

нивания ресурса компонентов расширяет информационный ресурс человеко-машинной системы и повышает эффективность использования оборудования.

Список литературы

1. Малафеев С. И., Афанасьев П. М., Студеникин В. А. Информационно-диагностическая система бурового станка//Автоматизация в промышленности. 2012. № 9. С. 51-53.
2. Малафеев С. И., Тихонов Ю. В. Компоненты интеллектуального управления для карьерных экскаваторов//Автоматизация в промышленности. 2013. № 10. С. 33-37.
3. Трубецкой К. Н., Кулешов А. А., Клебанов А. Ф., Владимиров Д. Я. Современные системы управления горно-транспортными комплексами/Под ред. Трубецкой К. Н.. СПб. Изд. Наука. 2007. 306 с.
4. Доронин С. В., Лепихин А. М., Москвичев В. В., Шонкин Ю. И. Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. Новосибирск. Изд. Наука. 2005. 250 с.
5. Малафеев С. И., Малафеева А. А. Основы автоматики и системы автоматического управления. М.: Академия. 2010. 384 с.
6. Малафеев С. И., Малафеев С. С., Серебренников Н. А. Применение прогнозирующей модели для непрерывного контроля сопротивления изоляции и защиты электрической сети//Управление. Контроль. Диагностика. 2012. № 10. С. 57-60.
7. Малафеев С. И., Серебренников Н. А., Фролкин В. Г. Анализ электрической сети с преобразователем рода тока при нарушениях сопротивления изоляции//Электротехника. 2004. № 12. С. 11-14.
8. Андреев Д. А., Назарычев И. А. Анализ методов оценки коммутационного ресурса высоковольтных выключателей//Вестник ИГЭУ. 2008. Вып. 2, С. 1-16.
9. Кабышев А. В., Тарасов Е. В. Низковольтные автоматические выключатели. Томск. Изд. Томского политехнического университета. 2011. 345 с.
10. Малафеев С. И., Новгородов А. А., Серебренников Н. А. Новый экскаватор ЭКГ-18 Р: система приводов постоянного тока с широтно-импульсной модуляцией//Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 6. С. 21-25.

Малафеев Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник ООО «Компания «Объединенная Энергия», *Тихонов Юрий Васильевич* – аспирант Владимирского государственного университета им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
Контактный телефон (495) 558-88-18.
E-mail: sim_vl@nm.ru

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ С ЦЕЛЬЮ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ¹

В.М. Каравайков, И.О. Волков (Костромской государственный технологический университет)

Представлена методика разработки математической модели тепловых процессов в теплице с водяным обогревом с целью предварительного определения параметров регулятора температуры для разработки системы автоматического регулирования по каналу управления температура теплоносителя – температура воздуха.

Ключевые слова: математическая модель, переходная характеристика, параметры регулятора.

Известно, что для определения параметров регулятора необходима идентификация объекта управления, заключающаяся в нахождении его передаточной функции. Определение передаточной функции объекта управления может производиться как аналитическими, так и экспериментальными методами.

В данной работе предлагается теоретико-экспериментальный метод, основанный на исследовании компьютерной модели объекта управления методом вычислительного эксперимента, позволяющий оценить наиболее важные характеристики теплицы как объекта управления, уже на стадии проектирования.

Широкое распространение получили методы идентификации объектов управления путем определения аналитического выражения переходной характеристики $h(t)$ по экспериментально полученной реакции объекта при ступенчатом изменении управляющего воздействия на входе.

Одним из применяемых способов определения коэффициентов дифференциального уравнения (или

параметров передаточной функции, или частотной характеристики объекта) является метод, основанный на аппроксимации экспериментально полученной функции $h(t)$ решением линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами и нулевыми начальными условиями, где входное воздействие $u(t)$ задается в виде единичной ступенчатой функции:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \dots + b_0 u(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Фактически реальные системы характеризуются пространственной протяженностью с характеристиками, распределенными в пространстве, то есть являются объектами с распределенными параметрами. Следовательно, точная аппроксимация $h(t)$ для таких объектов решением уравнения (1) возможна лишь

¹ Работа выполняется при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ государственный контракт № 14.740.11.1373.

при $m, n \rightarrow \infty$. В этом случае точное решение уравнения (1) определяется суммой бесконечного числа экспоненциальных составляющих.

