

## Моделирование переходных процессов ЭЭС в ИСМА Modeling and simulation of transients in EPS using ISMA

*Аннотация.* Рассмотрены возможности моделирования переходных процессов в электроэнергетических системах в рамках программного комплекса ИСМА. В качестве иллюстрации компьютерного моделирования рассмотрена реальная электроэнергетическая схема. Продемонстрированы результаты эксперимента с тестовой системой, доказывающие корректность использованного подхода.

*Ключевые слова.*

Электромагнитные переходные процессы, электромеханические переходные процессы, моделирование электроэнергетических систем, ИСМА, гибридные системы.

*Abstract.* The ISMA's features for modeling and simulation of electrical power systems are described. A real electrical power system is given to illustrate modeling and simulation. Results of an experiment proving the correctness of the approach used are presented.

*Keywords.*

Electromagnetic transients, electromechanical transients, modeling and simulation of an electrical power system, ISMA, hybrid systems.

### **Введение**

При проектировании новой или модернизации старой электроэнергетической системы (ЭЭС) особое внимание уделяют исследованию переходных процессов [1], возникновение которых может быть связано как с нормальным функционированием системы (например, изменение нагрузок потребителей), так и с аварийными ситуациями (обрыв

линии электропередачи, выход из строя синхронной машины и т.д.). Подобные события приводят к изменению режима функционирования системы, поведение которой может быть исследовано с помощью методов теории гибридных систем (ГС) [2].

Теория ГС – это современный аппарат для математического описания сложных динамических процессов в системах различной физической природы (механических, электрических, химических, биологических и т.п.). Такие системы характеризуются разрывами в первых производных фазовых переменных. Поведение ГС может быть естественно описано как последовательная смена непрерывных режимов [3]. Каждый режим задаётся системой дифференциально-алгебраических уравнений с ограничениями

$$\begin{aligned}y' &= f(x, y, t), \\x &= \varphi(x, y, t), \\pr &: g(y, t) < 0, \\t &\in [t_0; t_k], \\x(t_0) &= x_0, \\y(t_0) &= y_0,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $x \in R^{N_x}, y \in R^{N_y}, t \in R, f : R^{N_x} \times R^{N_y} \times R \rightarrow R^{N_y}, g : R^{N_y} \times R \rightarrow R$ .

Ограничения на, так называемую, событийную функцию  $g(y, t) < 0$  означают, что фазовая траектория в текущем состоянии не должна пересекать границу режима  $g(y, t) = 0$ . Локальные состояния ГС определяются предикатом  $pr$ . Система продолжает находиться в текущем состоянии, пока  $pr = true$ . События, приводящие к нарушению этого условия и приводящие к переходу в другое состояние без пересечения границы, называются односторонними [3]. Такие события представляют практический интерес при исследовании и будут рассматриваться ниже.

Для предметного специалиста, работающего с моделью ЭЭС, важна возможность быстрого изменения принципиальной схемы, добавления или удаления элементов, изменения их параметров и переходные следствия этих изменений. Редактирование крупной текстовой модели требует больших затрат времени и повышает вероятность ошибок. В подобных случаях работа

с графической принципиальной схемой является предпочтительной, практически необходимой. Используемые в инженерной практике современные программные средства инструментального анализа ЭЭС, такие как RastrWin [4], АНАРЭС [5], EUROSTAG [6], SimPowerSystems [7] и др., построены на традиционном математическом обеспечении и не используют гибридную методологию. Поэтому задача разработки средств моделирования переходных процессов в ЭЭС с применением современных математических формализмов и алгоритмов является актуальной.

## **1 Особенности ИСМА**

ИСМА (Инструментальные Средства Машинного Анализа) [8] – программный комплекс для инструментального анализа гетерогенных гибридных систем. Любая модель в ИСМА является гибридной системой. Спецификация моделей выполняется на символьном языке и языке структурных схем теории автоматического управления.

Для решения жёстких задач, к классу которых относятся модели ЭЭС, в ИСМА включены оригинальные явные одношаговые методы с расширенной областью устойчивости и с контролем точности и устойчивости [9], методы с переменным числом стадий и адаптивный метод DISPF\_RADAU5 [3] с переменной структурой и порядком. В то время как в мировой практике принято использовать неявные численные схемы для интегрирования жёстких систем. Использование абсолютно устойчивых схем связано с некоторыми сложностями. В частности, это приводит к повышенным требованиям к объёму оперативной памяти для хранения матрицы Якоби и к вычислительным ресурсам, необходимым для декомпозиции этой матрицы на каждом шаге интегрирования. В работе [10] показана ограниченная применимость неявных методов при моделировании систем с разрывами первого рода в первых производных фазовых переменных.

