

**ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТЕЙШЕЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ОБЪЕКТНО ОРИЕНТИРОВАННОЙ
СРЕДЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ DELPHI**

Л. Л. Латушкина

Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета
Российская Федерация, 655017, г. Абакан, ул. Щетинкина, 27
E-mail: Latush2003@mail.ru

Рассматриваются материалы по созданию программной разработки для выполнения анализа динамической устойчивости простейшей регулируемой электрической системы. Цель разработки – проанализировать динамическую устойчивость электропередачи простейшей электрической системы при появлении симметричных коротких замыканий (КЗ) на воздушной линии, а также рассмотреть изменения устойчивости при варьировании мощности нагрузки в заданной схеме, изменении длины воздушной линии и изменении конфигурации схемы с двумя трансформаторами на схему с одним трансформатором. Решение задачи анализа динамической устойчивости электроэнергетической системы осуществляется в объектно ориентированной среде программирования Delphi. Также дана оценка существующих программ по расчету динамической устойчивости электрических схем, рассмотрена возможность их применения для решения поставленной задачи. Рассмотрены постановка и условие задачи по оценке динамической устойчивости простейшей электрической системы, кратко рассмотрена методика определения угла предельного отключения генератора, показана реализация поставленной задачи, рассмотрен принцип работы созданного приложения, а также основные рабочие окна, работа с ними и сделаны выводы по работе. Планируется расширение программы: применение её к расчету по оценке динамической устойчивости при несимметричных коротких замыканиях в воздушной линии.

Ключевые слова: программа, Delphi, динамическая устойчивость.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 331–337

**ASSESSMENT OF DYNAMIC STABILITY OF A SIMPLE POWER SYSTEM
IN AN OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING ENVIRONMENT DELPHI**

L. L. Latushkina

Khakassia Technical Institute, branch of Siberian Federal University
27, Shchetinkina Str., Abakan, 655017, Russian Federation
E-mail: Latush2003@mail.ru

This article discusses the materials for creating a software development for analysis of dynamic stability of a simple adjustable electrical system. The aim of development is to assess the dynamic stability of power transmission the simplest electrical system by the appearance of symmetrical short circuit (SC) on the air line, as well as to consider changes resistance with the variation of load power in a given schema, the change in long air line and change the configuration schema with two transformers one transformer. The solution of the problem of analysis of dynamic stability of power system is implemented in an object-oriented programming environment Delphi. The article also provides an assessment of existing programs for the calculation of dynamic stability of electric circuits, the possibility of their application for solving the task. The article deals with the formulation and condition assessment objectives dynamic stability of the simplest electrical system, briefly considered the method of determining the angle limit disable the generator, shows the implementation of the tasks and the working principle of the application, the main working window, work with them and the conclusions. We plan to expand the program: its application to the calculation of the assessment of dynamic stability with asymmetrical short circuits in the power lines.

Keywords: software, Delphi, dynamic stability.

Введение. Возникновение токов коротких замыканий возможно в любой электроэнергетической системе. Электромеханические переходные процессы, воз-

никающие при этом, относятся к вопросам динамики электроэнергетической системы, оценка поведения которой требует выработки мероприятий по улучшению

её устойчивости. Достоверный анализ устойчивости может быть получен посредством применения информационных технологий, созданных на основе современных языков программирования.

Постановка задачи для программной разработки.

Необходимость оценки динамической устойчивости систем полезна в учебно-научной деятельности студентов [1–4]. Тема анализа динамической устойчивости простейшей регулируемой электрической системы относится к дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» [5; 6]. Для проведения студентами анализа динамической устойчивости простейшей регулируемой электрической системы в 1998 г. была написана программа на языке Pascal [7]. Но прогресс не стоит на месте, поэтому, когда в компьютерных классах сменили OS Windows XP на Windows 8, программа оказалась неработоспособной и встала необходимость в другой программе для анализа динамической устойчивости простейшей схемы.

Требования к программе: простота и понятность интерфейса, возможность внесения различных данных и изменений, дешевизна и доступность программы, программа должна работать в условиях локальной сети в компьютерных классах, выполнять оценку динамической устойчивости системы простейшей электрической сети [8].

