

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПАКЕТА MATLAB/SIMULINK ДЛЯ АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ

**А.П. Зарудная, К.Е. Горшков**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Пакет MATLAB/Simulink находит широкое применение при расчете и анализе установившихся и переходных режимов электроэнергетических систем. Для этого в пакете реализован ряд математических моделей, необходимых в решении задач имитационного моделирования. Модели имеют свои особенности и отличаются от описанных в отечественной литературе, что усложняет применение и создает дополнительные трудности при их параметризации и сопоставлении результатов моделирования. Поэтому сохраняют свою актуальность вопросы изучения особенностей применения пакета MATLAB/Simulink, в частности, при анализе статической устойчивости синхронных генераторов, работающих параллельно с энергосистемой.

В работе рассмотрен ряд моделей наиболее распространенных элементов электроэнергетической системы, отмечены некоторые особенности схем замещения, на которых они построены, показан пример задания параметров и сформулированы рекомендации по их вводу в программу. Выполнено моделирование установившегося режима и проведено сравнение режимных параметров. Полученные результаты будут полезны при изучении особенностей применения пакета MATLAB/Simulink для решения задач электроэнергетики, а приведенные в работе рекомендации могут быть использованы при моделировании установившихся и переходных режимов электроэнергетических систем.

*Ключевые слова: MATLAB/Simulink, моделирование, синхронный генератор, статическая устойчивость, параметризация элементов.*

**Введение.** Сегодня активно вводятся в эксплуатацию новые электростанции, на которых применяются мощные установки комбинированного типа. В Челябинской области в последние годы были введены в эксплуатацию два парогазовых блока мощностью 430 МВт на Южно-Уральской ГРЭС-2, три парогазовые установки мощностью 250 МВт на Челябинской ГРЭС и пылеугольный блок мощностью 660 МВт на Троицкой ГРЭС. Строительство новых электростанций приводит к увеличению перетоков мощности и росту уровня токов короткого замыкания в электроэнергетической системе, что ужесточает требования к способностям синхронных генераторов сохранять статическую и динамическую устойчивость в нормальных и аварийных режимах.

Задаче анализа режимов синхронных генераторов, работающих параллельно с энергосистемой, в разное время было посвящено много работ, при этом особое внимание всегда уделялось анализу их устойчивости на математических моделях, реализуемых с применением программных средств на ЭВМ [1–10]. Поэтому при моделировании элементов и объектов электроэнергетики широкое применение находят разные математические пакеты, в частности MATLAB/Simulink [11–20]. Его возможности позволяют рассчитывать установившиеся и

переходные режимы в электрических цепях с различными функциональными элементами, включая электродвигатели, трансформаторы, линии электропередачи, синхронные генераторы, а также рассматривать вопросы управления ими. Так, в [13, 15] затронуты вопросы разработки синхронных генераторов новой конструкции, выполнено имитационное моделирование в MATLAB/Simulink, дана оценка их характеристик. Работы [11, 12] посвящены вопросам моделирования нормальных и аварийных режимов синхронных генераторов, в частности, анализу статической и динамической устойчивости при изменении нагрузки, коммутациях в сети и коротких замыканиях, а в работах [14, 16, 17] рассмотрены вопросы настройки систем управления генераторами и их влияние на устойчивость отдельных агрегатов и энергосистемы в целом. Результаты, достигнутые в этих работах, позволяют сформировать представление о возможностях пакета MATLAB/Simulink в решении задач имитационного моделирования, что в свою очередь поддерживает интерес к его дальнейшему изучению.

Однако применение пакета для имитационного моделирования сопряжено с рядом трудностей. Реализованные в пакете модели силовых элементов, таких как генераторы, трансформаторы, ли-

нии электропередачи и др., зачастую построены на основе схем замещения, отличающихся от общепринятых и описанных в отечественной литературе либо требующих специфических знаний и навыков при задании их параметров в программе. Например, в [11] проводится сравнение упрощенной модели синхронного генератора «SSM» из пакета MATLAB/Simulink с математической моделью, реализованной в программе Mustang, нередко используемой в службах диспетчерского управления при анализе статической и динамической устойчивости. Авторы статьи отмечают существенные отличия как в логике построения моделей, так и в перечне задаваемых параметров. А в [18] затронута проблема правильного ввода параметров силовых трансформаторов и приведены необходимые для этого выражения. Учитывая это, сохраняют свою актуальность вопросы изучения особенностей применения пакета MATLAB/Simulink для имитационного моделирования в задачах расчета и анализа режима объектов электроэнергетической системы и оценка соответствия полученных результатов расчетам, выполненным общеизвестными способами.

В данной работе на примере блока Южно-Уральской ГРЭС-2 рассмотрена задача оценки статической устойчивости синхронного генератора, работающего через цепь передачи параллельно с энергосистемой. Для этого первоначально был выполнен расчет установившегося режима сети и определена угловая характеристика активной мощности генератора. Затем была сформирована имитационная модель в пакете MATLAB/Simulink и выполнена параметризация ее элементов с учетом особенностей схем замещения и их реализации в программе, после чего проведено моделирование и сравнение потоков мощностей, напряжений в узлах и угловых характеристик активной

мощности генератора. Основные этапы и результаты выполненной работы приводятся ниже.

### Математическая модель цепи передачи.

На Южно-Уральской ГРЭС-2 установлено два блочных синхронных генератора SGEN5-2000H мощностью 430 МВт (505 МВА) каждый, подключенных с шин напряжением 220 кВ и выдающих в сеть мощность по четырем воздушным линиям электропередачи. Поэтому в качестве первоначальной задачи была рассмотрена оценка устойчивости одного синхронного генератора SGEN5-2000H при его работе через повышающий трансформатор ТНЦ-630000/220 и двухцепную линию 220 кВ на эквивалентную энергосистему напряжением 110 кВ через условный трансформатор связи мощностью 2500 МВА.

Принципиальная схема такой цепи передачи приведена на рис. 1. Она включает в себя синхронный генератор, повышающий трансформатор, воздушную линию электропередачи, условный трансформатор связи и эквивалентную энергосистему. На схеме линия электропередачи выполнена двойной или двухцепной. Связь линии с энергосистемой осуществляется через условный трансформатор с параметрами, получающимися путем эквивалентирования схемы внешней сети. При анализе устойчивости генераторов схема подключения реальной электростанции может быть сведена к рассматриваемой цепи передачи путем преобразований, как отмечено в работах [1–4].

Расчет установившегося режима в схеме проводился в относительных единицах при отключенном APB генератора с учетом отбора активной мощности на собственные нужды. Схема замещения цепи передачи приведена на рис. 2. Параметры элементов на схеме замещения рассчитывались при базисном напряжении  $U_B = 115$  кВ и базисной мощности  $S_B = 1000$  МВА и приведены в табл. 1.



