

## МОДЕЛИ СИСТЕМ И СИСТЕМНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Розглядаються теоретичні та практичні питання побудови моделей складних електричних апаратів з використанням інструментарію загальної теорії систем. Наведені приклади моделей фізичних, технічних та кібернетичних систем у складних електричних апаратах*

*Рассматриваются теоретические и практические вопросы построения моделей сложных электрических аппаратов с использованием инструментария общей теории систем. Приведены примеры моделей физических, технических и кибернетических систем в сложных электрических аппаратах*

### ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования – электрические аппараты (ЭА) как вид электротехнических устройств, предназначенных для управления потоками энергии для изменения режимов работы, регулирования параметров, контроля и защиты электротехнических систем и их составных частей. Основные виды ЭА это аппараты управления и защиты, аппараты автоматического регулирования, аппараты автоматики, выключатели высокого напряжения, токоограничивающие реакторы, ограничители перенапряжений, разъединители и отделители, измерительные трансформаторы и др. [1].

В известной литературе, в том числе практически во всех выпусках журнала "Електротехніка і електромеханіка", исследуются физические явления, лежащие в основе функционирования ЭА, научные основы создания, анализа, производства, обеспечения эффективной эксплуатации ЭА. При этом ЭА исследуются, как правило, с использованием описаний и технических, экономических характеристик технических устройств, реализующих заданные функции управления. Во многих исследованиях отмечается "вылизанность" конструкций современных ЭА и дальнейшее их совершенствование связывается с интеллектуализацией ЭА.

Технической базой для имплементации интеллекта в ЭА на основе программно-аппаратной реализации алгоритмов управления стали микроконтроллеры, промышленные контроллеры и персональные компьютеры, которые входят в состав сложного ЭА. Известны интеллектуальные датчики, реле, регуляторы, источники питания и другие интеллектуальные ЭА. Вместе с тем, авторам не известны работы по систематизации интеллекта, системным моделям и характеристикам ЭА.

Отсутствие классификации ЭА как систем различного вида, неопределенность системных характеристик ЭА затрудняет моделирование ЭА, анализ их эволюции и определение тенденций развития и, таким образом, является нерешенной научной проблемой.

### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предмет настоящего исследования – модели систем и системные характеристики сложных ЭА

Исследование выполнено с использованием методов теории систем [2]. В соответствии с этой теорией будем рассматривать ЭА как систему с определен-

ным уровнем организации, который описывается в категориях сложности и тезауруса.

Цель исследований: спроецировать методы и средства описания систем, разработанные в теории систем на предметную область ЭА.

Задачи исследования: выделить в сложных ЭА системы различных классов (физические, технические, кибернетические системы); определить системные характеристики сложных ЭА; раскрыть суть сложности и тезауруса ЭА; проследить эволюцию и определить тенденции развития сложных ЭА как систем.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В соответствии с [2] системы классифицируют по уровню их организации. Наиболее низкий уровень организации имеют физические системы. Далее по мере роста уровня организации расположены классы технических, кибернетических, биологических, социальных и интеллектуальных систем.

Процесс разработки системной модели сложного ЭА включает разработку функционального, морфологического и информационного описания.

Функциональное описание отражает такие характеристики систем как параметры, характеристики и иерархию.

Морфологическое описание есть четверка

$$S_M = (\Sigma, V, \sigma, K),$$

где  $\Sigma = \{\Sigma_i\}$  – множество элементов (подсистем) и их свойств;  $V = \{V_j\}$  – множество связей;  $\sigma$  – структура;  $K$  – композиция.

Информационное описание определяет зависимость морфологических и физических свойств системы от качества и количества внутренней (о себе самой и среде) и внешней (поступающей из среды) информации. Связь между функциональным и информационным описаниями отражает эффективность и энтропию, закон изменения эффективности во времени отражает энтропийные свойства. Связь между морфологическим и информационным описаниями отражает изменение морфологических свойств во времени.

Рассмотрим в качестве примера системное описание такого распространенного элемента ЭА как электрический проводник. Этот проводник становится системой определенного класса после выбора человеком варианта использования проводника в ЭА. Вариант использования определяется существенными для человека действиями электрического тока (тепло-

выми, физическими, химическими, световыми, механическими и физиологическими) протекающего через проводник в процессе его использования в ЭА, характера взаимодействия с внешней средой, физическими эффектами и явлениями, возникающими в проводнике в результате этого взаимодействия.

На рис. 1 представлен вариант UML-диаграммы прецедентов электрического проводника. Актерами системы являются источник постоянного тока  $I$  вдоль проводника; источник постоянного напряжения  $U$  между проводником и корпусом ЭА; температура  $T_a$  окружающей среды, другие элементы конструкции ЭА, например корпус.