В практической деятельности инженера интерес представляет наглядная картина процесса, где бы пользователь мог находить угол предельного отключения сам, видя площади ускорения и торможения при введении любого угла отключения и ориентируясь на полученную картинку, мог бы делать изменения этого угла и так последовательно приближаться к желаемому результату [9]. Также для корректной работы программы необходима защита от неправильного ввода исходных данных, в частности, ввода угла отключения менее начального. Не менее важно создать простой и понятный интерфейс и осуществить защиту от невнимательности пользователя. Программа должна корректно работать при внесении изменений, предусмотренных постановкой задачи и проведением необходимых исследований, таким образом обеспечивая получение необходимых навыков и знаний для пользователя.

Оценка существующих программ показала, что подходящих альтернатив для решения этой задачи нет [10]. Рассмотрим подробнее возможности некоторых существующих программ.

Программное обеспечение (ПО) DIgSILENT PowerFactory предназначено для анализа и планирования режимов работы электрических сетей и систем. На сегодняшний день ПО DIgSILENT PowerFactory является одним из лидеров среди систем для анализа и планирования режимов работы электрических сетей и систем. PowerFactory включает постоянно растущий перечень поддерживаемых функций для решения прикладных задач. Вот некоторые из них: расчет симметричных и несимметричных установившихся режимов, токов короткого замыкания (КЗ) для одно-, двух- или трехфазных сетей произвольной конфигурации переменного и постоянного тока; моделирование электромагнитных и электромеханических пере-

ходных процессов, расчеты статической и динамической устойчивости; создание пользовательских моделей регуляторов, например автоматического регулирования возбуждения, и идентификация их параметров по данным натуральных испытаний; моделирование и анализ утяжеленных и аварийных режимов [11; 12].

Программный комплекс MUSTANG предназначен для оперативного выполнения на ПЭВМ типа IBM-PC моделей 486 и выше расчетов по моделированию установившихся и переходных электромеханических режимов энергосистем. К достоинствам комплекса можно отнести возможность моделирования электромеханических переходных процессов. В состав комплекса также входит модуль «Утяжеление», который служит для определения предела передаваемой активной мощности и вычисления нормируемого коэффициента запаса статической устойчивости по активной мощности [13].

По мнению автора, несмотря на широкую функциональность подобных программ, для реализации имеющихся практических задач возникают все же некоторые сложности при желании внедрить их в учебный процесс, а именно:

- приобретение и установка программы в учебный компьютерный класс может быть достаточно дорогостоящей, и при этом программа должна работать в условиях локальной сети;
- на освоение и знакомство с интерфейсом программы может уйти учебного времени больше, чем на сам процесс получения основных понятий о динамической устойчивости;
- существующие программы предназначены для исследования сложных схем, а поставленные учебные цели должны реализовываться за ограниченное число часов [14].

Подводя итоги, можно сказать, что необходимой лаконичной, простой в понимании интерфейса и доступной программы для решения поставленной задачи нет. В связи с этим для решения задачи оценки динамической устойчивости простейшей электроэнергетической системы при симметричном коротком замыкании на воздушной линии и использования ее в лабораторном практикуме была написана программа в объектно ориентированной среде программирования Borland Delphi 7 [15; 16].

Условие задачи оценки динамической устойчивости. В качестве простейшей схемы взята схема типа «станция – шины неизменного напряжения», состоящая из следующих элементов: генератор, трансформатор, двухцепная линия электропередачи (ЛЭП), нагрузка.

Более распространенным считают появление на одной из цепей воздушной линии симметричного короткого замыкания с последующим его отключением, в связи с этим необходимо рассмотреть следующие режимы: I – нормальный; II – послеаварийный; III – аварийный, т. е. переход от нормального режима I к аварийному III и далее к послеаварийному II.

Анализ динамической устойчивости представленной сети необходимо выполнить при условии постоянства напряжения на шинах системы графическим методом [17].

Для анализа динамической устойчивости схемы необходимо определить угол предельного отключения короткого замыкания:

- в середине линии;
- в начале (конце) линии;
- для различных случаев вариаций параметров и событий:

- при изменении схемы на однострансформаторную;
- при изменении длины линии;
- при изменении мощности нагрузки [18].

Методика определения угла предельного отключения [17]. Графический метод состоит в сравнении площадок ускорения и торможения генератора, получаемых аналитическим путем. Для определения этих площадей необходимо построить характеристики мощности генератора $P = f(\delta)$ для различных режимов работы сети. Их можно получить из уравнения

$$P^k = \frac{E_\Gamma U_c}{X_c^k} \sin \delta,$$

где E_Γ и U_c – соответственно ЭДС генератора и напряжение системы; δ – угол между векторами E_Γ и U_c ; X_c – реактивное сопротивление сети; k – индекс рассматриваемого режима.

В качестве рассматриваемых режимов берут:

- I – нормальный режим;
- II – послеаварийный;
- III – аварийный.

Реактивное сопротивление сети определяют по суммарному выражению для заданной схемы, учитывая режим сети.

Угол предельного отключения (в радианах) может быть рассчитан как

$$\delta_{\text{отк. пр}} = \arccos \frac{P_0 (\delta_{\text{кр}} - \delta_0) \frac{\pi}{180} + P_{\text{мII}} \cos \delta_{\text{кр}} - P_{\text{мIII}} \cos \delta_0}{P_{\text{мII}} - P_{\text{мIII}}},$$

где $\delta_0 = \arcsin \frac{P_0 X_{\text{с норм}}}{E_{\text{норм}}}$ – начальный угол;

$\delta_{\text{кр}} = \pi - \arcsin \frac{P_0}{P_{\text{мII}}}$ – критический угол.

Площади ускорения и торможения можно определить по следующим формулам соответственно:

$$A_{\text{уск}} = \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{отк}}} (P_0 - P_{\text{III}}) d\delta;$$

$$A_{\text{торм}} = \int_{\delta_{\text{отк}}}^{\delta_{\text{кр}}} (P_{\text{II}} - P_0) d\delta.$$

Реализация задачи в объектно ориентированной среде программирования Delphi. Задача анализа динамической устойчивости системы простейшей электрической сети в процессе обучения студентов реализуется в лабораторном практикуме по дисциплине «Переходные процессы в ЭЭС». С его помощью

студент приобретает необходимые для усвоения принципиальные понятия, и именно с их помощью закладывается понимание физических закономерностей в какой-либо конкретной области. Лабораторный практикум по данной дисциплине удобнее реализовывать в компьютерном классе. В связи с этим и задача анализа динамической устойчивости системы простейшей электрической сети реализуется в программной разработке.

Программа разрабатывалась в объектно ориентированной среде программирования Delphi 7. В интерфейсе приложения предусмотрена работа с набором форм. Всего программа содержит 6 форм (окон) размером 928 на 259 пикселей, предназначенных для какой-либо цели.

Первая форма является окном приветствия, выводит на экран название и логотип института, лабораторной работы, имя автора, содержит в себе кнопку для продолжения работы.

Вторая форма «Выбор схемы» используется пользователем для выбора схемы сети (два варианта) в соответствии с заданием преподавателя (рис. 1). Форма содержит 2 рисунка, 2 радиокнопки, кнопку для продолжения, которая не будет работать, если не выбран ни один из вариантов схемы.

Третья форма «Выбор места КЗ» аналогична второй по структуре, на ней согласно заданию преподавателя выбирается место возникновения короткого замыкания и варианты включения выбранной схемы с одним трансформатором (рис. 2).

Четвёртая и пятая формы являются окнами для ввода данных, выданных преподавателем. Они содержат в себе окна типа «Tedit» для ввода исходных данных для заданной схемы, а также кнопки для продолжения и возврата на предыдущее окно и получения результата расчетных данных. После нажатия кнопки «Рассчитать сопротивления» на окно выводятся результаты расчета сопротивлений элементов схемы и суммарные сопротивления сети для разных режимов (рис. 3). Этой же формой следует воспользоваться при изменении длины линии.

Шестая форма «Определение угла предельного отключения» необходима для построения графиков характеристик при возникновении трёхфазного КЗ. Она содержит холст, на котором рисуются графики, окно типа «Tedit» для ввода угла отключения и две кнопки взаимодействия с программой, а также кнопку закрытия приложения.