Физически распределенность параметров объекта проявляется в медленном изменении функции $h(t)$ в начальный момент [1]. В связи с этим большое число составляющих необходимо для аппроксимации лишь начального участка $h(t)$. При больших временах t с увеличением номера составляющих решения они не оказывают заметного воздействия на $h(t)$. В этом случае начальный участок можно аппроксимировать введением чистого запаздывания [1].

Для переходных функций, имеющих гладкий не колебательный характер, что и имеет место в процессах нагрева и охлаждения, применяется подход, заключающийся в последовательном приближении экспериментальной переходной характеристики решением дифференциального уравнения порядка n с правой частью типа «ступенчатая функция» [1]:

$$h(t) \cong c_0 - \sum_{i=1}^n c_i e^{-\alpha_i t} \quad (2)$$

где $h(t) = h(\infty) \cong h(t_{\text{кон}})$. Интервал $[0, t_{\text{кон}}]$ соответствует отрезку времени, на котором задана экспериментальная функция. Ограничиваясь на первом этапе $n=1$, получим аппроксимирующую функцию:

$$h(t) \cong c_0 - c_1 e^{-\alpha_1 t}. \quad (3)$$

Если аппроксимация неудовлетворительная, увеличивая n , вводят новые экспоненциальные члены в уравнение (2). Процесс прекращается, когда аппроксимирующая функция будет совпадать с экспериментальной переходной характеристикой с погрешностью 2...5%.

Значение времени транспортного запаздывания τ определяется как интервал времени между моментом изменения входного сигнала и началом изменения выходной величины. Статический коэффициент передачи объекта определяется соотношением изменения установившегося значения выходного сигнала к величине входного воздействия:

$$k = \frac{y(\infty) - y_0}{u_b - u_0}, \quad (4)$$

где $y(\infty)$ — установившееся значение выходной величины при подаче на вход объекта ступенчатого входного сигнала с уровнем u_b ; u_0 и y_0 — установившиеся значения входного/выходного сигналов до начала проведения эксперимента. Постоянные времени могут быть вычислены различными способами для объектов разного типа. Для инерционного объекта первого порядка постоянная времени объекта T определяется как отрезок времени, за которое переходная

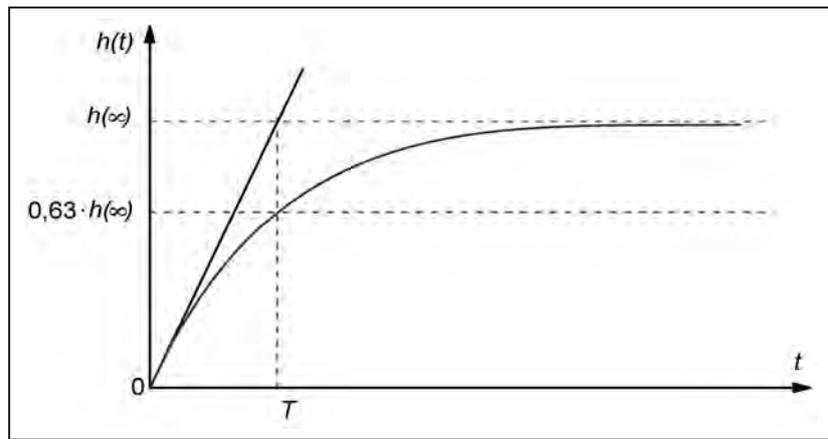


Рис. 1. Графическое определение постоянной времени инерционного объекта первого порядка

функция достигает 63% своей установившейся величины. Это следует из того, что при $t=T$ значение переходной функции приблизительно равно:

$$h(t)|_{t=T} = k \left(1 - \frac{1}{e}\right) (u_b - u_0) \approx 0,63 k (u_b - u_0). \quad (5)$$

Постоянная времени может быть определена как момент времени, в который касательная к переходному процессу в начальной точке графика пересечет установившееся значение выходной величины (рис. 1).

Данный подход можно использовать только для приближенного отыскания параметров передаточной функции, которые в дальнейшем необходимо уточнять [1].