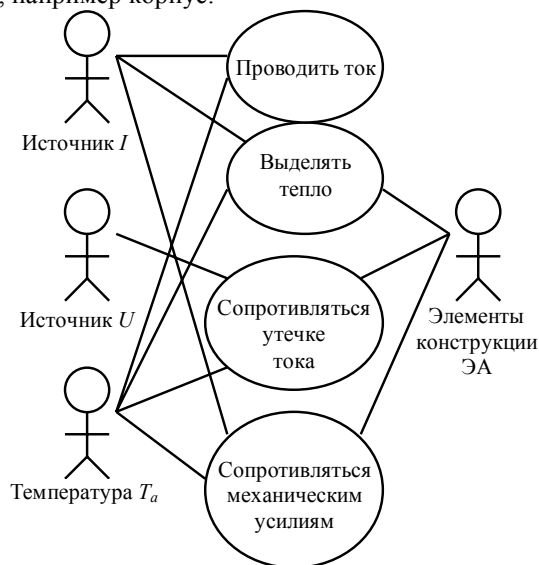


Рис. 1 Диаграмма прецедентов системы "электрический проводник"

В диаграмме рис. 1 учитываются далеко не все, встречающиеся в практике использования электрических проводников, прецеденты и актеры. Например, согласно эффекту Пельтье (термоэлектронные явления), проводник при определенных условиях, будет не выделять, а поглощать тепло. А в результате термомагнитного эффекта Нерста-Эттингсгаузена в проводнике, в котором имеется градиент температуры и который помещен в магнитное поле, появляется электрическое поле.

В соответствии с выбранными прецедентами, сформированы функциональные подсистемы проводника (рис. 2): электродинамическая (ЭДПС), термодинамическая (ТДПС), электромеханическая (ЭМПС).

Иерархия функционального описания системы "электрический проводник" заключается в том, что ее подсистемы являются физическими системами, взаимосвязь входных и выходных величин которых определяется фундаментальными законами физики. Например, в ЭДПС под действием тока  $I$  и температуры проводника  $T$  на ее выходе выделяется тепловая мощность

$$P = \frac{I^2}{R_{\text{пр}0}(1 + \alpha_T(T - T_0))},$$

где  $R_{\text{пр}0}$  – электрическое сопротивление проводника при температуре  $T_0$ ;  $\alpha_T$  – температурный коэффициент сопротивления.

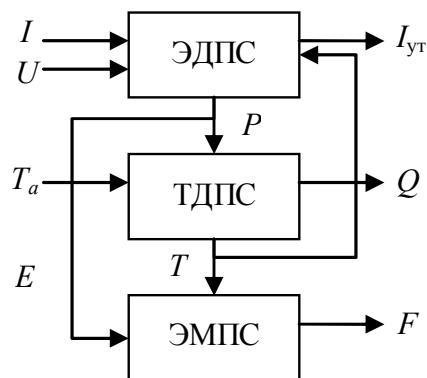


Рис. 2. Функциональное описание системы "электрический проводник"

Кроме того, при протекании по проводнику тока  $I$  вокруг него образуется электрическое поле с напряженностью  $E$ , а под действием электрического напряжения  $U$  между проводником и элементами конструкции ЭА возникает ток утечки  $I_{\text{ут}}$ . Подсистема ТДПС формирует тепловой поток  $Q$  от проводника к другим элементам конструкции ЭА и изменяет температуру проводника  $T$  на основе температуры окружающей среды  $T_a$  и уравнения теплового баланса. Подсистема ЭМПС определяет механическое усилие  $F$  на другие элементы конструкции ЭА.

Таким образом, функциональное описание системы, представленное на рис. 2, описывает взаимосвязи физических процессов в системе, ее внешние физические параметры  $I, U, T_a, F$  и параметры подсистем. Это описание системы адекватно отражает поведение системы в тех случаях, когда внешние физические параметры принадлежат к области допустимых значений. В противном случае, в системе могут возникнуть другие физические процессы. Например, пробой изоляции, испарение проводника. Диапазоны допустимых значений входных переменных определяются через параметры элементов конструкции проводника.

Вид функционала, описывающего эффективность системы "электрический проводник", связан с прецедентами системы. Эффективность пропускания тока проводником определяется по величине его электрического сопротивления. То есть, из двух проводников более эффективным считается проводник с меньшим электрическим сопротивлением. Отметим, что в нашем упрощенном примере не учтено, например, влияние на эффективность локальных уменьшений поперечного сечения проводника, которые практически не изменяют его сопротивления, но существенно снижают токонесущую способность. Выражение зависимости сопротивления проводника от его электрофизических параметров и есть функционал эффективности.

С течением времени эффективность проводника, как правило, уменьшается, то есть растет его сопротивление в результате химических реакций, механических и токовых перегрузок. Неопределенность значения электрического сопротивления проводника в некоторый момент времени  $t_1$ , относительно его сопротивления в момент  $t_0$  ( $t_1 > t_0$ ), когда сопротивление проводника было измерено с достаточной степенью точности, определяет энтропийные свойства провод-

ника в части его способности проводить ток. С увеличением времени энтропия системы "электрический проводник" возрастает, что характерно для физических и технических систем.

Аналогично определим эффективность отвода тепла проводником (по величине превышения температуры проводника над температурой окружающей среды), эффективность сопротивления проводника утечкам тока (по величине сопротивления его изоляции) и другие.

При морфологическом описании процессы в системе проектируются на ее элементы. Структура системы "электрический проводник" приведена на UML диаграмме классов рис. 3.

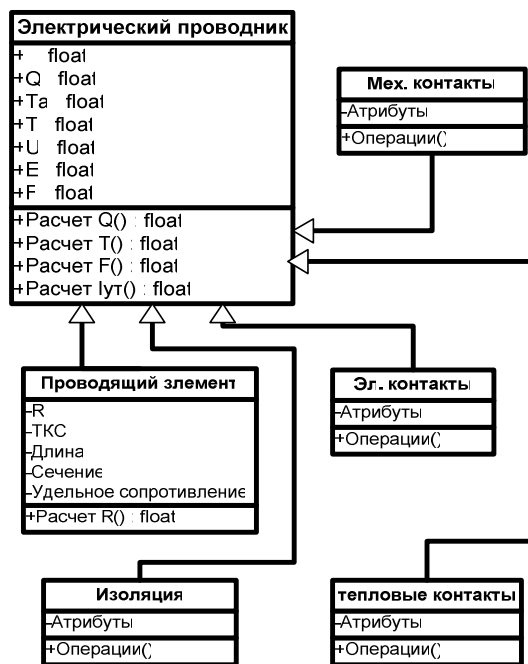


Рис. 3. Диаграмма классов системы "электрический проводник"

Как видно из диаграммы классов, система "электрический проводник" построена на гетерогенных элементах. Морфология системы стабильна, разрушение элементов в результате старения и действия внешних факторов приводит к отказу системы – ее неспособности выполнять системные функции.

Система "электрический проводник" не обладает тезаурусом, поэтому морфологического и функционального описания системы достаточно для описания результатов ее действий, и информационного описания не требуется.

Примерами систем с более сложной организацией служат регулятор системы охлаждения [3] и программный компонент идентификации тепловых параметров [4] силового маслонаполненного трансформатора. Такие трансформаторы в настоящее время оснащаются системой мониторинга и управления [5], которая содержит узлы, обладающие вычислительными ресурсами – промышленные контроллеры и компьютеры. Алгоритмы управления в таких узлах, в том числе алгоритмы регулятора и компоненты идентификации тепловых параметров, реализованы программно, распределены по нескольким узлам, выпол-

няются в режиме реального времени и являются элементами контроллерной системы управления (КСУ).

Иерархия в функциональном описании КСУ приведена в табл. 1.

Таблица 1

Иерархия функциональных уровней КСУ

Уровень	Элементы	Информационные массивы	Местоположение
Управление адаптацией	Производственная система	База знаний приложения, целевая функция	Память компьютера
Управление состояниями	Управляющие автоматы (УА)	Таблицы выходов и переходов УА	Память пользователя контроллера
Управление комплексными операциями	Входные, выходные, операционные автоматы (ОА)	Файлы (структуры) данных, файлы форсировки, файлы параметров ОА	
Управление типовыми операциями	Инструкции языка программирования	Структуры управления инструкций языка программирования	Системная память контроллера
Управление системными операциями	Операционная система (ОС) контроллера	Файл статуса (системных переменных) контроллера Системные переменные ОС	
Управление аппаратными средствами	Процессор, входные, выходные, сетевые модули, блок питания, операторский интерфейс	Системные регистры устройств (регистры данных, состояния, конфигурации)	Элементы электронной схемы

Уровни сопряжения с ОУ и управления аппаратными средствами описаны в [6]. Управление системными операциями контроллера осуществляется ОС контроллера со свойствами ОС реального времени и реализацией отдельных команд в виде программных автоматов.

Большинство инструкций языков программирования контроллеров имеют довольно сложный алгоритм выполнения, с внутренними состояниями, которые отображаются через элементы структур управления. С этой точки зрения их можно рассматривать как автоматы типовых операций пользователя и объединить в отдельный уровень управления.