Рассмотрим принцип работы формы 6 приложения. При нажатии на кнопку «Построить характеристики» появляется система координат с характеристиками режимов и P_0 и основные их параметры (рис. 4).

Ниже в окне пользователем вводится угол отключения в диапазоне от δ_0 до $\delta_{\text{кр}}$. После ввода угла и нажатия кнопки «Рассчитать площади» закрашиваются площади ускорения и торможения для введенного угла отключения (рис. 5) соответственно в зеленый и синий цвета, результаты вычислений значений величин площадей (для сравнения пользователем) выводятся ниже в соответствующую текстовую область формы. Если угол введен некорректно, на окно выводится сообщение-подсказка.

После сопоставления значений величин площадей пользователь вводит другое значение угла отключения,

подбирая в итоге такой, чтобы площади были равны (рис. 6). Этот угол и будет являться углом предельного отключения.

Далее процесс повторяют для заданных изменений. По полученным данным делают оценку динамической устойчивости электроэнергетической системы.

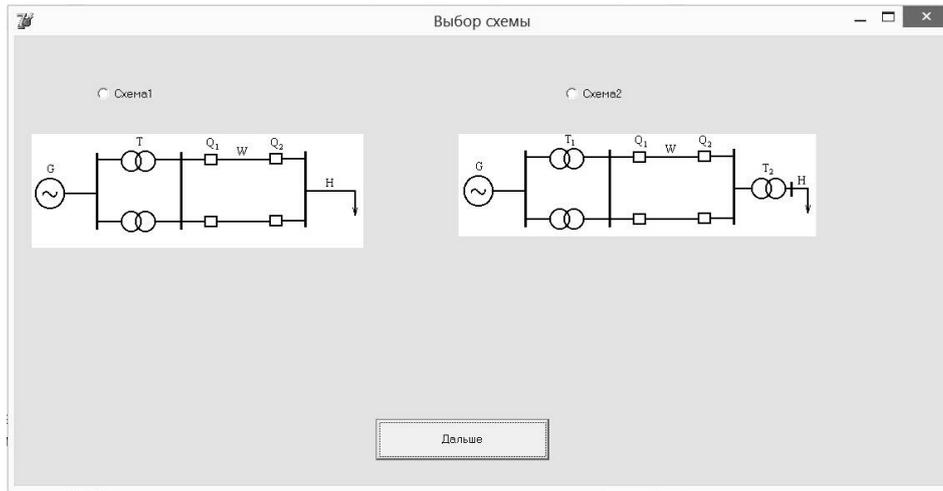


Рис. 1. Форма 2 приложения

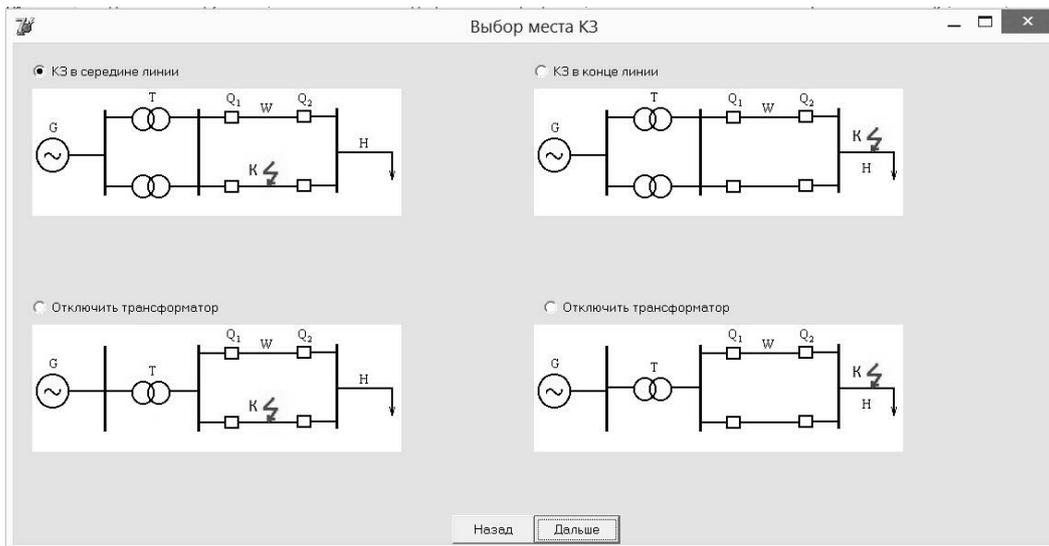


Рис. 2. Форма 3 приложения

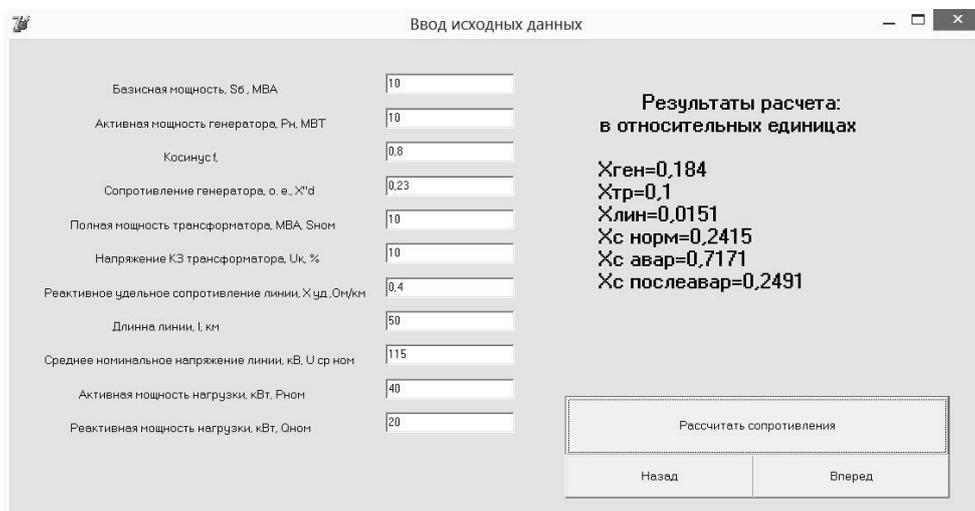


Рис. 3. Форма 5 приложения

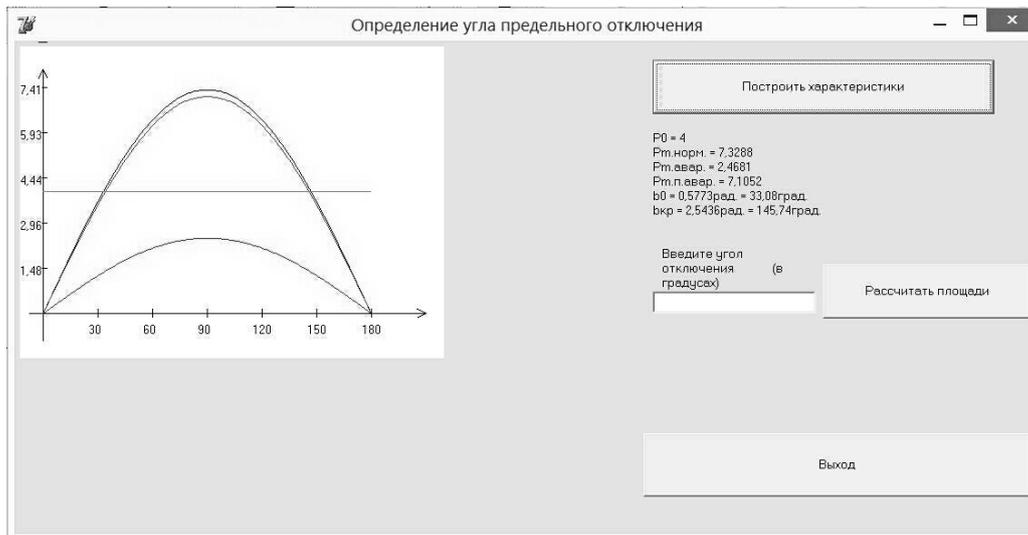


Рис. 4. Форма 6 приложения (система координат)