Определение передаточной функции теплицы как объекта управления в данной работе производится по ее переходной характеристике, по методике, в основе которой лежит метод аппроксимации. Переходная характеристика получена путем расчета переходного процесса изменения температуры воздуха в теплице в результате ступенчатого изменения управляющего параметра — температуры теплоносителя в системе отопления.

Расчет выполнен на базе компьютерной модели промышленной теплицы. Построение компьютерной модели объекта основано на использовании современной CAE-системы ANSYS [2] для анализа эффективности различных конструктивных и технологических решений на основе моделирования тепло-массообменных процессов. Существующие методики расчета систем отопления объектов основаны на решении системы уравнений теплового баланса, в которую входят уравнения сохранения тепла и массы для всех объемов и поверхностей сооружений, участвующих в тепло- и массообмене. При этом тепловой баланс рассматривается при следующих упрощениях:

— значения температуры объекта принимаются как средние по площади их поверхности, температура воздуха — как средняя по объему, термическое сопротивление ограждения принято равным нулю;

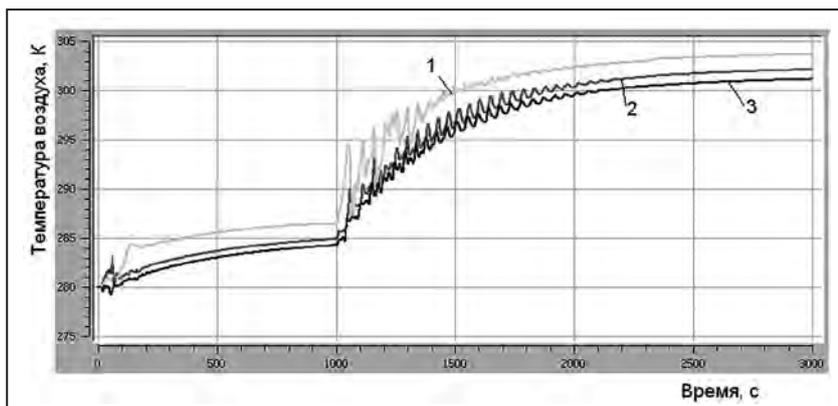


Рис. 2. Изменение температуры воздуха в теплице на высоте 0,3 м: 1 — в центральном проходе; 2 — на расстоянии 0,3 м от остекления; 3 — на расстоянии 0,3 м от границы секции

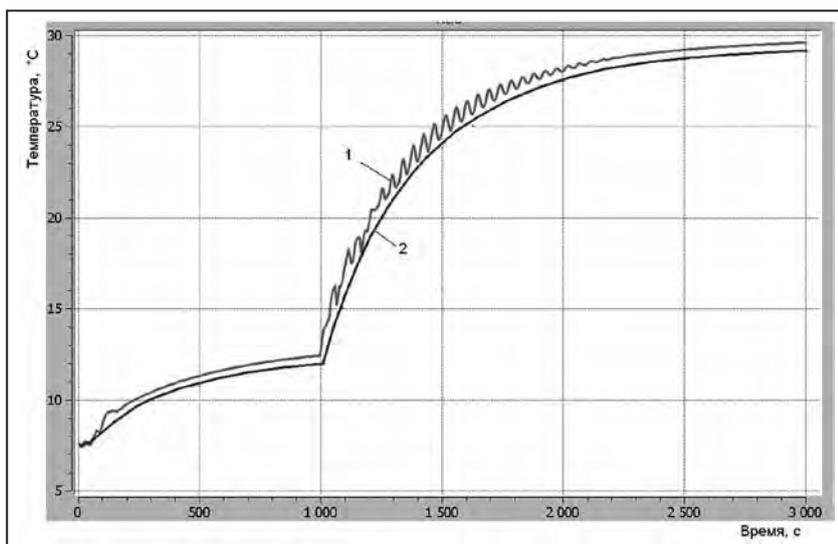


Рис. 3. Изменение средней температуры воздуха в теплице: 1 — в горизонтальном сечении на уровне 0,3 м; 2 — в вертикальном сечении секции