Исследование систем вида (1) возможно только при корректном определении моментов изменений локальных состояний ГС. Поэтому при

численном анализе необходимо контролировать не только точность и устойчивость численной схемы, но и поведение событийной функции. В ИСМА имеется оригинальный алгоритм обнаружения событий [3], управляющий шагом интегрирования таким образом, что решение системы асимптотически приближается к границе режима. Идея метода впервые опубликована в [11], а в работе [12] впервые получена точная формула для текущего шага интегрирования с учетом динамики событийной функции. Таким образом, библиотека численных методов для обозначенного класса систем включает не только традиционные и оригинальные численные схемы интегрирования с контролем точности и устойчивости, но и корректные методы детекции дискретных событий в ГС.

В комплекс ИСМА включён редактор принципиальных схем ЭЭС (рис. 1.). Элементы из библиотеки слева переносятся путём Drag&Drop на рабочий холст с принципиальной схемой системы справа. Для некоторых элементов, например трансформаторов, предусмотрены несколько схем замещения.

Для возможности задания произвольных регуляторов двигателей, а также другой автоматики, проведена интеграция редакторов электроэнергетических систем и структурных схем теории автоматического управления в рамках ИСМА.

Конвертация графической модели в универсальное внутреннее представление гибридной системы выполняется автоматически и скрыто от пользователя.

## **2 Тестовый пример**

Рассмотрим тестовую схему института «Энергосетьпроект» [13]. Принципиальная схема системы с двумя уровнями напряжения и шестью синхронными машинами разных типов и мощностей разработана в редакторе электроэнергетических систем в ИСМА (рис.1). Генератор  $G_1$  моделирует мощную ГЭС. Генераторы  $G_2$  и  $G_3$  представляют ТЭС малой мощности, агрегаты которой работают на ЛЭП разного номинального напряжения (500 и

220 кВ). Генераторы  $G_4$  и  $G_5$  – ТЭС большой мощности, агрегаты которой также работают на ЛЭП разного номинального напряжения. С помощью генератора  $G_6$  представляются синхронные компенсаторы.