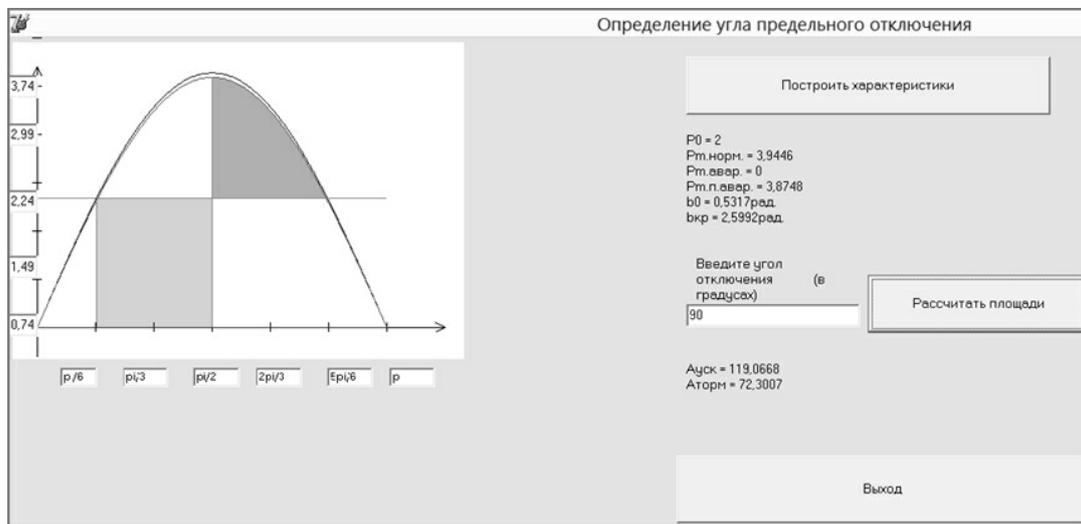


Рис. 5. Форма 6 приложения (расчет площадей для введенного угла отклонения)

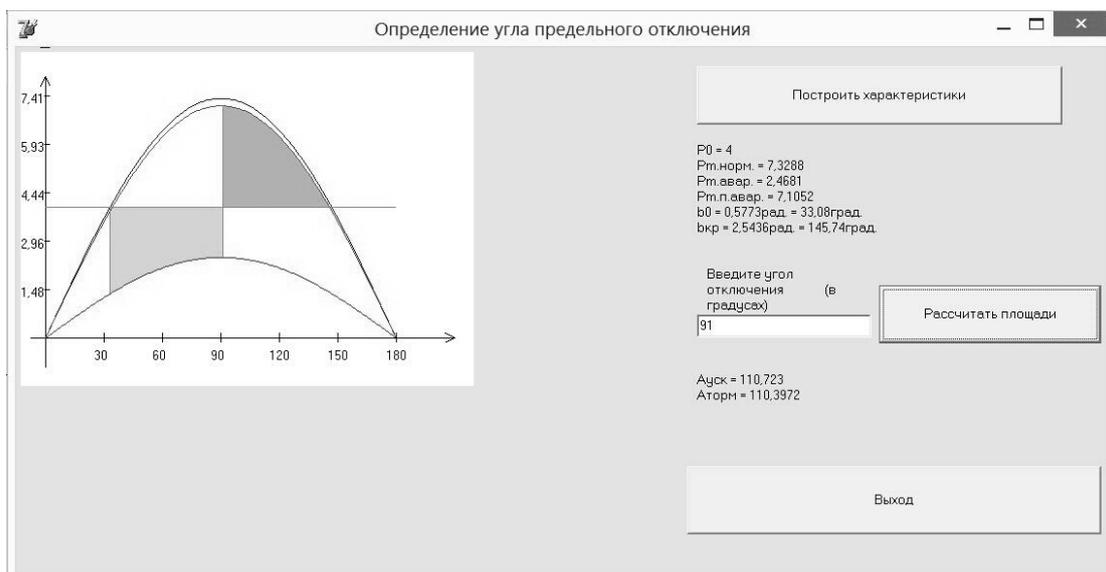


Рис. 6. Форма 6 приложения (подбор угла предельного отклонения)

Заключение. Программная реализация задачи оценки динамической устойчивости электроэнергетических систем позволяет графически отразить динамику процесса, определить угол предельного отключения генератора при симметричных коротких замыканиях для заданных изменений: места короткого замыкания, разных конфигураций схем и исходных параметров сети. Программа работает корректно и выполнена с учетом всех поставленных целей для учебного процесса. Программная разработка имеет простой и понятный интерфейс, защиту от неправильного ввода данных и защиту от невнимательности пользователя, в ней осуществляется наглядный процесс анализируемой динамики устойчивости. Планируется расширение программы для возможности применения её к расчету несимметричных КЗ.