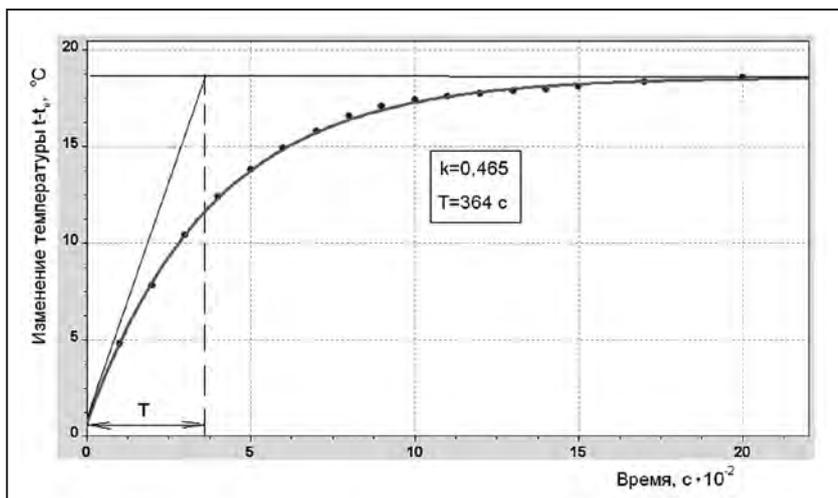


Рис. 4. Аппроксимация переходной характеристики теплицы

— различия в теплоотдаче нагревательных приборов в зависимости от их расположения не учитываются;
— при расчете водяной трубной системы отопления для всех климатических зон тепловой поток

от обогрева принимается неизменным.

от обогрева принимается неизменным.

Кроме того, коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях ограждающих конструкций, необходимые для определения их термического сопротивления, существенно зависят от локальных скоростей воздуха, а следовательно, от условий циркуляции воздуха в объеме теплицы и обтекания сооружения ветром. Таким образом, существующие методики теплового расчета теплиц существенно упрощают реальную задачу и нуждаются в уточнении. При моделировании тепломассообменных процессов в теплице в среде САЕ-систем указанные выше упрощения снимаются автоматически.

Авторами разработана компьютерная модель секции культивационного сооружения закрытого грунта, позволяющая решать задачу расчета температурного поля в ее полости и прилегающих областях грунта и воздушного пространства, включающая геометрическую модель расчетной области, генерацию и задание свойств доменов, задание свойств материалов, создание интерфейсов между доменами, задание граничных условий.

При создании компьютерной модели ставилась задача расчета температурного поля в полости теплицы и прилегающих областях контурного обогрева, теплофизических свойств воздуха и грунта, а также термического сопротивления ограждающих конструкций без учета термического сопротивления теплоотдачи на их наружных и внутренних поверхностях, которое автоматически учитывается моделированием тепломассообменных процессов в примыкающих пограничных слоях воздуха.

Учитывались также ограничения на размерность решаемой задачи, связанные с возможностями доступных средств вычислительной техники.

В ходе вычислительного эксперимента температура теплоносителя в системе надпочвенного и бокового обогрева изменялась от 50 до 90°C. Поскольку начальная температура воздуха в теплице, необходимая для расчета, первоначально задавалась приблизительно 7°C и не соответствовала установившемуся значению при температуре теплоно-

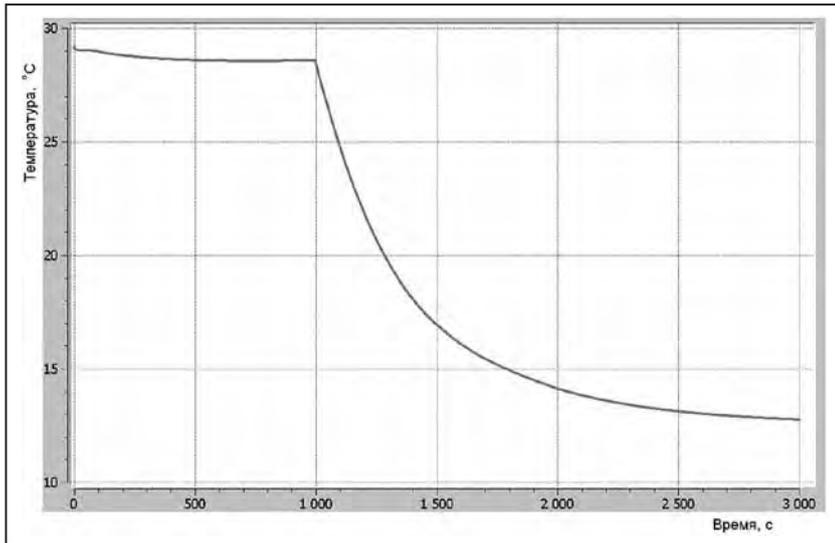


Рис. 5. Изменение средней температуры воздуха в вертикальном сечении при воздействии «обратная ступень»

сителя 50°С, управляющее воздействие в виде скачка температуры формировалось лишь по истечении значительного времени, достаточного для установления стационарного теплового режима.

Результаты моделирования соответствующего переходного процесса приведены на рис. 2. Отметим, что в целом график разгонной характеристики не имеет транспортного запаздывания и близок к инерционному звену первого порядка. Однако на участке максимальной скорости изменения температуры имеют место колебания, обусловленные реальными физическими свойствам объекта и связанные с вычислительным процессом решения уравнений переноса турбулентности.

Расчет показывает, что при снижении шага по времени и увеличении числа итераций на каждом шаге амплитуда колебаний снижается, однако это резко увеличивает время счета, при этом характер и параметры переходного процесса не изменяются.

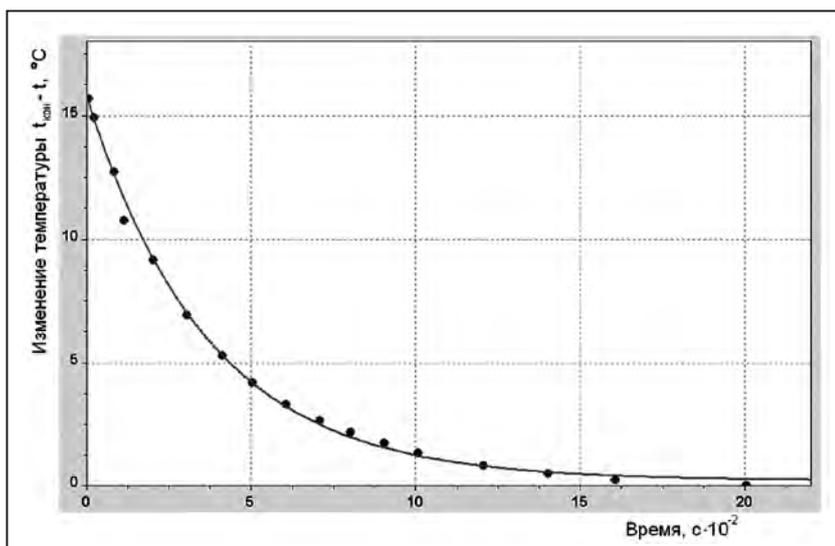


Рис. 6. Аппроксимация переходной характеристики теплицы при воздействии «обратная ступень»

В связи с этим использовалось усреднение температуры по сечению теплицы, что позволило сгладить переходную характеристику. Как следует из рис. 2, характер переходного процесса и его основные параметры (статический коэффициент передачи, постоянная времени) при этом существенно не изменяются.

Далее переходная характеристика теплицы по каналу управления температура теплоносителя — температура воздуха на участке от $t_0 = 1000$ с аппроксимировалась экспоненциальной функцией по формуле (3). Получена следующая функция, график которой представлен на рис. 3:

$$h(t - t_0) = 18,597 - 17,827e^{-0,002618(t - t_0)}. \quad (6)$$

Аппроксимация переходной характеристики теплицы показана на рис. 4.

Погрешность аппроксимации составила 2,5%, коэффициент детерминации 0,996.

Определим основные параметры переходного процесса. Статический коэффициент передачи:

$$k = \frac{y(\infty) - y_0}{u_b - u_0} = \frac{18,597}{90 - 50} = 0,465. \quad (7)$$

Постоянная времени T находится из уравнения:

$$0,63 \cdot h(\infty) = 18,597 - 17,827e^{-0,002618T}. \quad (8)$$

Поскольку $h(\infty) \approx 18,597$, получим $T = 363,6$ с, то есть 6 мин 4 с.

Учитывая, что тепловые объекты регулирования часто обладают асимметрией [3], рассмотрим также переходный процесс в теплице при управляющем воздействии «обратная ступень», когда температура теплоносителя падает от 90 до 50°С (рис. 5).

Аппроксимация графика процесса с момента управляющего воздействия приведена на рис. 6.

Аппроксимирующая зависимость в данном случае имеет вид:

$$h(t - t_0) = 15,81 - 15,553 \cdot (1,004 - e^{-0,002716(t - t_0)}). \quad (9)$$

Соответствующие значения параметров переходного процесса:

— статический коэффициент передачи $k = 0,395$;

— постоянная времени $T = 366,1$ с.

Для предварительной настройки регулятора температуры АСР теплицы, в соответствии с [3], принимаем средние значения параметров объекта регулирования:

- статический коэффициент передачи $k = 0,43$;
- постоянная времени $T = 365$ с.

Выводы

1. Определение передаточной функции объекта управления может производиться теоретико-экспериментальным методом, основанным на исследовании компьютерной модели объекта управления методом вычислительного эксперимента, позволяющим оценить наиболее важные характеристики теплицы как объекта управления уже на стадии проектирования.

2. Расчет выполнен на базе компьютерной модели объекта, построение которой основано на использовании современной CAE-системы ANSYS. Это позволило решать задачи численными методами, исключая значительные упрощения, присущие существующим ме-

тодикам, основанным на решении системы уравнений теплового баланса, в которую входят уравнения сохранения тепла и массы для всех объемов и поверхностей сооружений, участвующих в тепло- и массообмене.

Список литературы

1. Дилигенская А. Н. Идентификация объектов управления. Учебное пособие [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://home.samgtu.ru/~auts/books/diligenskaya_tutorial_2009.pdf.
2. Киселев Н. В., Каравайков В. М. Моделирование процессов тепломассопереноса на основе технологии ANSYS//Изв. ВУЗов. Проблемы энергетики. 2012. № 9-10.
3. Определение параметров переходных характеристик/[Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://automation-system.ru/main/item/70-opredelenie-parametrov-perexodnyx-xarakteristik.html>.

*Каравайков Владимир Михайлович — д-р техн. наук, проф.,
Волков Илья Олегович — аспирант Костромского государственного технологического университета.
Контактный телефон (4942) 31-69-91.
E-mail: kvml@ya.ru*

ВСЕРЕЖИМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов,

М.В. Андреев (Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

Представлены разработанные средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем, обеспечивающие адекватное моделирование непрерывного спектра значимых квазиустановившихся и переходных процессов, в том числе связанных с перенапряжениями, в оборудовании и энергосистемах в целом. Приведены фрагменты проведенных исследований на примерах воспроизведения коммутационных перенапряжений в электрической сети реальной энергосистемы¹.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, всережимное моделирование, реальное время, квазиустановившиеся и переходные процессы, верификация, идентификация, достоверность, коммутационные перенапряжения.

Надежность и эффективность проектирования, исследования и эксплуатации оборудования, электрических сетей (ЭС) и электроэнергетических систем (ЭЭС) в целом в определяющей мере зависит от полноты и достоверности используемой при этом информации об условиях работы оборудования, ЭС и ЭЭС в возможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы. В частности, эти вопросы регламентируют методические указания и рекомендации по применению ограничителей перенапряжений в ЭЭС. Однако обоснованность выбора типов и мест их установки в соответствии с этими указаниями зависит от адекватности информации о возможных значениях и длительности перенапряжений, наиболее опасных среди которых являются коммутационные. Ввиду известной специфики

и сложности современных ЭЭС получение такого рода информации возможно только путем преимущественно математического моделирования оборудования и ЭЭС в целом. При этом обеспечение достаточной полноты и достоверности обозначенной информации связано с применением для всего без исключения значимого оборудования и соответственно ЭЭС трехфазных бездекомпозиционных математических моделей, непрерывно и адекватно описывающих реальный спектр процессов в оборудовании. В результате образующаяся модель любой реальной ЭЭС, с учетом допустимого частичного эквивалентирования, неизбежно содержит очень жесткую, нелинейную систему дифференциальных уравнений чрезвычайно большой размерности. Согласно теории методов дискретизации для дифференциальных

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» 2.1318.2014 «Разработка и исследование гибридного моделирующего комплекса энергосистемы с активно-адаптивной сетью».