На уровне управления комплексными операциями выделим множество входных и выходных ОА. Входные ОА выполняют операции над входными переменными различных типов, которые поступают с выходов входных модулей, выходов других ОА или из памяти процессора. Выходные ОА формируют значения выходных переменных контроллера.

Уровень управления состояниями системы управления представлен в структуре управления множеством УА. Каждый УА, как правило, управляет состояниями отдельной задачи, программы, процедуры, то есть автоматы используются параллельно.

Алгоритмы обработки данных и управления состояниями могут быть изменены во время эксплуатации путем адаптации. В ходе адаптации в системе управления накапливаются и оцениваются результаты управления, формируется прогноз изменения контролируемых и неконтролируемых параметров ОУ. На основании этих данных изменяются информационные массивы структур УА и параметры ОА, системные переменные контроллера, коммутируются информационные потоки на входах и выходах этих автоматов, то есть изменяется структура устройства управления объектом. Управление адаптацией можно выделить в отдельный уровень управления, который использует инструментарий систем искусственного интеллекта.

Элементы функционального описания объединяются в подсистемы с помощью прямых и обратных связей, как в пределах одного уровня, так и с элементами других уровней. При этом, один и тот же элемент может выступать в различных подсистемах как объект, средство и инструмент управления.

Подсистемы КСУ целенаправленны, то есть, способны к выбору поведения в зависимости от внутренней цели [1], что является признаком технических систем. Например, внутренняя цель регулятора охлаждения [7] – снижение затрат связанных с термическим износом изоляции трансформатора с учетом затрат на реализацию охлаждения.

КСУ имеет многоуровневый тезаурус, который отражает сведения системы о себе и окружающей среде. Такая информация может храниться, например, в статусном файле контроллера. Во время работы КСУ идет накопление тезауруса, путем сохранения в памяти системы и обработке текущих значений внешних и внутренних параметров. Например, регулятор охлаждения [3] использует прогноз тока нагрузки трансформатора, который постоянно уточняется путем обработки данных мониторинга [8]. А тепловые параметры трансформатора уточняются по мере накопления компонентом идентификации КСУ данных о работе трансформатора в различных режимах [4].

Таким образом, ЭА имеющие в своем составе программные компоненты, реализованные в среде КСУ, обладают свойствами кибернетических систем, а их составные части представляют собой технические системы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование ЭА и их элементов средствами теории систем с разработкой комплекса из функционального, морфологического информационного описаний, основано на учете сложности организации системы и ее тезауруса. Такие модели представляют интерес при проектировании адаптивных, самоорганизующихся ЭА, ЭА с программной реализацией алгоритма управления и использованием методов искусственного интеллекта для повышения эффективности ЭА.

Предложенные модели и характеристики систем сложных ЭА предполагается использовать при разработке алгоритмического и программного обеспечения систем мониторинга и управления трансформаторами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрические и электронные аппараты. Под ред. Ю. К. Розанова. – М: Информэлектро, 2001. – 420 с.
2. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Проблемы системологии. – Сов. радио, 1976.
3. Поляков М.А. Нечеткий регулятор охлаждения силового масляного трансформатора на основе прогноза изменения возмущающих факторов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2007. – № 3. – С. 47-50.
4. Поляков М.А. Идентификация тепловых параметров силового масляного трансформатора по данным мониторинга параметров // *Вісн. Східноукр. нац. ун-ту*. – 2007. – № 11. – Ч. 1(117). – С. 167-173.
5. Рассальский А.Н. Система мониторинга и управления силовых трансформаторов // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2005, № 2.
6. Part E.A. Programmable Controllers. An engineer's guide. Third edition. Oxford: Newness, 2003. – 429 p.
7. Поляков М.А. Управление охлаждением силового масляного трансформатора по критерию эффективности // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2008. – № 3. – С. 45-47.
8. Поляков М.А., Климов С.И. Методы и информационные технологии обработки данных мониторинга параметров силового трансформатора // *Вісник національного університету "Львівська політехніка"*. – 2009. – № 637. – С. 70-74.

*Поступила 21.10.2009*

*Поляков Михаил Алексеевич, к.т.н. доц.*

*Ларионова Татьяна Юрьевна*

Запорожский национальный технический университет  
кафедра "Электрические аппараты"  
Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64  
тел. (061) 228-16-10, e-mail: polyakov@zntu.edu.ua,  
tanyalarionova@mail.ru

*Polyakov M.A., Larionova T.Yu.*

#### **System models and system characteristics of complex electric apparatus.**

The paper considers theoretical and practical problems concerning modeling of complex electric apparatus with application of general system theory tools. Examples of modeling of physical, engineering, and cybernetic systems in complex electric apparatus are given.

**Key words – complex electric apparatus, modeling, general theory of systems, examples.**