Библиографические ссылки

1. Dalibor Filipović-Grčić, Božidar Filipović-Grčić, Kosjenka Capuder. Modeling of three-phase autotransformer for short-circuit studies // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014, Vol. 56. P. 228–234.
2. Jinxin Ouyang, Xiaofu Xiong. Research on short-circuit current of doubly fed induction generator under non-deep voltage drop // *Electric Power Systems*. 2014. Vol. 107. P. 158–166.
3. Enhance power system transient voltage stability by difference coefficient of generator excitation system optimization / W. Sun [et al.] // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1008–1009. P. 409–416.
4. Transient stability study of distributed induction generators using an improved steady-state equivalent circuit method. Source of the Document / N. Zhou [et al.] // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2014. Vol. 29 (2), 6632970. P. 608–616.
5. Платонова Е. В., Елизарьева Л. Л. Новые методические и программные разработки при организации лабораторного практикума с использованием ПЭВМ // *Интеллектуальные ресурсы ХТИ – филиала КГТУ Хакасии* : тезисы докладов второй региональной науч.-практ. конф. Абакан, 1999. С. 78–79.
6. Платонова Е. В., Хохрякова Е. Н., Елизарьева Л. Л. Информационные технологии в подготовке инженеро-электриков // *Образовательные технологии: состояние и перспективы* : тр. науч.-метод. конф. Томск, 1999. С. 129–130.
7. Платонова Е. В., Елизарьева Л. Л. Применение математических моделей для расчетов и анализа переходных процессов в электроэнергетических системах // *Вестник ХТИ КГТУ*. 1998. № 4. С. 49–57.
8. Federico Milano, Kailash Srivastava. Dynamic REI equivalents for short circuit and transient stability analyses // *Electric Power Systems Research*. 2009. Vol. 79, iss. 6. P. 878–887.
9. Zhenhua Wang Dynamic estimation of rotor angle deviation of a generator in multi-machine power systems // *Electric Power Systems Research*. 2013. Vol. 97. P. 1–9.
10. Anya Castillo. Risk analysis and management in power outage and restoration: A literature survey // *Electric Power Systems*. 2014. Vol. 107. P. 9–15.

11. Программа DIgSILENT PowerFactory [Электронный ресурс]. URL: <http://regimov.net/content.php/79-DIGSILENT-PowerFactory> (дата обращения: 28.06.2014).
12. Thekla N. Boutsika, Stavros A. Papathanassiou. Short-circuit calculations in networks with distributed generation // *Electric Power Systems Research*. 2008. Vol. 78, iss. 7. P. 1181–1191.
13. Программа MUSTANG [Электронный ресурс]. URL: <http://regimov.net/content.php/73-MUSTANG> (дата обращения: 28.06.2014).
14. Iván García-Magariño. A collection of method fragments automated with model transformations in agent-oriented modeling // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2013. Vol. 26, iss. 3. P. 1131–1148.
15. An object-oriented framework applied to the study of electromechanical oscillations at Tucuruí hydroelectric power plant / José A. S. Sena [et al.] // *Electric Power Systems Research*. 2011. Vol. 21. P. 2081–2087.
16. Wang J., Lü Q., Liu H. Reactive power optimization software design based on hybrid programming of Delphi and Matlab for distribution system // *Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment*. 2011. Vol. 31 (4). P. 112–115.
17. Куликов Ю. А. Переходные процессы в электрических системах. Новосибирск : НГТУ ; М. : Мир : АСТ, 2003. 283 с.
18. Enrique A. Zamora-Cárdenas, Claudio R. Fuerte-Esquivel. Computation of multi-parameter sensitivities of equilibrium points in electric power systems // *Electric Power Systems Research*. 2013. Vol. 96. P. 246–254.

References

1. Dalibor Filipović-Grčić, Božidar Filipović-Grčić, Kosjenka Capuder. Modeling of three-phase autotransformer for short-circuit studies. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, Vol. 56, March, P. 228–234.
2. Jinxin Ouyang, Xiaofu Xiong. Research on short-circuit current of doubly fed induction generator under non-deep voltage drop. *Electric Power Systems*, 2014, Vol. 107, February, P. 158–166.
3. Sun W., Su Y. S., Zhang J. F., Li X. M. Enhance power system transient voltage stability by difference coefficient of generator excitation system optimization. *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 1008–1009, P. 409–416.
4. Zhou N., Wang P., Wang Q., Loh P. C. Transient stability study of distributed induction generators using an improved steady-state equivalent circuit method. Source of the Document. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, Vol. 29 (2), 6632970, P. 608–616.
5. Platonova E. V., Elizarieva L. L. [New methodological and program development at the organization of laboratory practical work using PC]. *Tezisy dokladov vtoroy regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Intelektual'nye resursy Khakassii"* [Proc. 2th reg. scientific-practical Symp. "Intellectual resources KTI – KSTU branch of Khakassia"]. Abakan, 1999, P. 78–79 (In Russ.).

6. Platonova E. V., Khokhryakova E. N., Elizariyeva L. L. [Information technologies in training of engineers-electricians]. *Proc. Nauchno-methodicheskoy konferentsii "Obrazovatel'nye tehnologii: sostoyanie i perspektivy"* [Proc. Scientific-methodical conference "Educational technology: status and prospects"]. Tomsk, 1999, P. 129–130 (In Russ.).
7. Platonova E. V., Elizariyeva L. L. [Application of mathematical models for simulation and analysis of transient processes in power systems]. *Vestnik KhTI KGTU*. 1998, No. 4, P. 49–57 (In Russ.).
8. Federico Milano, Kailash Srivastava. Dynamic REI equivalents for short circuit and transient stability analyses. *Electric Power Systems Research*, 2009, Vol. 79, Iss. 6, June, P. 878–887.
9. Zhenhua Wang, Elham B. Makram, Ganesh Kumar Venayagamoorthy, Chaoqi Ji. Dynamic estimation of rotor angle deviation of a generator in multi-machine power systems. *Electric Power Systems Research*, 2013, Vol. 97, April, P. 1–9.
10. Anya Castillo. Risk analysis and management in power outage and restoration: A literature survey. *Electric Power Systems*, 2014, Vol. 107, February, P. 9–15.
11. Regimov.net. *Programma DIgSILENT PowerFactory* [Program DIgSILENT PowerFactory] (In Russ.). Available at: <http://regimov.net/content.php/79-DIGSILENT-PowerFactory> (accessed 18 March 2012).
12. Thekla N. Boutsika, Stavros A. Papathanassiou. Short-circuit calculations in networks with distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 2008, Vol. 78, Iss. 7, July, P. 1181–1191.
13. Regimov.net. *Programma MUSTANG* [Program MUSTANG] (In Russ.). Available at: <http://regimov.net/content.php/73-MUSTANG> (accessed 18 March 2012).
14. Iván García-Magariño. A collection of method fragments automated with model transformations in agent-oriented modeling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, Vol. 26, Iss. 3, March, P. 1131–1148.
15. José A. S. Sena, Maria C. P. Fonseca, Italo F. Di Paolo, Walter Barra Jr., José A. L. Barreiros, Carlos T. Costa Jr., Fabrício G. Nogueira. An object-oriented framework applied to the study of electromechanical oscillations at Tucuruí hydroelectric power plant. *Electric Power Systems Research*, 2011, Vol. 21, December, P. 2081–2087.
16. Wang J., Lü Q., Liu H. Reactive power optimization software design based on hybrid programming of Delphi and Matlab for distribution system. *Dianli Zidonghua Shebei/Electric Power Automation Equipment*, 2011, Vol. 31 (4), P. 112–115.
17. Kulikov Yu. A. *Perekhodnie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient processes in power systems]. Novosibirsk, NGTU, Moscow, Mir Publ., AST Publ., 2003, 283 p.
18. Enrique A. Zamora-Cárdenas, Claudio R. Fuerte-Esquivel. Computation of multi-parameter sensitivities of equilibrium points in electric power systems. *Electric Power Systems Research*, 2013, Vol. 96, March, P. 246–254.