Рис. 1. Схема цепи передачи: СГ – синхронный генератор; Т1 – повышающий трансформатор; Л1–2 – линии электропередачи; Т2 – условный трансформатор связи; ЭС – энергосистема

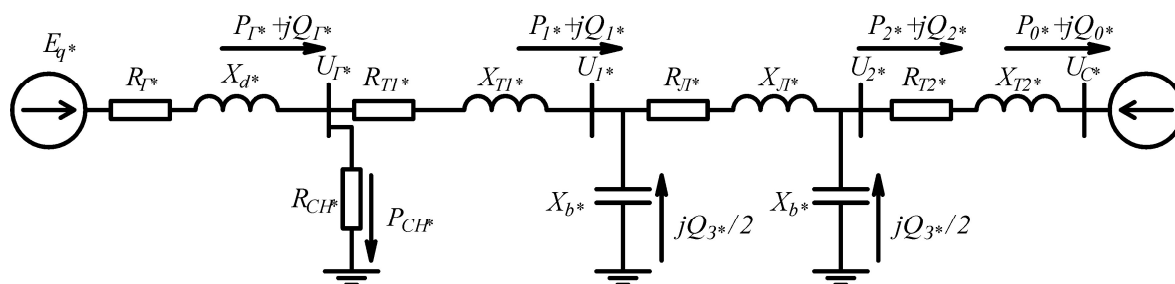


Рис. 2. Схема замещения цепи передачи

Напряжение и мощности в конце цепи передачи в долях базисных величин задавались равными  $U_{C*} = 0,957$ ,  $P_{0*} = 0,416$  и  $Q_{0*} = 0,19$  соответственно. При этом ЭДС генератора и выдаваемые

им мощности составили  $E_{q*} = 2,495$ ,  $P_{0*} = 0,43$  и  $Q_{0*} = 0,261$ , что соответствует его номинальным мощностям при напряжении на выводах, равном  $U_{Г*} = 1,057$ .

Таблица 1

Параметры схемы замещения цепи передачи

Параметры элемента	Параметры схемы замещения
Синхронный генератор	
$P_{Г} = 429$ МВт; $\cos \varphi_{Г} = 0,85$ ; $r_{Г} = 0,0029$ ; $x_d = 1,9065$ о.е.; $x'_d = 0,3628$ о.е.	$S_{Г} = \frac{P_{Г}}{\cos \varphi_{Г}} = \frac{429}{0,85} = 505$ ; $X_{d*} = x_d \cdot \frac{S_{Б}}{S_{Г}} = 1,9065 \cdot \frac{1000}{505} = 3,775$ ; $X'_{d*} = x'_d \cdot \frac{S_{Б}}{S_{Г}} = 0,3628 \cdot \frac{1000}{505} = 0,718$ ; $R_{Г*} = r_{Г} \cdot \frac{S_{Б}}{S_{Г}} = 0,0029 \cdot \frac{1000}{505} = 0,005743$
Собственные нужды генератора	
$P_{СН} = 7$ МВт	$P_{СН*} = \frac{P_{СН}}{S_{Б}} = \frac{7}{1000} = 0,007$
Трансформатор Т1	
$S_{Т1} = 630$ МВА; $U_{ВНном} = 242$ кВ; $U_{ННном} = 20$ кВ; $u_{К1} = 12,5\%$ ; $\Delta P_{К} = 1208,11$ кВт	$X_{Т1*} = \frac{u_{К1}}{100} \cdot \frac{S_{Б}}{S_{Т1}} = \frac{12,5}{100} \cdot \frac{1000}{400} = 0,198$ ; $R_{Т1*} = \frac{\Delta P_{К} \cdot S_{Б}}{S_{Т1}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{1208,11 \cdot 1000}{630^2} \cdot 10^{-3} = 3,044 \cdot 10^{-3}$ ; $k_{Т1} = \frac{U_{ВНном}}{U_{ННном}} = \frac{242}{20} = 12,1$
Линия 220 кВ	
$r_0 = 0,054$ Ом/км; $x_0 = 0,328$ Ом/км; $b_0 = 3,47 \cdot 10^{-6}$ См/км; $L = 50$ км	$R_{ЛС*} = \frac{1}{2} r_0 \cdot L \cdot \frac{S_{Б}}{U_{Л}^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,054 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,026$ ; $X_{ЛС*} = \frac{1}{2} x_0 \cdot L \cdot \frac{S_{Б}}{U_{Л}^2} = \frac{1}{2} \cdot 0,328 \cdot 50 \cdot \frac{1000}{230^2} = 0,155$ ; $X_{b*} = \frac{1}{b_0 \cdot L} \cdot \frac{S_{Б}}{U_{Л}^2} = \frac{1}{3,47 \cdot 10^{-6} \cdot 50} \cdot \frac{1000}{230^2} = 108,954$ ; $Q_{3*} = \frac{2}{X_{b*}} = \frac{2}{108,954} = 0,018$
Трансформатор Т2	
$S_{Т2} = 2500$ МВА; $U_{ВНном} = 230$ кВ; $U_{ННном} = 115$ кВ; $u_{К2} = 11,5\%$ ; $\Delta P_{К} = 4600$ Вт	$X_{Т2*} = \frac{u_{К2}}{100} \cdot \frac{S_{Б}}{S_{Т2}} = \frac{11,5}{100} \cdot \frac{1000}{2500} = 0,046$ ; $R_{Т2*} = \frac{\Delta P_{К} \cdot S_{Б}}{S_{Т2}^2} \cdot 10^{-3} = \frac{4600 \cdot 1000}{2500^2} \cdot 10^{-3} = 4,36 \cdot 10^{-4}$ ; $k_{Т2} = \frac{U_{ВНном}}{U_{ННном}} = \frac{230}{115} = 2$

Для рассматриваемой модели цепи передачи угловая характеристика активной мощности генератора (УХАМ) при отключенном АРВ с учетом активных сопротивлений описывается выражением:

$$P_{Г*}(\delta) = \frac{E_{q*}^2}{Z_{11*}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_{q*} \cdot U_{C*}}{Z_{12*}} \sin(\delta - \alpha_{12}), \quad (1)$$

где  $Z_{11*}$  и  $Z_{12*}$  – собственное и взаимное сопротивления цепи передачи;  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{12}$  – соответствующие сопротивлениям углы;  $\delta$  – угол цепи передачи.