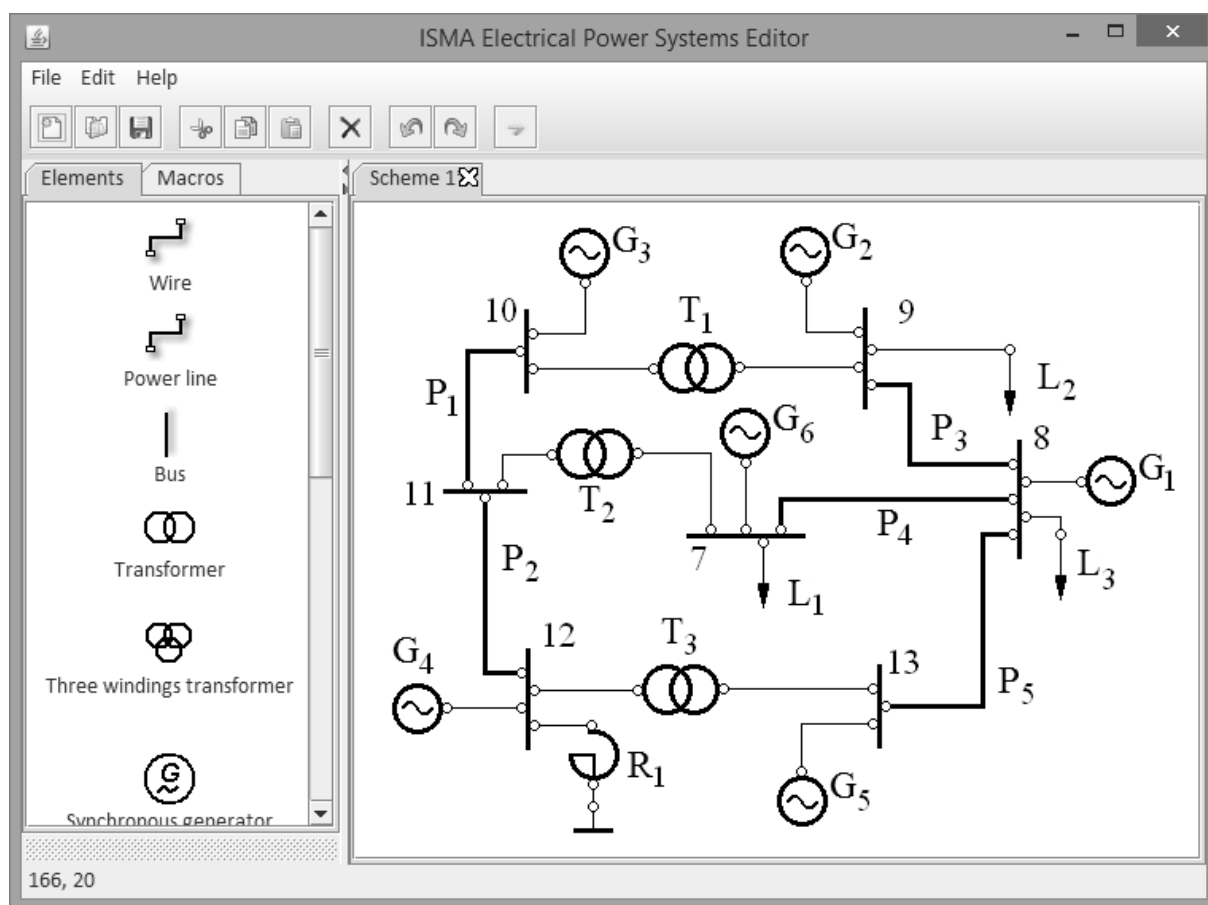


Рис. 1. Тестовая схема института «ЭнергоСетьПроект»

Синхронные машины описываются уравнениями Парка-Горева в нормальной форме [14]. Блочные трансформаторы и автотрансформаторы  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  моделируются активно-индуктивным элементом. Линии электропередачи  $P_1 - P_6$ , которые моделируются П-образными схемами замещения или активно – индуктивным элементами, связанным с землёй двумя активно – емкостными ветвями. Нагрузки в узлах  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  представляются с помощью активно-индуктивных элементов, связанных с землёй, а реактор – связанным с землёй индуктивным элементом.

Полная математическая модель ЭЭС, помимо математических моделей элементов принципиальной схемы, включает автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) и скорости (АРС), а также уравнения баланса токов в

узлах и уравнения преобразования координат токов и напряжений к системе координат базовой машины  $G_1$ .

Синхронные машины  $G_1$ ,  $G_4$ ,  $G_5$  и  $G_6$  оснащены АРВ сильного действия. Генераторы  $G_2$  и  $G_3$  – АРВ пропорционального действия. Модели АРС аналогичны моделям, представленным в системе МУСТАНГ [13]. Модель АРС для генератора  $G_4$  представлена на рисунке 2, на котором использованы обозначения:  $T_{PC}$  – постоянная времени регулятора скорости,  $w$  – частота вращения ротора синхронной машины,  $\mu_T$  – перемещение штока сервопривода,  $D_{ПО}$  – доля парового объёма промперегрева,  $T_{ПО}$  – постоянная времени промперегрева,  $\Psi$  – перемещение муфты центробежного маятника. У АРС турбин генераторов  $G_2$ - $G_5$  имеется мёртвая зона

$$\Psi_i = \begin{cases} 0, & |\alpha_i| \leq Z_{Hi}, \\ \text{sign}(\alpha_i) \cdot (|\alpha_i| - Z_{Hi}), & |\alpha_i| > Z_{Hi}, \end{cases} \quad i = 2, \dots, 5,$$

где  $\alpha_i$  – сигнал на входе АРС (в о.е.),  $Z_{Hi}$  – зона нечувствительности.

