛЯТОРОМ  
ВОЗБУЖДЕНИЯ****А.В. Чехонадских***Новосибирский государственный технический университет*

Объектом исследования послужила система нелинейных дифференциальных и функциональных уравнений, описывающая синхронный генератор. ПИДД<sub>2</sub>-управление осуществлялось через блок возбуждения. Действующие значения установившегося режима в относительных единицах и предварительные настройки субоптимальных регуляторов были получены ранее с помощью линеаризованной модели. Возмущающие скачки (всплески и просадки) напряжения на шинах моделировались с помощью изменений импеданса линии. Стабилизация системы изучалась при различных величинах скачков и значениях параметров регулятора с помощью серии численных экспериментов; расчеты велись методами Рунге–Кутты и Дормана–Принса. Основное внимание уделено различным типам переходных процессов, стабилизирующихся и расходящихся, а также конфигурации границы области устойчивости в координатах параметров регулятора и величины скачка; как наиболее содержательные в статье приведены результаты для пропорционального параметра. Выявлено пять типов переходных процессов и несколько важных особенностей поведения системы вблизи границы области стабилизации. Так, нелинейная модель замкнутой системы оказалась неустойчивой к малым и устойчивой к большим возмущениям в области неустойчивости своей линеаризации. Установившиеся колебания на границе устойчивости имеют меньшую амплитуду при увеличении размеров начального возмущения и др.

*Ключевые слова:* распределенная генерация, регулятор возбуждения, ПИДД<sub>2</sub>-управление, переходные процессы, стабилизация, границы устойчивости.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-51-61

**Введение**

Обеспечение устойчивости режимов генерирующих систем является одной из важнейших задач энергетики. Анализ статической устойчивости электрогенерации под действием малых возмущений обычно осуществляется отдельно от анализа динамической устойчивости переходных процессов под действием больших возмущений, возникающих в аварийных ситуациях. Если в первом случае достаточно найти степень устойчивости линеаризованной системы, то во втором необходимо изучать нелинейную модель.

В отличие от больших энергосистем в локальных системах распределенной генерации отключение и подключение любой нагрузки являются заметным возмущением. Отсюда ясна важность изучения систем распределенной генерации электроэнергии в режимах, близких к предельным, в частности развитие методов настройки многопараметрических регуляторов с максимально возможными показателями устойчивости [1].

Оптимизация настроек автоматического регулятора возбуждения (АРВ) допускает различные подходы. Классический метод Ляпунова был использован в [2] для обеспечения асимптотической устойчивости синхронной электрической машины. В линеаризованной системе управления нахождение оптимальных пара-

метров управления равносильно достижению максимальной степени устойчивости или, в общем случае, предельно возможного смещения полюсов системы влево на комплексной плоскости [3, 4].

Как удалось установить ранее [5], ресурсы ПИДД<sub>2</sub> АРВ позволяют достигать практически любой степени устойчивости линеаризованной системы за счет использования непомерно больших значений коэффициентов регулятора. Однако использование тех же настроек в исходной нелинейной модели приводит к умеренной скорости стабилизации переходных процессов. Дальнейшая фаза исследований заключалась в назначении некоторого практически целесообразного значения одного из параметров АРВ (пропорционального или интегрального) и оптимизации значений остальных с помощью критических корневых диаграмм [3, 4, 6]. Таким способом авторы находили субоптимальные настройки ПИДД<sub>2</sub> АРВ для линеаризованной системы с фиксированным интегральным или пропорциональным коэффициентом [5].

Попытка выяснить, как проявляет себя субоптимальность линеаризованной системы регулирования в протекании переходных процессов нелинейной модели с теми же настройками регулятора позволила обнаружить высокую робастность замкнутой системы в пространстве параметров управления. Иными словами, изменение настроек АРВ в широких пределах не оказывало видимого влияния на поведение контролируемых переменных и качество переходных процессов, например, на скорость снижения отклонения от установившегося режима или величину перерегулирования.

Но выяснение запаса устойчивости в пространстве параметров управления и величины начального возмущения столкнулось с трудностями в определении устойчивой зоны, переборами (как представлялось поначалу) в характере протекания переходных процессов, неопределенностью времени расчета и сложностью конфигурации границы устойчивости.

Подобные вопросы привлекали внимание исследователей по различным причинам (в том числе в ситуациях, допускающих некоторые аналитические обобщения [7]), однако расчет границ устойчивости для различных значений параметров АРВ и величины возмущения составил неожиданно трудную задачу, решавшуюся с помощью серий численных экспериментов.

В статье представлены важные особенности переходных процессов нелинейной модели, которые следует иметь в виду при оценке устойчивости и определении границ области стабилизации для систем распределенной генерации электроэнергии.

### 1. Постановка задачи

Классическая теорема А.М. Ляпунова утверждает эквивалентность в малом асимптотической устойчивости (и неустойчивости) нелинейной динамической системы и ее линеаризации. Границы этой малости и характер переходных процессов за их пределами существенно зависят от влияния нелинейности, и моделирование поведения генератора с АРВ вблизи границы устойчивости оказывается трудоемкой проблемой в тех случаях, когда система управления подвергается возмущениям, которые нельзя считать малыми. То, что устойчивость системы отслеживается по углу передачи энергии, сложно связанным с напряжением на шинах и мощностью генератора, усугубляется косвенным регулированием через блок возбуждения. В этой связи вблизи границы устойчивости наблюдается несколько типов переходных процессов.

Главная задача заключалась в идентификации различных типов переходных процессов вблизи границы устойчивости по оси  $K_p$ ; в числе прочего наше рассмотрение выявило зависимость этих типов от величины возмущения.

Моделью генератора послужила система известных нелинейных дифференциальных и функциональных уравнений [8], что позволило получить стационарный режим в относительных единицах ([5], они используются в докладе везде далее). ПИДД<sub>2</sub>-регулирование осуществлялось как обратная связь через обмотку возбуждения. Поскольку возмущения в сети распределенной генерации вызваны подключениями и отключениями нагрузок и результирующими скачками или провалами напряжения на шинах, возмущение стационарного режима моделировалось изменениями импеданса линии. Дифференциальные уравнения решались в пакете Matlab тем из методов Рунге–Кутты или Дормана–Принса, который давал лучшие результаты; размер шага уменьшался до практической неразличимости решений.

Как наиболее содержательные, далее представлены результаты исследования окрестности границы устойчивости по пропорциональному параметру  $K_p$ , хотя изучались также границы для интегрального и дифференциальных параметров регулирования (в частности, для  $K_d$  схожие результаты менее выражены).

Заметим, что выписывавшиеся для поиска субоптимальных регуляторов характеристические многочлены линеаризованных систем (в том числе в [5]) не позволяют ни найти, ни проверить приводимые в работе результаты, так как линеаризация осуществлялась относительно установившихся режимов во внутренних точках области устойчивости вне связи с ее границей.

## 2. Предварительные определения

Как правило, для линеаризованной системы ситуация на границе устойчивости достаточно ясна. Вдоль оси некоторого параметра область асимптотической устойчивости и область колебаний с экспоненциально растущей амплитудой (или аperiодическим экспоненциальным ростом контролируемых величин, например напряжения и мощности) разграничены единственной точкой, где возмущение приводит к незатухающим колебаниям ограниченной амплитуды. В этой точке уменьшение начального возмущения ведет к пропорциональному уменьшению отклонения переходного процесса от установившегося режима.

Для нелинейных систем ситуация сложнее. Численная оценка малости возмущения, гарантирующей эквивалентность, довольно затруднительна. Так как устойчивый для некоторых значений параметров АРВ генератор заведомо теряет синхронизацию при больших скачках напряжения на шинах, отклонения напряжения в пределах устойчивости (от максимальной просадки до максимального всплеска) будем называть *полосой стабилизируемых возмущений*. Естественная гипотеза состоит в сужении этой полосы по мере того как значение некоторого параметра приближается к граничной точке устойчивости по его оси.

Однако расчеты процессов в нелинейной системе дали другие результаты: из зоны заведомой неустойчивости сужающийся клин нестабилизируемых возмущений достигает слева граничной точки устойчивости линейной модели (рис. 5). Во всех примерах представлены три синхронных взаимосвязанных переходных процесса: верхний график показывает мощность, средний – угол передачи, нижний – напряжение на шинах; ось абсцисс представляет время в секундах.

Для более выраженного графического представления процессы на рис. 1 и 4 получены при значении параметра  $K_p = 50$ , значительно отличающегося от граничного значения  $K_p = 1$ ; это связано с тем, что на границе тип переходного процесса может проявиться в результате слишком большого времени расчета; все качественные особенности графика отражены в полной мере.

Выше и ниже неустойчивого клина вблизи граничной точки обнаружены два типа устойчивости (рис. 1–2):

– асимптотическая устойчивость, при которой растущее время переходного процесса  $t \rightarrow \infty$  вынуждает действующее значение  $F(t)$  мощности, угла или напряжения стремиться к их значениям  $F_{st}$  в установившемся режиме, что возможно как при апериодическом процессе (рис. 1), так и при затухающих колебаниях:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = F_{st}$$

– некоторый аналог устойчивости по Ляпунову, когда растущее время приводит к стабилизации колебаний регулируемых величин относительно их значений в установившемся режиме (отличном от рабочего), где частота и амплитуда колебаний становятся практически постоянными, т. е. для некоторой периодической функции  $P(t) = P(t + T)$  выполняется равенство (рис. 2):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |F(t) - P(t)| = 0.$$

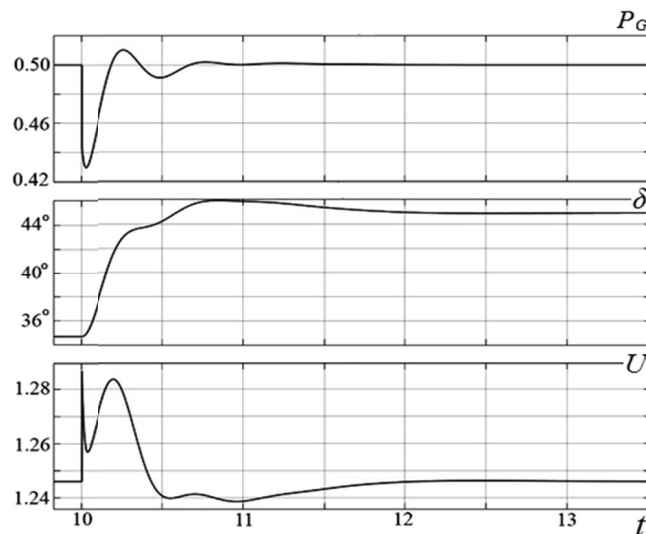


Рис. 1 – Асимптотически устойчивый переходный процесс;  
 $K_p = 50$ ; скачок импеданса  $\Delta Z$  от 2,5 до 2,596 о.е.

Fig. 1 – Asymptotically stable transient;  $K_p = 50$ ;  
 impedance surge  $\Delta Z$  from 2,5 to 2,596 r.u.

Типов принципиально неустойчивых переходных процессов также два:

- колебания с неограниченно растущей амплитудой (флаттерный тип, рис. 3);
- неограниченный апериодический процесс, в котором управляемые переменные с некоторого момента монотонно изменяются (дивергентный тип).

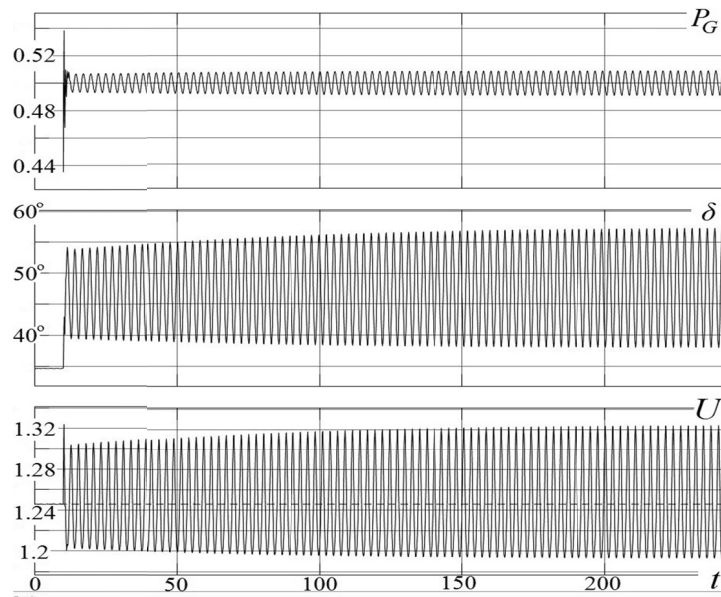


Рис. 2 – Устанавливающиеся колебания со стабилизирующей амплитудой;  $K_p = 1$

Fig. 2 – Steady-stating oscillations with stabilizing amplitude;  $K_p = 1$

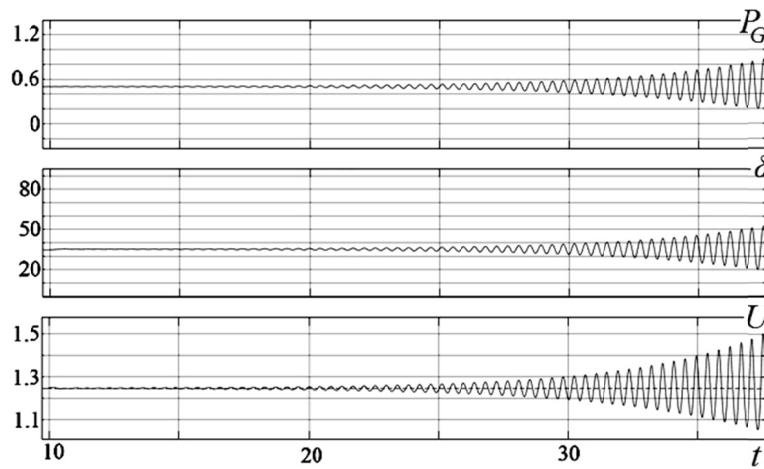


Рис. 3 – Нарастающие колебания (неограниченный флаттер);  $K_p = 50$

Fig. 3 – Increasing fluctuations (unlimited flutter) );  $K_p = 50$

В обоих случаях численное моделирование приводит к значениям угла передачи энергии, соответствующим потере генератором синхронности или аварийным значениям напряжения и мощности.

В некоторых случаях переходный процесс принимает форму иррегулярных флуктуаций относительно рабочих значений (рис. 4); этот тип переходных процессов не имеет прямых аналогов в линейных системах, однако в нелинейных системах встречается нередко [9].

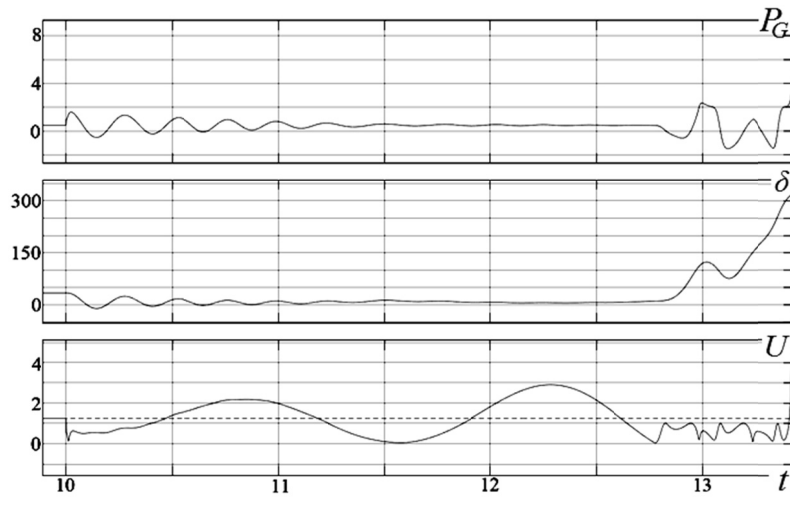


Рис. 4 – Аперiodические нерегулярные флуктуации;  $K_p = 1$ , сброс импеданса  $Z$  с 2,5 до 2,21 о.е.

Fig. 4 – Aperiodic irregular fluctuations;  $K_p = 1$ , impedance  $Z$  slump from 2,5 up to 2,21 r.u.

### 3. Результаты численных экспериментов

Для исследования устойчивости модели генератора с ПИДД<sub>2</sub> АРВ в пространстве параметров управления в [5] использовалось стандартное отклонение  $\Delta Z$  импеданса нагрузки, а именно, отключение одной из двух параллельных линий, вызывавшее скачок напряжения на шинах 0,04 о.е. (3,3 %). Трудности численного определения границы области устойчивости вызываются большими расхождениями в ответах нелинейной системы и ее линеаризации на возмущения, которые нельзя считать малыми, поэтому впоследствии расчеты проводились при различной величине возмущающего скачка  $\Delta Z$ .

Одно из них – стабилизация переходных процессов в области неустойчивости в малом. Второе – это два разных типа стабилизации: асимптотическая сходимость контролируемых переменных к установившимся значениям и формирование установившихся колебаний относительно рабочего режима. Внутренняя область на рис. 5 содержит пары (*параметр; возмущение*), для которых возникает один из этих устойчивых типов, тогда как внешняя область содержит пары с величинами переходных колебательных и аперiodических процессов, неограниченно отклоняющимися от установившихся.

Следующая за нахождением границы задача заключалась в том, чтобы прояснить распределение типов переходных процессов в зависимости от значения параметра пропорционального управления  $K_p$  и начального значения возмущения напряжения (точнее, отклонения импеданса линии  $\Delta Z$ , вызывающего это возмущение). Подробная «карта» распределения переходных процессов в окрестности точки (1; 2,5) показана на рис. 6.

Как известно, для линейной системы, находящейся на границе устойчивости, начальное возмущение вызывает незатухающие колебания относительно рабочего режима с ограниченной амплитудой; снижение начального возмущения приводит к снижению отклонения переходного процесса от рабочего. Проверка этого соотношения для нелинейной системы привела к результату, также отличающемуся от линейного случая.

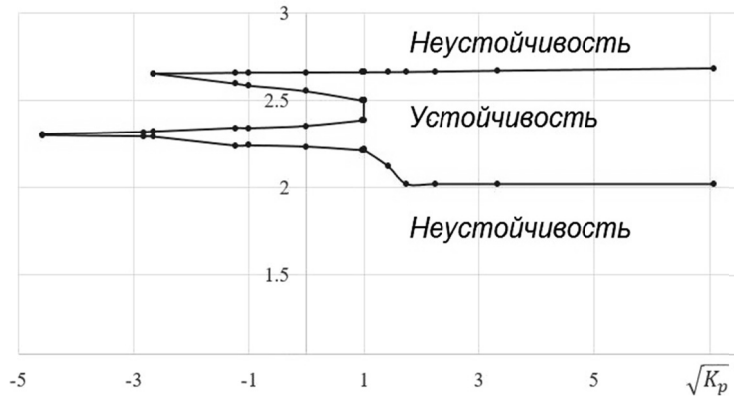


Рис. 5 – Область устойчивости нелинейной модели генератора при различных значениях пропорционального параметра; ось абсцисс градуирована как  $\tilde{K} = \text{sign } K_p \cdot |K_p|^{1/2}$ , по оси ординат отсчитываются значения  $\Delta Z$  импеданса линии, отклоняющиеся от номинального значения 2,5 о.е.

Fig. 5 – The stability area of the nonlinear generator model at various values of the proportional parameter; the abscissa axis is graded as  $\tilde{K} = \text{sign } K_p \cdot |K_p|^{1/2}$ , the ordinate axis represents line impedance values  $\Delta Z$  that deviate from the nominal value of 2,5 r.u.

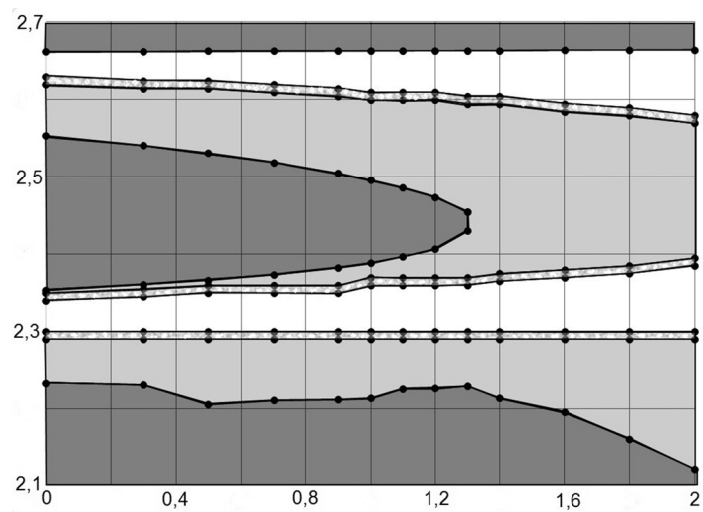


Рис. 6 – Распределение типов переходных процессов вблизи границы устойчивости при различных значениях коэффициента  $K_p$  (по оси абсцисс) и отклонений импеданса линии  $\Delta Z$  (по оси ординат). Область асимптотической устойчивости белая, область установившихся колебаний выделена серым, неограниченно растущих переходных процессов – темно-серым; зоны неопределенности – крапчатые

Fig. 6 – Distribution of transient types near the stability boundary at different values of the coefficient  $K_p$  (along the abscissa axis) and deviations of the line impedance  $\Delta Z$  (along the ordinate axis). The area of asymptotic stability is white, the area of steady oscillations is highlighted in gray, unlimited growing transient one – in dark gray; uncertainty zones are speckled

На отрезке значений импеданса, где переходный процесс приводит к установившимся колебаниям напряжения  $U_0$  относительно его значения в установившемся режиме, зависимость между отклонением импеданса  $\Delta Z$  и устанавливающейся амплитудой оказывается близка к линейной – но *убывающей*, т.е. противоположной той, которую предполагает устойчивость по Ляпунову (рис. 7). Однако в целом смена типа процессов объясняет уменьшение амплитуды установившихся колебаний при переходе из области колебаний с неограниченным ростом амплитуды в область асимптотической устойчивости с уменьшением амплитуды до нуля.

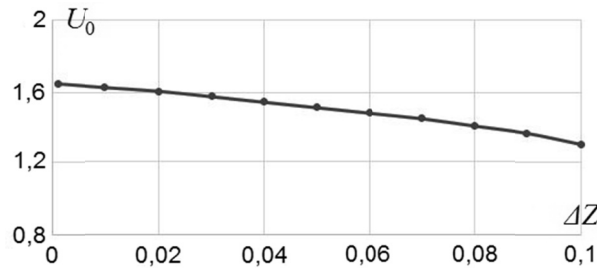


Рис. 7 – Связь отклонения импеданса  $\Delta Z$  (по оси абсцисс) и установившейся амплитуды колебаний  $U_0$  (по оси ординат) на границе устойчивости

Fig. 7 – Relationship between the deviation of impedance  $\Delta Z$  (along the abscissa axis) and the steady-state oscillation amplitude  $U_0$  (along the ordinate axis) at the stability boundary

#### 4. Обсуждение результатов и заключение

Из численных расчетов процессов в принятой модели видна сложность поведения регулируемого генератора вблизи окрестности границы устойчивости по параметру  $K_p$ .

Как видно из рис. 5–6, верхняя граница области общей устойчивости, содержащей оба типа ограниченных переходных процессов, слабо зависит от значения параметра  $K_p$ . Конфигурация нижней границы области общей устойчивости при снижении импеданса нелнейная. И хотя граница общей устойчивости по импедансу начинает меняться только в окрестности точки  $K_p = 1$ , справа от окрестности этой точки граница общей устойчивости также практически постоянна (рис. 5).

«Топография» на рис. 6 показывает, что область устанавливающихся колебаний является своеобразным «чехлом» на «острие» суживающейся полосы неустойчивости, который врезается в область общей устойчивости слева. Причина таких устанавливающихся колебаний не связано с наличием у линеаризованной системы чисто мнимых полюсов. Проявления подобного эффекта у реальной электромеханической системы следует отнести к самораскачиванию генератора [10].

Рассматривая результаты исследования в целом, выделим четыре значимых фактора:

- парадоксальное поведение нелинейной системы управления вне области устойчивости (т. е. при  $K_p < 1$ ) линеаризованной системы: асимптотическая устойчивость для *достаточно малых* возмущений теряется, но асимптотическая устойчивость по отношению к *не слишком малым* возмущениям все еще сохраня-



ются: это острые шипы на рис. 5 и узкие белые полосы на рис. 6; таким образом, можно предположить отрицательную обратную связь, оказываемую самим взаимодействием напряжения, мощности и угла передачи в модели генератора *помимо* АРВ;

– различие в границах между областями асимптотической устойчивости и неограниченной неустойчивости по отношению к скачкам напряжения вверх и вниз: зоны стабилизируемых и нестабилизируемых всплесков разделены четкой границей, тогда как аналогичная граница для просадок оказывается достаточно широкой полосой (нижняя серая полоса на рис. 6);

– переход от колебаний с установившейся ненулевой амплитудой к затухающим колебаниям (т. е. с нулевым пределом амплитуды) происходит на небольшом отрезке оси параметра  $K_p$ ; вопрос о непрерывности этого перехода, аналогичен вопросу о ширине резонансной зоны в физических и механических системах;

– в промежуточных полосах (рис. 6) сохраняется неопределенность между двумя типами переходных процессов; решающее значение здесь приобретают ошибки вычислений, так как выявление типа процесса требует слишком большого времени расчета.

В заключение подчеркнем, что без сравнения с результатами исследования электромеханического агрегата реального или его аналоговой модели трудно оценить адекватность численного моделирования вблизи границы устойчивости.

Автор считает приятным долгом поблагодарить коллег: доцента Д.В. Армеева, сыгравшего важную роль в определении направленности нашей работы и руководившего созданием нелинейной модели генератора, и магистранта НГТУ Г.Б. Нестеренко, выполнившего весь объем численных экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Smart grids: ABB Review. – Zürich: ABB Group R&D and Technology, 2010. – 84 p.
2. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. Lyapunov functions: an optimization theory perspective // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, iss. 1. – P. 7456–7461. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1513.
3. Корюкин А.Н., Чехонадских А.В. Предел устойчивости трехмассовой системы с регулятором 3-го порядка. Ч. 1 // Сборник научных трудов НГТУ. – 2011. – № 4 (66). – С. 3–22.
4. Корюкин А.Н., Чехонадских А.В. Предел устойчивости трехмассовой системы с регулятором 3-го порядка. Ч. 2 // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 1 (67). – С. 37–56.
5. Армеев Д.В., Чехонадских А.В., Нестеренко Г.Б. Ресурсы стабилизации напряжения синхронного генератора АРВ сильного действия // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 1. – С. 24–32. – DOI: 10.17588/2072-2672.2017.1.024-032.
6. Воевода А.А., Чехонадских А.В. Построение списка критических расположений полюсов систем автоматического управления // Доклады АН ВШ РФ. – 2014. – № 2–3 (23–24). – С. 7–18.
7. Юмагулов М.Г., Мустафина И.Ж., Ибрагимова Л.С. Исследование границ областей устойчивости двухпараметрических динамических систем // Автоматика и телемеханика. – 2017. – № 10. – С. 74–89.
8. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
9. Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Nosek J. Automatic control system: numerical modeling and optimization. – Moscow: RuScience, 2020. – 228 p. – ISBN 978-5-4365-5961-2.
10. Переходные процессы в электроэнергетических системах / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов. – М.: МЭИ, 2019. – 416 с. – ISBN 978-5-7046-1937-6.

## STABILITY AREA OF A SYNCHRONOUS GENERATOR NONLINEAR MODEL WITH MULTIPARAMETRIC EXCITATION CONTROLLER

**Chekhonadskikh A.V.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

We take as the research object the well-known system of nonlinear differential and functional equations that describes a synchronous generator. PID2-control was carried out through the excitation block. Effective values of the steady state in relative units and the preliminary settings of suboptimal controllers were obtained earlier using a linearized model. Disturbing surges (spikes and slump) in bus voltages were modeled as line impedance changes. The system stabilization was studied at various surges values and controller parameters by means series of numerical experiments; the calculations were carried out by the methods of Runge-Kutta and Dormand-Prince. The main attention was paid to various transient types, both stabilizing and diverging, as well as a configuration of the stability region boundary in the controller parameters of and a surge magnitude; the paper presents the results for the proportional control parameter are as the most informative. We've identified five types of transients and several important features of the model's behavior near the stabilization area boundary. Thus, the nonlinear model turned out to be unstable to small and stable to bigger perturbations in the unstable area of its linearization. The steady-state oscillations at the boundary have a lower amplitude with increasing of an initial perturbation, etc.

**Keywords:** distributed generation, synchronous generator, excitation controller, PID2-control, transients, stabilization, stability boundary.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-51-61

### REFERENCES

1. *Smart grids: ABB Review*. Zürich, ABB Group R&D and Technology, 2010. 84 p.
2. Polyak B.T., Shcherbakov P.S. Lyapunov functions: an optimization theory perspective. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, iss. 1, pp. 7456–7461. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1513.
3. Koryukin A.N., Chekhonadskikh A.V. Predel ustoichivosti trekhmassovoi sistemy s regulyatorom 3-go poriyadka. Ch. 1 [Stability limit of the triple mass system with 3rd order controller. Pt. 1]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 4 (66), pp. 3–22.
4. Koryukin A.N., Chekhonadskikh A.V. Predel ustoichivosti trekhmassovoi sistemy s regulyatorom 3-go poriyadka. Ch. 2 [Stability limits of three-mass system with a 3<sup>rd</sup> order controller, Pt. 2]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (67), pp. 37–56.
5. Armejev D.V., Chekhonadskikh A.V., Nesterenko G.B. Resursy stabilizatsii napryazheniya sinkhronnogo generatora ARV sil'nogo deistviya [Resources of voltage stabilization of a synchronous generator by a multiparametric excitation controller]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2017, no. 1, pp. 24–32. DOI: 10.17588/2072-2672.2017.1.024-032.
6. Voevoda A.A., Chekhonadskikh A.V. Postroenie spiska kriticheskikh raspolozhenii poliustov sistem avtomaticheskogo upravleniia [Construction of the critical location list of automatic control system poles]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2014, no. 2–3 (23–24), pp. 7–18.
7. Yumagulov M.G., Mustafina I.Z., A study of the boundaries of stability regions in two-parameter dynamical systems. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 78, no. 10, pp. 1790–1802. DOI: 10.1134/S0005117917100046. Translated from *Avtomatika i telemekhanika*, 2017, no. 10, pp. 74–89.
8. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electric systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.

9. Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Nosek J. *Automatic control system: numerical modeling and optimization*. Moscow, RuScience, 2020. 228 p. ISBN 978-5-4365-5961-2.
10. Kryuchkov I.P., Starshinov V.A., Gusev Yu.P., Piratorov M.V. *Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Transients in electric power systems]. Moscow, MEI Publ., 2019. 416 p. ISBN 978-5-7046-1937-6.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



**Чехонадских Александр Васильевич** – родился в 1959 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры АМЛ НГТУ. Область научных интересов: прикладная алгебра, теория автоматического управления, теория графов. Опубликовано свыше 90 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20/8. E-mail: chekhonadskikh@corp.nstu.ru).

**Chekhonadskikh Alexander Vasil'evich** (b. 1959) – Doctor of Sciences (Eng.), professor of Algebra and logics department, NSTU. His research interests lie in applied algebra, control theory and graph theory. He is author of 90 scientific papers. (Address: 20/8, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: chekhonadskikh@corp.nstu.ru).

Статья поступила 10 октября 2020 г.  
Received October 10, 2020

## To Reference:

Chekhonadskikh A.V. Oblast' stabilizatsii nelineinoy modeli sinkhronnogo generatora s PID2-regulyatorom vzbuzhdeniya [Stability area of a synchronous generator nonlinear model with multiparametric excitation controller]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* = *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 4 (49), pp. 51–61. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-4-51-61.