

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.

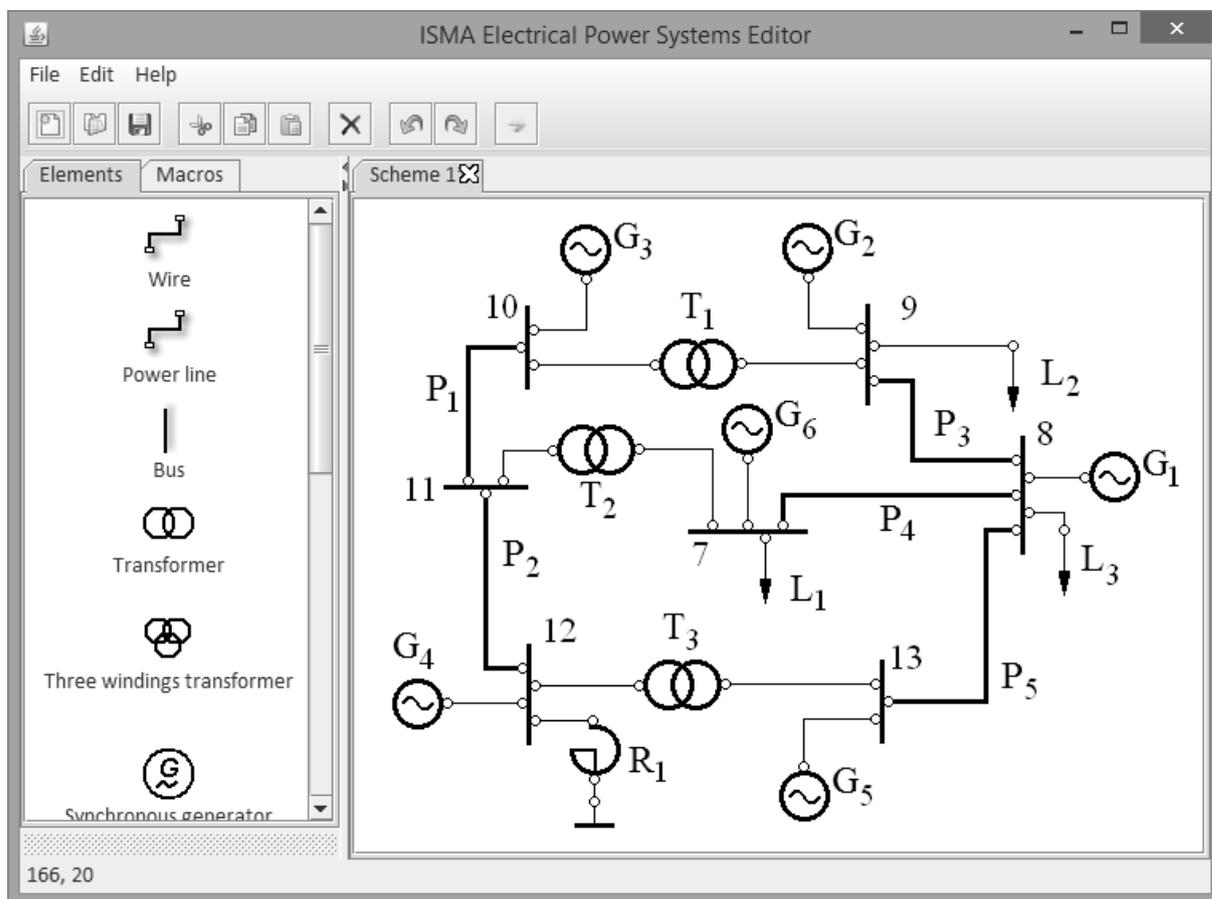


Рис. 1. Тестовая схема института «ЭнергоСетьПроект»

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, μ_T – перемещение штока сервопривода, $D_{ПО}$ – доля парового объёма промперегрева, $T_{ПО}$ – постоянная времени промперегрева, Ψ – 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 α_i – сигнал на входе АРС (в о.е.), Z_{Hi} – зона нечувствительности.

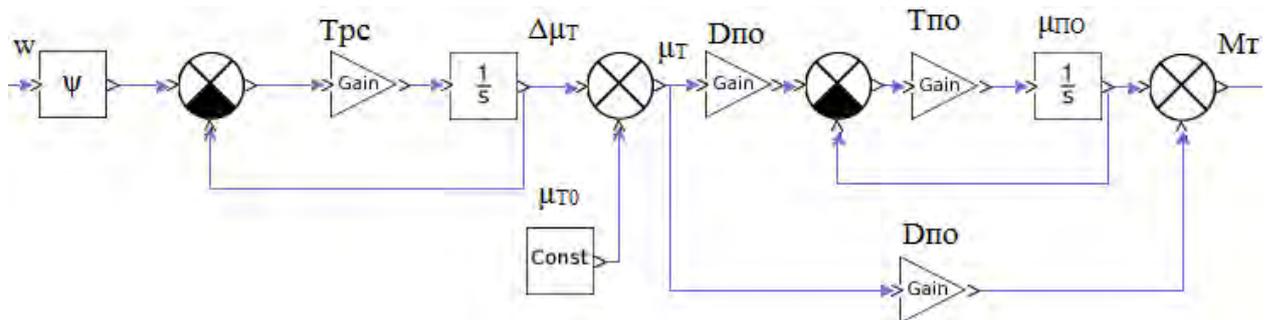


Рис. 2. Модель АРС генератора G_4 в ИСМА

Структурная схема спроектирована в графическом редакторе структурных схем в ИСМА с использованием типовых элементов, где текстовый блок Ψ 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.

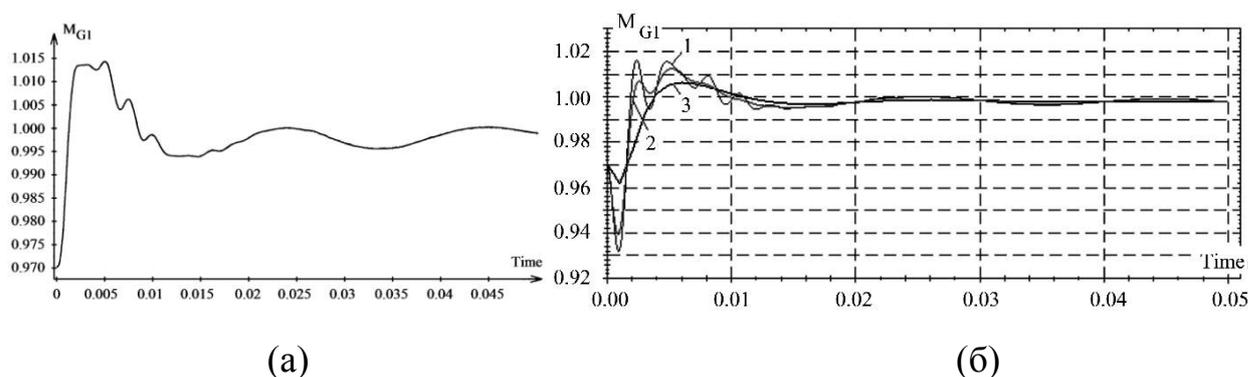


Рис. 3. а) Момент генератора G_1 в ИСМА; б) в [13]

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