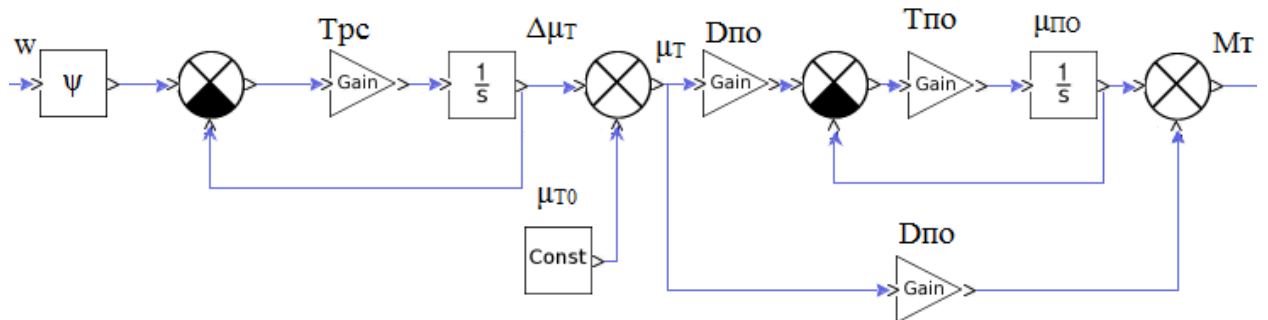


Рис. 2. Модель АРС генератора  $G_4$  в ИСМА

Структурная схема спроектирована в графическом редакторе структурных схем в ИСМА с использованием типовых элементов, где текстовый блок  $\Psi$  реализует нелинейную функцию с зоной нечувствительности.

Полная математическая модель системы содержит 279 нелинейных дифференциально-алгебраических уравнений, а гибридное поведение связано с наличием зон нечувствительности регуляторов. Компьютерная модель на языке LISMA\_PDE [15] с использованием индексной записи включает 173 строки программного текста.

### 3 Вычислительный эксперимент

Пусть в начальный момент времени нагрузка в узле 8 уменьшилась на 10%, что привело к возникновению электромагнитного переходного процесса. На рис. 3(а) представлены результаты расчёта момента генератора  $G_1$  в ИСМА с использованием метода Рунге – Кутты с контролем устойчивости RK3ST с начальным шагом 0.000001с. На рис. 3(б) представлены результаты, полученные в [13] с использованием неявного метода Эйлера с постоянными шагами: 0.00001с – график 1; 0.0001с – график 2; 0.001с – график 3. Полученные результаты не противоречат теоретическим выводам, что подтверждает корректность использованных методов. Расхождения могут быть объяснены не только использованием различных методов, но и различием парадигм моделирования.

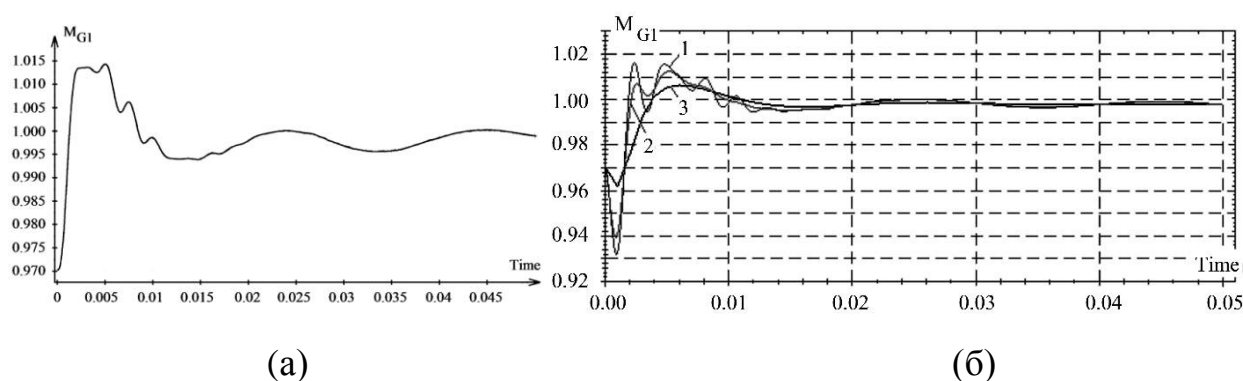


Рис. 3. а) Момент генератора  $G_1$  в ИСМА; б) в [13]

### Заключение

Современные формализмы и методы анализа сложных систем могут быть эффективно использованы предметными специалистами из разных областей только в том случае, если используются предметно-ориентированные средства моделирования. Такие программные системы освобождают конечного пользователя от рутинного преобразования математической модели в её программную реализацию и оказывают поддержку при проведении компьютерных экспериментов.