При работе генератора с АРВ пропорционального действия (АРВ ПД) выражение (1) может быть преобразовано к виду:

$$P_{Г*}(\delta) = \frac{E'_{q*}{}^2}{Z_{11*}} \cdot \sin \alpha_{11} + \frac{E'_{q*} \cdot U_{C*} \cdot \cos(\delta_q - \delta'_q)}{Z_{12*}} \sin(\delta - \alpha_{12}) - \frac{U_{C*}^2}{2} \cdot \frac{X_{d*} - X'_{d*}}{|R_{Г*} + jX_{d*} + \dot{Z}_{\Sigma*}| \cdot |R_{Г*} + jX'_{d*} + \dot{Z}_{\Sigma*}|} \sin 2\delta, \quad (2)$$

где  $E'_{q*}$ ,  $\delta'_q$  – переходная ЭДС генератора и соответствующий ей угол цепи передачи;  $\dot{Z}_{\Sigma*}$  – полное эквивалентное сопротивление относительно выводов генератора.

После преобразования схемы замещения и подстановки значений ее параметров в приведенные выше выражения УХАМ при отключенном АРВ принимает вид:

$$P_{Г}(\delta) = 8,56 + 584 \sin(\delta - 0,179^\circ), \text{ МВт}, \quad (3)$$

а при работе с АРВ ПД:

$$P_{Г}(\delta) = 34,12 + 1059 \sin(\delta - 1,128^\circ) - 327,8 \sin 2\delta, \text{ МВт}. \quad (4)$$

Полученные выражения необходимы при анализе статической устойчивости синхронного генератора, так как позволяют судить об условиях его работы и проводить оценку этих условий путем вычисления и сравнения запасов.

**Имитационная модель в пакете MATLAB/Simulink.** Первоначально была собрана математическая модель, общая блок-схема которой приведена на рис. 3. Для этого использовались математические элементы из основной библиотеки «Simulink» и элементы, моделирующие процессы в трехфазных цепях, из дополнительной библиотеки «SimPowerSystems».

На рис. 3 синхронный генератор «SG» моделируется трехфазным элементом «Simplified Synchronous Machine pu Units (SSM)». На входы «Pm» и «E» подаются константы, отвечающие за мощность на валу ротора и ЭДС генератора. Отбор мощности на собственные нужды генератора «AP» выполнен элементом «Three-Phase Series RLC Load». Для моделирования трансформаторов «Т1» и «Т2» применены элементы «Three-Phase Transformer», выполненные в двухобмоточном исполнении со схемами соединения обмоток, как показано на рис. 1. Двухцепная линия представлена в модели двумя параллельными элементами «Three-Phase PI Section Line», обозначенными как «L1» и «L2». В качестве энергосистемы «PS» применен элемент «Three-Phase Source», представляющий собой трехфазный источник питания с неизменной ЭДС.

Измерение режимных параметров цепи в модели реализовано блоками «S1»–«S4». Логическая схема для одного такого блока показана на рис. 4. На схеме по мгновенным значениям фазного тока и фазного напряжения вычисляются действующее значение линейного напряжения  $U(t)$  и величины активной  $P(t)$  и реактивной  $Q(t)$  мощностей, протекающих в цепи.

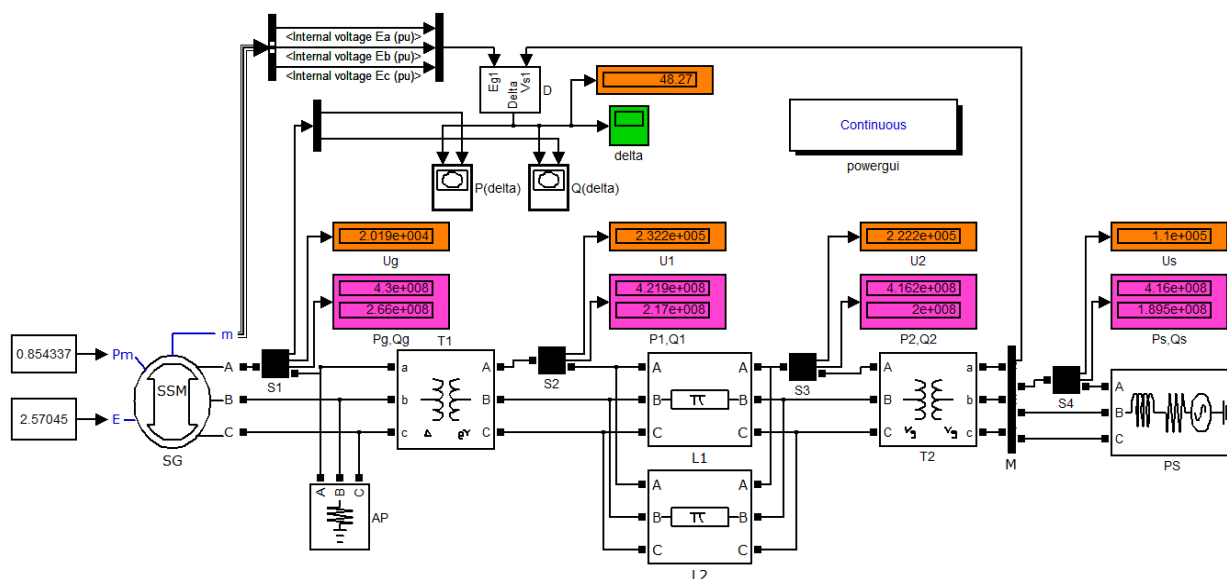


Рис. 3. Модель исследуемой цепи в пакете MATLAB/Simulink

Для измерения угла  $\delta$  собран блок «D», логическая схема которого представлена на рис. 5. В блоке угол цепи передачи «Delta» вычисляется как угловая разница между ЭДС генератора «Eg1» и напряжением энергосистемы «Vs1» с учетом фазосдвигающего действия повышающего трансформатора «T1». Вычисление углов реализовано через блок «3-Phase Sequence analyzer», выделяющий амплитуду и фазу составляющей прямой последовательности основной частоты.

Для удобства величины напряжений в узлах цепи передачи и активной и реактивной мощностей в её ветвях, измеряемые посредством блоков «S1»–«S4», выводятся на экран через элементы «Display». С целью визуализации зависимостей мощностей цепи передачи от угла  $\delta$  использованы графические элементы «XY scope».

Моделирование в MATLAB/Simulink проводилось в два этапа. Первоначально с помощью блока «powergui» (кнопка «Load Flow and Machine Initialization») рассчитывался установившийся режим сети и определялись режимные параметры синхронного генератора, при этом задавались либо активная мощность и напряжение на его выводах, либо его активная и реактивная мощности, как показано на

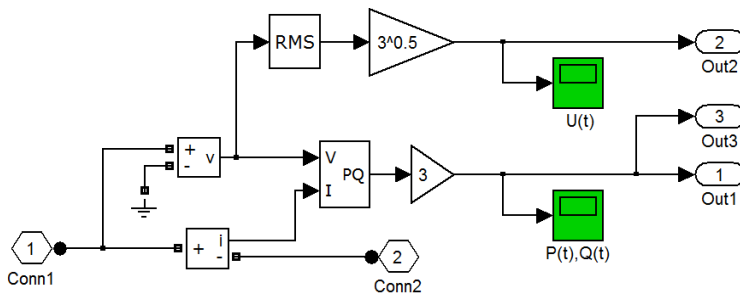


Рис. 4. Блок измерителя мощности и напряжения в электрической цепи

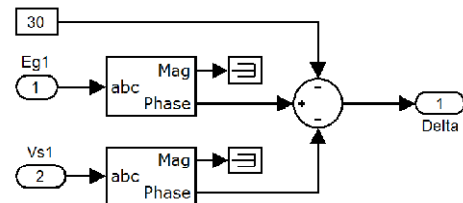


Рис. 5. Блок измерителя угла  $\delta$  цепи передачи

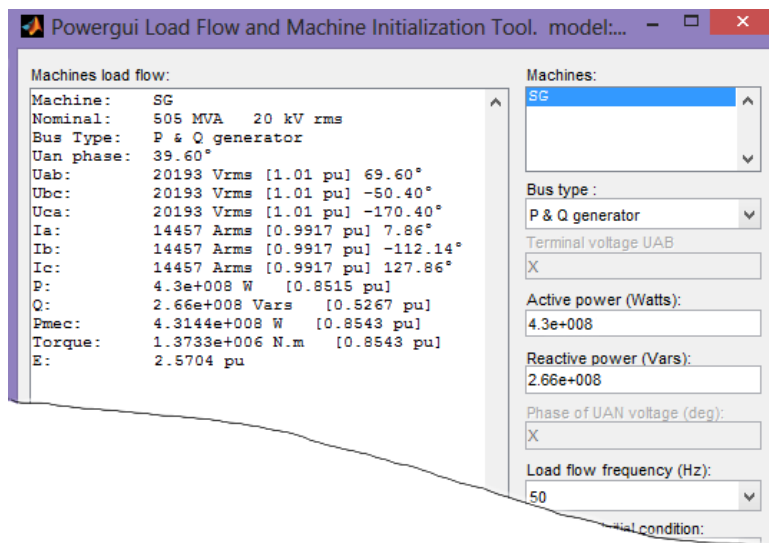


Рис. 6. Окно инициализации параметров генератора в блоке «powergui»

рис. 6. Затем выполнялся расчет мгновенных значений токов и напряжений в обмотках элементов схемы и других параметров в зависимости от времени.

Особое внимание было уделено вопросам выбора и задания параметров элементов имитационной модели, поскольку это представляет наибольший интерес и оказывает существенное влияние на сходимость расчета и результаты моделирования.

**Особенности параметризации отдельных элементов.** В библиотеке «SimPowerSystems» синхронный генератор может моделироваться системами дифференциальных уравнений разных порядков [21]. Наиболее детализированная модель генератора строится на системе уравнений 7-го порядка, получаемой путем предварительных преобразований общеизвестной системы уравнений Парка-Горева, дополненной уравнением движения ротора генератора. Такая модель позволяет проводить углубленный анализ переходных процессов, учитывать влияние демпферных обмоток, а также появление в цепях генератора составляющих токов разных частот. Для анализа статической и динамической устойчивости в пакете предлагается упрощенная модель генератора 3-го порядка с меньшим числом уравнений «Simplified Synchronous

## Электроэнергетика

Machine pu Units (SSM)». Эта модель пренебрегает высшими гармониками и влиянием демпферных контуров, поэтому она была использована в данной работе. Параметры, введенные для генератора в модели, приведены в табл. 2.

В качестве индуктивного сопротивления генератора задавалось синхронное индуктивное сопротивление  $X_d$ . Коэффициент демпфирования и постоянная инерции задавались в соответствии с рекомендациями из работы [11]. При этом последняя величина рассчитывалась через момент инерции следующим образом:

$$H = \frac{T_J}{2} = \frac{2,74 \cdot GD^2 \cdot \omega_{\text{ном}}^2}{2 \cdot P_{\text{ном}}} =$$

$$= \frac{2,74 \cdot 250,67 \cdot 3000^2}{2 \cdot 429 \cdot 10^6} = 7,226 \text{ с,}$$

где  $T_J$  – постоянная инерции всего агрегата, с;  $GD^2$  – момент инерции, т·м<sup>2</sup>;  $P_{\text{ном}}$  – номинальная активная мощность генератора, Вт;  $\omega_{\text{ном}}$  – номинальная частота вращения ротора, об/мин.

Параметры силовых трансформаторов из «SimPowerSystems» задавались в соответствии с рекомендациями, предложенными в работе [18].

При этом для упрощения моделей не учитывалось насыщение их магнитопроводов («Saturable core») и соответственно характеристики намагничивания для них не задавались («Saturation Characteristic»). Параметры элементов вводились в относительных единицах в соответствии с табл. 3.

Отметим, что при задании параметров в относительных единицах индуктивности каждой из обмоток трехфазного трансформатора совпадают с их индуктивными сопротивлениями и для двухобмоточных элементов определяются путем деления пополам напряжения короткого замыкания  $u_K$ . При этом активные сопротивления обмоток могут быть найдены по выражению:

$$R = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta P_K \cdot 10^{-3}}{S_{\text{ном}}},$$

где  $\Delta P_K$  – потери короткого замыкания, кВт;  $S_{\text{ном}}$  – номинальная полная мощность трансформатора, МВА.

Активное сопротивление  $R_m$  и индуктивность  $L_m$  цепи намагничивания в табл. 3 определялись с учетом того, что в моделях MATLAB/Simulink данная цепь представляется параллельным соеди-

Таблица 2

Параметры синхронного генератора «SG»

Параметр	Ед. изм.	Значение
Номинальная полная мощность «Pn(VA)»	ВА	$505 \cdot 10^6$
Номинальное напряжение «Vn(Vrms)»	В	$20 \cdot 10^3$
Частота «fn(Hz)»	Гц	50
Постоянная инерции «H(sec)»	с	7,226
Коэффициент демпфирования «Kd(pu T/pu W)»	–	10
Число пар полюсов «р»	–	1
Активное сопротивление «R(pu)»	о.е.	0,0029
Индуктивное сопротивление «X(pu)»	о.е.	1,9065

Таблица 3

Параметры силовых трансформаторов «Т1» и «Т2»

Параметр	Ед. изм.	Значение	
		«Т1»	«Т2»
Номинальная полная мощность, «Pn(VA)»	ВА	$630 \cdot 10^6$	$2500 \cdot 10^6$
Частота, «fn(Hz)»	Гц	50	50
Параметры стороны ВН			
Схема соединения	–	Yg	Yg
Номинальное напряжение, «V2 Ph-Ph(Vrms)»	В	$242 \cdot 10^3$	$230 \cdot 10^3$
Активное сопротивление, «R2(pu)»	о.е.	0,00192/2	0,00184/2
Индуктивность, «L2(pu)»	о.е.	0,125/2	0,115/2
Параметры стороны НН			
Схема соединения обмоток	–	Delta(D11)	Yg
Номинальное напряжение, «V1 Ph-Ph(Vrms)»	В	$20 \cdot 10^3$	$115 \cdot 10^3$
Активное сопротивление, «R1(pu)»	о.е.	0,00192/2	0,00184/2
Индуктивность, «L1(pu)»	о.е.	0,125/2	0,115/2
Параметры цепи намагничивания			
Активное сопротивление, «Rm(pu)»	о.е.	2680	$10^6$
Индуктивность, «Lm(pu)»	о.е.	1235	$10^6$

нением этих элементов в отличие от схем замещения, описанных в отечественной литературе. Искомые величины в относительных единицах могут быть найдены следующим образом:

$$R_m = \frac{S_{\text{ном}}}{\Delta P_0 \cdot 10^{-3}}, L_m = \frac{100}{I_0},$$

где  $\Delta P_0$  – потери холостого хода, кВт;  $I_0$  – ток холостого хода, %.

Ввиду малого влияния этих величин на потоко-распределение мощностей в схеме замещения, показанной на рис. 2, в математической модели, рассмотренной ранее, они не учитывались. В свою очередь в имитационной модели с этой же целью значения  $R_m$  и  $L_m$  трансформатора связи «Т2» приравнивались к  $10^6$ .

Модель трехфазной линии электропередачи «Three-Phase PI Section Line», реализованная в «SimPowerSystems», учитывает взаимоиндуктивные связи между проводами фаз, их емкостную связь с землей и поэтому требует ввода удельных параметров, таких как активные сопротивления прямой и нулевой последовательностей  $R_1$  и  $R_0$ , индуктивностей этих последовательностей  $L_1$  и  $L_0$  и емкостей  $C_1$  и  $C_0$ , соответственно.

Схема замещения линии с учетом всех трех фаз показана на рис. 7, а. Параметры на схеме связаны следующими соотношениями:

$$R_S = \frac{2R_1 + R_0}{3}, L_S = \frac{2L_1 + L_0}{3}, R_m = \frac{R_0 - R_1}{3},$$

$$L_m = \frac{L_0 - L_1}{3},$$

$$C_p = C_1, C_g = \frac{3C_1 C_0}{C_1 - C_0}.$$

Из соотношений, принятых в программе, следует, что при моделировании симметричных режимов работы схемы параметры нулевой последовательности следует задавать равными параметрам прямой. Тогда схема замещения упрощается до однолинейной, показанной на рис. 7, б. На схеме  $R_S - R_m = R_1$  и  $L_S - L_m = L_1$ , что соответствует ее общеизвестному представлению в расчетах установившихся режимов. В случае моделирования несимметричных режимов, например, несимметричных коротких замыканий, величину  $L_0$  следует скорректировать с учетом наличия грозозащитного троса на линии и его параметров. Например, используя коэффициент  $X_0/X_1$  из работы [22].

Также отметим, что в случае превышения длиной линии 50 км ее сопротивления автоматически корректируются программой по гиперболическим функциям.

Параметры, введенные для линий «L1» и «L2», даны в табл. 4.

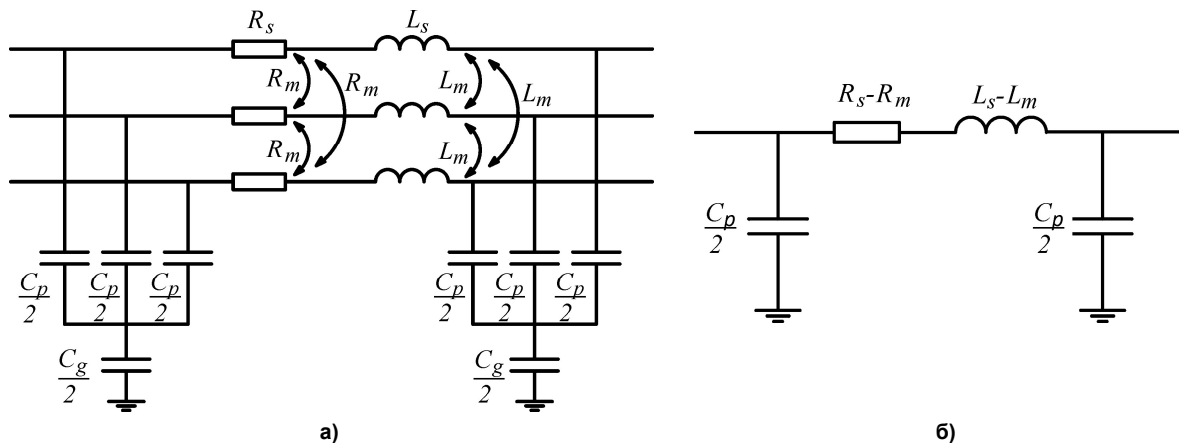


Рис. 7. Схемы замещения линии электропередачи: а – трехфазная схема; б – однолинейная схема

Таблица 4

Параметры линий электропередачи «L1» и «L2»

Параметр	Ед. изм.	Значение
Частота, fn(Hz)	Гц	50
Активное сопротивление ПП, R1(Ohms/km)	Ом/км	0,054
Активное сопротивление НП, R0(Ohms/km)	Ом/км	0,204
Индуктивность ПП, L1(H/km)	Гн/км	$1,044 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность НП, L0(H/km)	Гн/км	$2 \cdot 1,044 \cdot 10^{-3}$
Емкость ПП, C1(F/km)	Ф/км	$11,09 \cdot 10^{-9}$
Емкость НП, C0(F/km)	Ф/км	$11,09 \cdot 10^{-9}$
Длина линии, (km)	км	50

В табл. 5 показаны значения параметров, задававшиеся при параметризации эквивалентной энергосистемы «PS», представленной в работе элементом «Three-Phase Source». Для элемента в программе указывается мощность трехфазного короткого замыкания на его выводах и соответствующее ей базисное напряжение. Так как в математической модели энергосистема была представлена источником бесконечной мощности, то для исключения влияния внутреннего сопротивления энергосистемы в программе её мощность короткого замыкания задавалась как большое значение, при котором сопротивления были бы пренебрежимо малы.

Параметры элемента «Three-Phase Series RLC Load», моделирующего отбор мощности на собственные нужды генератора, вводились в соответствии с табл. 1, при этом указывалась активная мощность, номинальное напряжение и частота сети.

**Оценка результатов моделирования.** Первоначально в собранной в программе схеме была выполнена проверка соответствия напряжений в узлах и потоков мощностей в ветвях значениям, рассчитанным по математической модели. Для этого в пакете были заданы номинальные активная и реактивная мощности синхронного генератора  $P_0 = 430$  МВт и  $Q_0 = 266$  МВар, как было показано на рис. 6, и выполнен расчет установившегося режима. Полученные значения и результаты их сопоставления приведены в табл. 6.

Из сравнения результатов видно, что разница значений не превысила 1%. При этом стоит отметить, что номинальная величина ЭДС генератора в модели составила  $E_{q*} = 2,57$ , это на 2% больше расчетной величины. Из этого следует, что наибольшее отличие режимных параметров будет

обусловлено моделью синхронного генератора и особенностями её реализации в MATLAB/Simulink.

Далее, варьируя параметр «Pm» в имитационной модели, соответствующий мощности на валу ротора генератора, была снята угловая характеристика активной мощности при отключенном АРВ. Для каждого значения активной мощности, выдаваемой генератором, рассчитывался установившийся режим и фиксировалось значение угла  $\delta$ . При этом ЭДС возбуждения «E» в каждой точке была одинакова и равна номинальной. По полученным в итоге точкам строилась экспериментальная зависимость активной мощности генератора от угла  $\delta$ , показанная на рис. 8, а. Там же приведена и расчетная кривая, получающаяся по выражению (3).

Кривая из программы проходит несколько ниже расчетной зависимости, различие между ними не превышает 4% при угле  $\delta = 90^\circ$ , что в дальнейшем будет определять величину запасов статической устойчивости синхронного генератора, найденных по этим кривым.

В завершении было выполнено моделирование режимов работы генератора с сохранением неизменного напряжения на выводах путем регулирования его ЭДС. Для этого при каждом значении активной мощности, выдаваемой генератором, рассчитывался установившийся режим, однако, ЭДС возбуждения не была постоянной, а каждый раз пересчитывалась из условия, что напряжение на выводах элемента остается равным номинальному. В результате была построена кривая, показанная на рис. 8, б, схожая по своей траектории с УХАМ генератора, полученной ранее по выражению (4) для АРВ ПД. Из сравнения графиков видно, что принципиальное отличие между кривыми

Таблица 5

Параметры эквивалентной энергосистемы «PS»

Параметр	Ед. изм.	Значение
Линейное напряжение, (Vrms)	В	$110 \cdot 10^3$
Начальный сдвиг фазы «А», (degrees)	град. эл.	0
Частота, fn(Hz)	Гц	50
Режим нейтрали		Yg
Мощность трехфазного короткого замыкания, (VA)	ВА	$10^{13}$
Базисное напряжение, (Vrms Ph-Ph)	В	$110 \cdot 10^3$
Отношение X/R	–	7

Таблица 6

Сопоставление результатов имитационного моделирования с результатами расчетов по математической модели

Узел	P, МВт		Q, МВар		U, кВ	
	MATLAB	Расчёт	MATLAB	Расчёт	MATLAB	Расчёт
S1	430,00	430,00	266,00	261,00	20,19	20,09
S2	421,90	422,00	217,00	217,00	232,20	232,27
S3	416,20	416,00	200,00	201,00	222,20	222,22
S4	416,00	–	189,50	–	110,00	–
$\Delta$ , %	0,024		0,793		0,178	



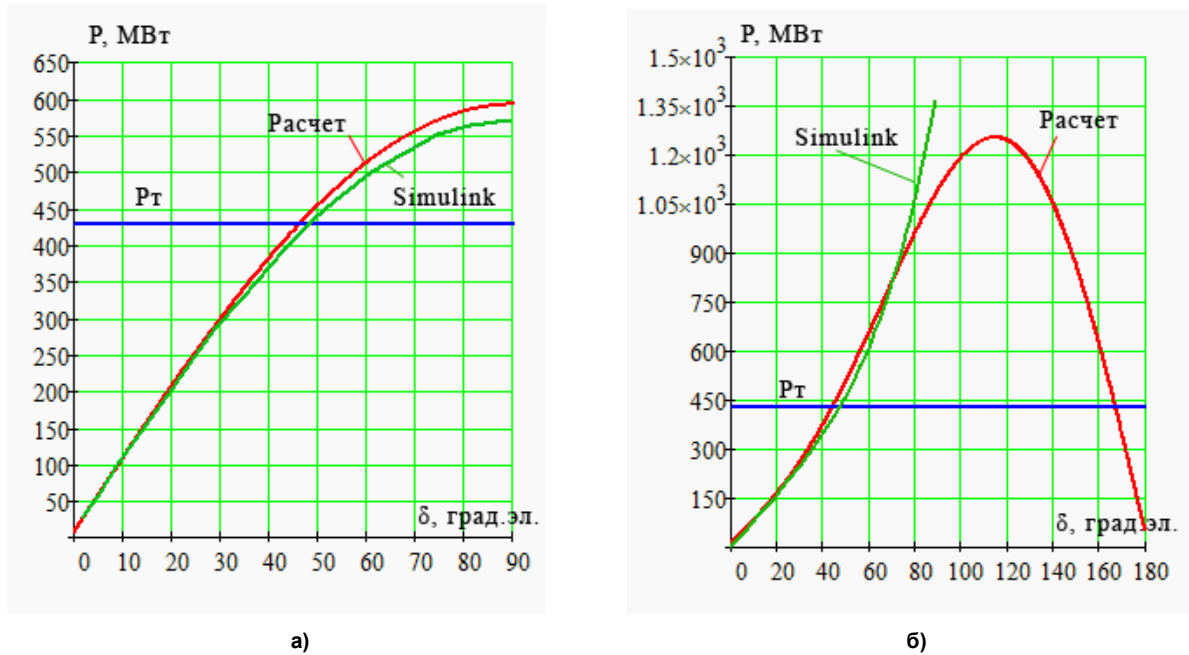


Рис. 8. Угловые характеристики активной мощности: а – при отключенном АРВ; б – при АРВ ПД

начинается только при углах  $\delta > 80^\circ$ , а при меньших углах разница несущественна или практически отсутствует.

#### Заключение

В процессе выполнения работы были достигнуты следующие результаты.

1. В пакете MATLAB/Simulink собрана имитационная модель цепи передачи, включающая синхронный генератор, линию электропередачи, силовые трансформаторы, модули измерений и рассмотрены особенности их реализации.

2. Выполнено моделирование установившегося режима и проведено сравнение режимных параметров и угловой характеристики активной мощности синхронного генератора, полученных в модели, с рассчитанными классическим способом.

3. Рассмотрены особенности параметризации отдельных элементов в пакете MATLAB/Simulink, показан пример ввода параметров и даны некоторые рекомендации.

Таким образом, результаты работы будут полезны при изучении особенностей применения пакета MATLAB/Simulink в решении задач моделирования установившихся и переходных режимов электроэнергетических систем.

#### Литература

1. Горев, А.А. Избранные труды по вопросам устойчивости электрических систем / А.А. Горев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 260 с.
2. Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов; под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
3. Веников, В.А. Переходные электромехани-

ческие процессы в электрических системах / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1978. – 536 с.

4. Гуревич, Ю.Е. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах / Ю.Е. Гуревич, Л.Е. Либова, А.А. Окин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.

5. Бугров, В.Г. Электромеханические переходные процессы в системах электроснабжения: учебное пособие для специальности 100400 «Электроснабжение» / В.Г. Бугров. – Тверь: ТГТУ, 2005. – 115 с.

6. Устойчивость электроэнергетической системы из двух электрических станций с регулируемой продольной компенсацией / В.П. Голов, А.А. Мартиросян, И.А. Москвин, А.А. Виноградова // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 5. – С. 1–7.

7. Калентионик, Е.В. Управление реактивной мощностью генераторов электростанций для повышения устойчивости электроэнергетических систем / Е.В. Калентионик, Ю.Д. Филипчик // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2009. – Вып. 6. – С. 23–30.

8. Илюшин, В.С. О некоторых вопросах оценки устойчивости в предельных режимах электроэнергетических систем / В.С. Илюшин, А.В. Чумаков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2009. – Вып. 1–2. – С. 63–67.

9. Годяцкая, Е.А. Выбор начальных приближений для расчета допустимых по статической устойчивости режимов электроэнергетической системы / Е.А. Годяцкая, К.В. Карташева // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по материалам XI междунар. студ. науч.-практ. конф. № 11. – 2013. – С. 127–134.

10. Москвин, И.А. Колебательная статическая устойчивость электроэнергетической системы с межсистемной связью, содержащей регулируемое устройство продольной компенсации / И.А. Москвин // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 1–5.
11. Забелло, Е. Применение прикладных программ в расчетах режимов и устойчивости работы собственных генерирующих источников при их параллельной работе с энергосистемой / Е. Забелло, В. Тополев // Энергетика и ТЭК. Наука для практики. – 2011. – № 9/10. – С. 20–22.
12. Енин, В.Н. Моделирование переходных процессов и анализ динамической устойчивости синхронных генераторов при воздействии больших возмущений / В.Н. Енин, А.В. Степанов // Наука и образование. – октябрь 2012. – №10. – С. 495–503.
13. Имитационная математическая модель синхронной магнитоэлектрической машины в генераторном режиме в среде Matlab Simulink / Е.В. Волокитина, В.В. Никитин, Ю.Г. Опалев, Ф.Г. Тебеньков // Электроснабжение и электрооборудование. – 2011. – №4. – С. 21–25.
14. Блинов, В.С. Особенности управления электроэнергетической системой с последовательно включенными синхронными генераторами / В.С. Блинов, Нгуен Тхань Хай // Математика и кибернетика – фундаментальные и прикладные аспекты. – 2011. – 3/4 (51). – С. 18–24.
15. Корнеев, В.В. Проектирование синхронного генератора с постоянными магнитами / В.В. Корнеев, А.Г. Приступ // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. XXIII междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2013. – С. 106–113.
16. Математическая модель электроагрегата мини-ТЭЦ на базе явнополюсного синхронного генератора / Г.Я. Вагин, Е.Б. Солнцев, А.М. Мамонов, А.А. Петров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326, № 8. – С. 92–101.
17. Кулешова, Е.О. Моделирование одномашиной энергосистемы с помощью передаточных функций в Matlab/Simulink / Е.О. Кулешова, Н.В. Шишка // Современные проблемы науки и образования – 2013. – № 2. – С. 1–6.
18. Новаиш, И.В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки Matlab/Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И.В. Новаиш, Ю.В. Румянцев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – Вып. 1. – С. 12–24.
19. Коржов А.В. Моделирование схем замещения изоляции кабелей 6(10) кВ для оценки частичных разрядов с учётом режимов их работы в распределительной сети / А.В. Коржов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 32–39. DOI: 10.14529/power150405
20. Хохлов Ю.И. Моделирование электромагнитных процессов в межсистемной компенсированной ЛЭП постоянного тока с примыкающими энергосистемами разных частот / Ю.И. Хохлов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2006. – Вып. 6, № 9. – С. 4–10.
21. Spoljaric, Z. Synchronous generator modeling using Matlab / Z. Spoljaric, K. Miklosevic, V. Jerkovic. – [http://www.academia.edu/9518648/Synchronous\\_Generator\\_Modeling\\_Using\\_Matlab](http://www.academia.edu/9518648/Synchronous_Generator_Modeling_Using_Matlab).
22. RD 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / под ред. Б.Н. Нелкпаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.

**Зарудная Анастасия Павловна**, магистрант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; an.zarudnaya@yandex.ru.

**Горшков Константин Евгеньевич**, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gorshkovke@susu.ru.

*Поступила в редакцию 16 мая 2017 г.*

## FEATURES OF PACKAGE MATLAB/SIMULINK APPLICATION FOR ANALYZING STATIC SUSTAINABILITY OF SYNCHRONOUS GENERATORS IN POWER SYSTEM

A.P. Zarudnaya, an.zarudnaya@yandex.ru,

K.E. Gorshkov, gorshkovke@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

MATLAB/Simulink is widely used for calculation and analysis of stable and transient processes in power systems. For this purpose there is a range of mathematical models in the package which can be applicable to resolving simulation issues. The package models have some distinctive features, and they are different from commonly known ones which makes them harder to use and creates difficulty in configuring them and comparing the results of modeling. In the view of this situation the research in specific features of applying MATLAB/Simulink is of the utmost importance, particularly for the analysis of the static sustainability of synchronous generators working in parallel with the power system.

The paper provides a review of the most widespread elements of the power system, some features of the equivalent circuits which they are based on, and there is also an example of parameterization and some recommendations on how to configure them in the package. The modeling of steady state and the comparison between the regime parameters have also been made. The results might be useful for studying the specific features of application of the package Matlab/Simulink for power engineering, the recommendations presented below may be used for modeling steady and transient regimes of power systems.

*Keywords:* MATLAB/Simulink, modeling, synchronous generator, static sustainability, parameterization of the elements.

### References

1. Gorev A.A. *Izbrannye trudy po voprosam ustoychivosti elektricheskikh system* [Selected Works on Stability of Electrical Systems], Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1960. 260 p.
2. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh system* [Stability Problems of Electric Systems], Moscow, Energiya Publ., 1979. 456 p.
3. Venikov V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient Electromechanical Processes in Electromechanical Systems], Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1978. 536 p.
4. Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. *Raschety ustoychivosti i protivoavariynoy avtomatiki v energosistemakh* [Calculation of Stability and Emergency Automation in Power Systems], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 390 p.
5. Bugrov V.G. *Elektromekhanicheskie perekhodnye protsessy v sistemakh elektrosnabzheniya: Uchebnoe posobie dlya spetsial'nosti 100400 «Elektrosnabzhenie»* [Electromechanical Transient Processes in Power Supply Systems], Tver, Tver State Technical University Publ., 2005. 115 p.
6. Golov V.P., Martirosyan A.A., Moskvina I.A., Vinogradova A.A. [Stability of Electrical Power Engineering System Consisting of Two Electrical Power Stations with Controlled Series Compensation], *Bulletin of the Ivanovo State University*, 2012, no. 5, pp. 1–7. (in Russ.)
7. Kalentionok E.V., Filipchik Yu.D. [Control over Reactive Power of Electric Power Stations for Higher Stability of Electric Power Systems], *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG* [Power Engineering. News of Higher Educational Institutions and CIS Power Engineering Associations], 2009, no. 6, pp. 23–30. (in Russ.)
8. Ilyushin V.S., Chumakov A.V. [About Some Issues of Stability in Limiting Modes of Electropower Systems Estimation], *Izvestiya of the Tula State University. Technical Science*, 2009, no. 1–2, pp. 3–67. (in Russ.)
9. Godyatskaya E.A., Kartasheva K.V. [Choosing Initial Approximations to Calculate Electric Power System Modes Admissible in Terms of Steady State Stability], *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskoe nauki: sb. st. po mat. XI mezhdunar. stud. nauch.-prakt. konf.* [Scientific Community of Students of the XXI Century. Engineering: Collection of Articles on Materials XI Intern. Stud. Scientific-Practical Conf.], no. 11, 2013, pp. 127–134. (in Russ.)
10. Moskvina I.A. [Selection of Controlled Series Capacitor Characteristics Ensuring Oscillatory Steady State Stability]. *Bulletin of the Ivanovo State University*, 2013, no. 5, pp. 1–5. (in Russ.)
11. Zabello E., Topolev V. [Application of Applied Programmes for Calculations of Modes and Work Stability of Own Generating Sources Working in Parallel with Electric Power System]. *Energetika i TEK. Nauka dlya praktiki* [Power Engineering and FEC. Applied Science], 2011, no. 9/10, pp. 20–22. (in Russ.)

12. Enin V.N., Stepanov A.V. [Simulation of Transients and Analysis of Dynamic Stability of Synchronous Generators under the Influence of Large Perturbations], *Education and Science*, 2012, no. 10, pp. 495–503. (in Russ.)
13. Volokitina E.V., Nikitin V.V., Opalev Yu.G., Teben'kov F.G. [Simulation Mathematical Model of Synchronous Magnetoelectric Machine in Generating Mode in Matlab Simulink]. *Elektrosnabzhenie i elektrooborudovanie* [Power Supply and Electric Equipment], 2011, no. 4, pp. 21–25. (in Russ.)
14. Blintsov V.S., Nguen Tkhan' Khay. [Features of Electric Power System Management with Series of Synchronous Generators], *East European Journal of advanced technologies*, 2011, no. 3/4 (51), pp. 18–24. (in Russ.)
15. Korneev V.V., Pristup A.G. [Designing Synchronous Generator with Permanent Magnets]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike: sb. st. po mater. XXIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Technical Sciences – from Theory to Practice. Proc. 23rd Int. correspond. sci.-pract. conf.], Novosibirsk, SibAK Publ., 2013, pp. 106–113. (in Russ.)
16. Vagin G.Ya., Solntsev E.B., Mamonov A.M., Petrov A.A. [Mathematical Model of Mini-CHP Based on Salient-pole Synchronous Generator]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 8, pp. 92–101. (in Russ.)
17. Kuleshova E.O., Shishka N.V. [Simulation of One-Machine Power Supply System in Matlab/Simulink], *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Contemporary Problems of Science and Education], 2013, no. 2, pp. 1–6. (in Russ.)
18. Novash I.V., Rummyantsev Yu.V. [Three-phase Transformer Parameters Calculation Considering Core Saturation for the Matlab-Simulink Transformer Model]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG* [Power Engineering. News of Higher Educational Institutions and CIS Power Engineering Associations], 2015, no. 1, pp. 12–24. (in Russ.)
19. Korzhov A.V. [Modeling Equivalent Circuit Cable Insulation 6 (10) kV for Evaluation of Partial Discharges Taking into Account Operation Mode in Distribution Network]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 4, pp. 32–39. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150405
20. Khokhlov Yu.I. [Modeling of Electro-magnetic Processes in DC Grid Interconnection System with Adjacent Electric Systems of Various Frequencies]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2006, vol. 6, no. 9, pp. 4–10. (in Russ.)
21. Spoljaric Z., Miklosevic K., Jerkovic V. Synchronous Generator Modeling Using Matlab. Available at: [http://www.academia.edu/9518648/Synchronous\\_Generator\\_Modeling\\_Using\\_Matlab](http://www.academia.edu/9518648/Synchronous_Generator_Modeling_Using_Matlab).
22. Neklepaeva B.N. *RD 153-34.0-20.527-98. Rukovodyashchie ukazaniya po raschetu tokov korotkogo замыкания i vyboru elektrooborudovaniya* [Guidance on Calculation of Short-Circuit and Selection of Electrical Equipment], 2002, Moscow, NTs ENAS Publ. 152 p.

Received 16 May 2017

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Зарудная, А.П. Особенности применения пакета MATLAB/Simulink для анализа статической устойчивости синхронных генераторов в энергосистеме / А.П. Зарудная, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 43–54. DOI: 10.14529/power170305

### FOR CITATION

Zarudnaya A.P., Gorshkov K.E. Features of Package MATLAB/Simulink Application for Analyzing Static Sustainability of Synchronous Generators in Power System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 43–54. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170305