Авторами предложено использование методологии гибридных систем в окружении инструментальных средств компьютерного анализа для описания

и анализа переходных процессов в электроэнергетических системах. Представлены возможности спецификации ЭЭС в ИСМА с помощью графического языка в редакторе принципиальных схем. Получены результаты эксперимента с тестовой схемой с применением предложенных подходов и методов. Таким образом, конструктивно доказана корректность математического и программного обеспечения в обозначенном классе задач.

### **Благодарности**

Работа поддержана грантом Российского Фонда Фундаментальных Исследований 17-07-01513.

### **Литература**

1. Щербачёв О.В. Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике / О.В. Щербачёв, А.Н. Зейлигер, К.П. Кадомская и др. – СПб: «Энергия», 1980. 237с.
2. Колесов Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков - СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 224 с.
3. Новиков Е.А. Компьютерное моделирование жестких гибридных систем: монография / Е.А. Новиков, Ю.В. Шорников. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. 451 с.
4. RastrWin [Электронный ресурс] // Официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.rastrwin.ru/>
5. АНАРЭС [Электронный ресурс] // Официальный сайт. – Режим доступа: <http://anares.ru/>
6. Eurostag [Электронный ресурс] // Официальный сайт. – Режим доступа: <http://www.eurostag.be/>
7. SimPowerSystems [Электронный ресурс] // Официальный сайт. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/products/simpower.html>



8. Shornikov, Yu. V. Computer simulation of hybrid systems by ISMA instrumental facilities / Yu. V. Shornikov, M. S. Myssak, D. N. Dostovalov // Recent advanced in mathematical methods in applied sciences: proc. of the 2014 intern. conf. on mathematical models and methods in applied sciences (MMMAS'14), proc. of the 2014 intern. conf. on economics and applied statistics (EAS'14), Saint Petersburg, 23–25 Sept. 2014. – (Mathematics and computers in science and engineering; vol. 32). – Saint Petersburg, 2014. – P. 257-262. – ISSN 2227-4588, ISBN 978-1-61804-251-4.

9. Новиков Е. А. Явные методы для жестких систем / Е. А. Новиков. – Новосибирск : Наука, 1997. – 197 с.

10. Шорников Ю. В. Моделирование жестких гибридных систем с односторонними событиями в среде ИСМА / Ю. В. Шорников, Д. Н. Достовалов // Компьютерное моделирование 2012: Труды международного семинара. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. - С.36-41.

11. Esposito J. Accurate event detection for simulation of hybrid systems/ J. Esposito, V. Kumar, G. Pappas. In: Hybrid systems: Computation and control. LNCS. Springer, Berlin, 2001. pp 204–217

12. Шорников Ю.В. Прикладное математическое, алгоритмическое и программное обеспечение компьютерного анализа гибридных систем: дис.... д-ра. техн. наук / Шорников Юрий Владимирович. – Новосибирск, 2009. – 313с.

13. Фомина Т.Ю. Разработка алгоритма расчёта переходных процессов сложных регулируемых ЭЭС: дис.... к-та техн. наук / Фомина Татьяна Юрьевна. Москва, 2014. 109 с.

14. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергетических системах: Учеб. для электроэнергет. спец вузов. – 4-е издание., перераб. и доп. / В.А. Веников – М.; Высш. шк., 1985. – 536 с., с ил.

15. Шорников, Ю. В. Компонента спецификации моделей гибридных систем на языке «LISMA\_PDE» / Ю. В. Шорников, А. В. Бессонов //

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617191. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности. 2015.

*Сведения об авторах*

Шорников Юрий Владимирович  
Новосибирский государственный технический университет  
Рабочий адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20  
Ученая степень, звание: д.т.н., доц.  
Должность: профессор  
Электронная почта: shornikov@inbox.ru  
SPIN-код: 8915-7553

Попов Евгений Александрович  
Рабочий адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20  
Ученая степень, звание: -  
Должность: аспирант  
Электронная почта: filfgo@gmail.com  
SPIN-код: -

Беликов Владимир Олегович  
Рабочий адрес: Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20  
Ученая степень, звание: -  
Должность: магистрант  
Электронная почта: arkvb93@gmail.com  
SPIN-код: -

Shornikov Yury Vladimirovich  
Novosibirsk State Technical University  
Postal address: 20, Prospekt Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

Popov Evgeni Aleksandrovich  
Novosibirsk State Technical University

Postal address: 20, Prospekt Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia

Belikov Vladimir Olegovich

Novosibirsk State Technical University

Postal address: 20, Prospekt Karla Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia