

**СТРУКТУРА ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ
СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

А. В. Саушев

Введение

Процесс управления состоянием технических систем включает в свой состав целый комплекс задач анализа и синтеза, имеющих место на различных этапах и стадиях их жизненного цикла. Долгое время эти задачи применительно к электротехническим системам (ЭТС) рассматривались изолированно и независимо одна от другой, хотя при более общем взгляде все они оказываются тесно связанными. Объединяющим началом является то, что их решение сводится к изучению целенаправленных и случайных процессов изменения структуры и параметров элементов ЭТС, определяющих качество их работы, и способу и принципам управления этим процессом. Согласно функционально-структурному анализу любая техническая система реализует целевую, основные и дополнительные функции. Их воспроизведение осуществляется совокупностью некоторых элементов, объединенных в соответствующую структуру. При взаимодействии элементов системы можно выделить процессы преобразования вещества, энергии и информации.

Функциональный анализ электротехнических систем

Под электротехнической системой с информационно-энергетической точки зрения будем понимать такую техническую систему, основным носителем информации и видом энергии в которой является электрическая энергия.

С функциональной и морфологической точек зрения под ЭТС будем понимать упорядоченную совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих электротехнических устройств, образующих единое функциональное целое, предназначенное для решения определенной задачи. При этом согласно ГОСТ18311-80 под электротехническим устройством понимается устройство, предназначенное для производства, преобразования, распределения, передачи и использования электрической энергии или для ограничения возможности ее передачи.

Любое электротехническое устройство (ЭТУ) с системных позиций также состоит из совокупности связанных между собой элементов. Отдельные элементы – это части или компоненты ЭТУ, предназначенные для выполнения определенных функций и не подлежащие дальнейшему разбиению на части. Понятие элемента является весьма условным, и «расчленение» ЭТУ на элементы может быть произведено неоднозначно [1–3].

При изучении поведения электротехнических систем во времени последние обычно рассматриваются как динамические системы, т.е. системы, находящиеся в каждый момент времени в одном из возможных состояний и способные переходить из одного состояния в другое под действием внешних и внутренних причин. Чтобы учесть внешние причины, необходимо раскрыть процесс взаимодействия динамической системы и внешней среды.

Рассматривая ЭТС с позиций теории управления, можно заключить, что на ее входах и выходах наблюдаются следующие переменные: $u(t)$ – вектор входных (задающих) воздействий; $V(t)$ – вектор возмущающих (координатных и параметрических) воздействий; $Z(t)$ – вектор фазовых переменных (переменных состояния); $Y(t)$ – вектор выходных переменных, характеризующих качество работы системы.

Анализ показывает [1], что в состав всех видов ЭТС входят ЭТУ, которые отличает большое схемное разнообразие, а также широкое использование для их построения полупроводниковых элементов и микросхем. Реальные условия эксплуатации ЭТС приводят к изменению значений их

внутренних параметров. Установлено, что обратимые и необратимые изменения этих параметров могут достигать в процессе эксплуатации значительных величин [4]. Основной причиной изменения параметров элементов является их зависимость от температуры и влажности. Для активных элементов также имеет значение режим работы устройства.

Параметрические возмущения служат препятствием в обеспечении системой требуемых показателей качества и приводят к следующему виду дифференциального уравнения движения систем:

$$(\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A})\dot{\mathbf{u}}(t) = (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{Z}(t) + (\mathbf{C} + \Delta\mathbf{C})\mathbf{V}(t),$$

где \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} – матрицы коэффициентов.

Краткий функционально-структурный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. ЭТС в большинстве случаев можно рассматривать как системы автоматического управления (САУ) или автоматические управляющие устройства, объектом управления которых являются электрические машины или рабочие машины технологических установок.
2. Характерной особенностью ЭТС является их сложность, большое схемное разнообразие, в ряде случаев автономность работы, изменчивые условия эксплуатации, наличие нескольких выходных и большого числа внутренних параметров.
3. Координатные и параметрические возмущения, имеющие место при эксплуатации ЭТС, приводят к изменению требуемых значений их показателей качества, а также к постепенным отказам ЭТУ, доля которых составляет 30–70 % от общего числа отказов.
4. Большинство ЭТС относится к числу квазистационарных динамических систем, параметры состояния которых изменяются медленно в сравнении со скоростью протекания рабочих процессов.

Понятия и определения

Анализ поведения ЭТС во времени приводит к необходимости определения категории «состояние». В настоящее время отсутствует строгое определение этого понятия. Наиболее широко применительно к техническим объектам распространены две точки зрения. Согласно первой из них состояние рассматривается как совокупность свойств объекта в некоторый момент времени. Так, например, определяется стандартом категория «техническое состояние». Согласно второй точке зрения состояние определяется как совокупность количественных значений параметров, описывающих объект, и качественных признаков объекта. Из первого определения следует, что возможны такие моменты времени, при которых состояние объекта не изменяется. Второе определение выделяет и абсолютизирует лишь гносеологический аспект этой категории, что, например, приводит к трудности при его использовании для систем, поведение которых не описывается однозначным образом. Категория «состояние» тесно связана с категорией «свойство», которая характеризует особенность ЭТС с какой-либо одной стороны.

В соответствии с функционально-структурным подходом будем различать внутренние (материально-структурные) и внешние (функциональные) свойства ЭТС, которые количественно характеризуются соответственно ее внутренними и выходными параметрами [1]. В общем случае каждый системный элемент на любом уровне иерархии характеризуется набором собственных свойств различной физической природы. Свойства существуют объективно, в силу существования ЭТС, независимо от субъективных условий и требований их обнаружения и оценки. К основным свойствам при этом относятся: электромагнитные, механические, тепловые, геометрические, физико-химические свойства образующих материалов и функциональные. Первые пять групп свойств проявляются при материализации функциональных свойств.

В общем случае категория «состояние» должна отражать совокупность внутренних свойств системы, интенсивность их проявления в различные моменты времени, а также фиксировать процесс развития. Дадим следующее определение этому понятию.

Состояние – внутренняя определенность ЭТС, характеризуемая в рассматриваемый момент времени признаками, установленными технической документацией на ЭТС, которые являются начальными условиями процессов их дальнейшего изменения.

Совокупность внутренних свойств ЭТС и их характеристик в некоторый фиксированный момент времени определяет внутреннее или, что то же, материально-структурное состояние, которое, в свою очередь, характеризуется сочетанием состояния комплектующих элементов ЭТС и его коммутационного состояния. Совокупность функциональных свойств и выходных параметров ЭТС в некоторый фиксированный момент времени определяет его функциональное состояние. Состояние среды определяет режим работы ЭТС и может быть представлено двумя группами: режимом работы (в узком смысле) и состоянием условий использования, которые определяются атмосферными условиями, степенью «нагруженности» элементов, качеством технического обслуживания и ремонта и т.п.

Рассмотренные множества состояний ЭТС взаимосвязаны и позволяют объяснить и обосновать многообразие различаемых в эксплуатации видов технического состояния [1].

Модель эволюции состояния электротехнических систем

В самом общем случае модель эволюции состояния ЭТС должна отражать количественные и качественные изменения, которые происходят в его элементах во всех возможных режимах работы с момента начала эксплуатации до наступления предельного состояния. Представим эту модель в виде графа (рис. 1) с конечным набором состояний, общее число которых определяется технической возможностью или заданной точностью распознавания двух смежных состояний. Для раскрытия сущности эволюции состояния ЭТС следует выделять структурные и параметрические возмущения.

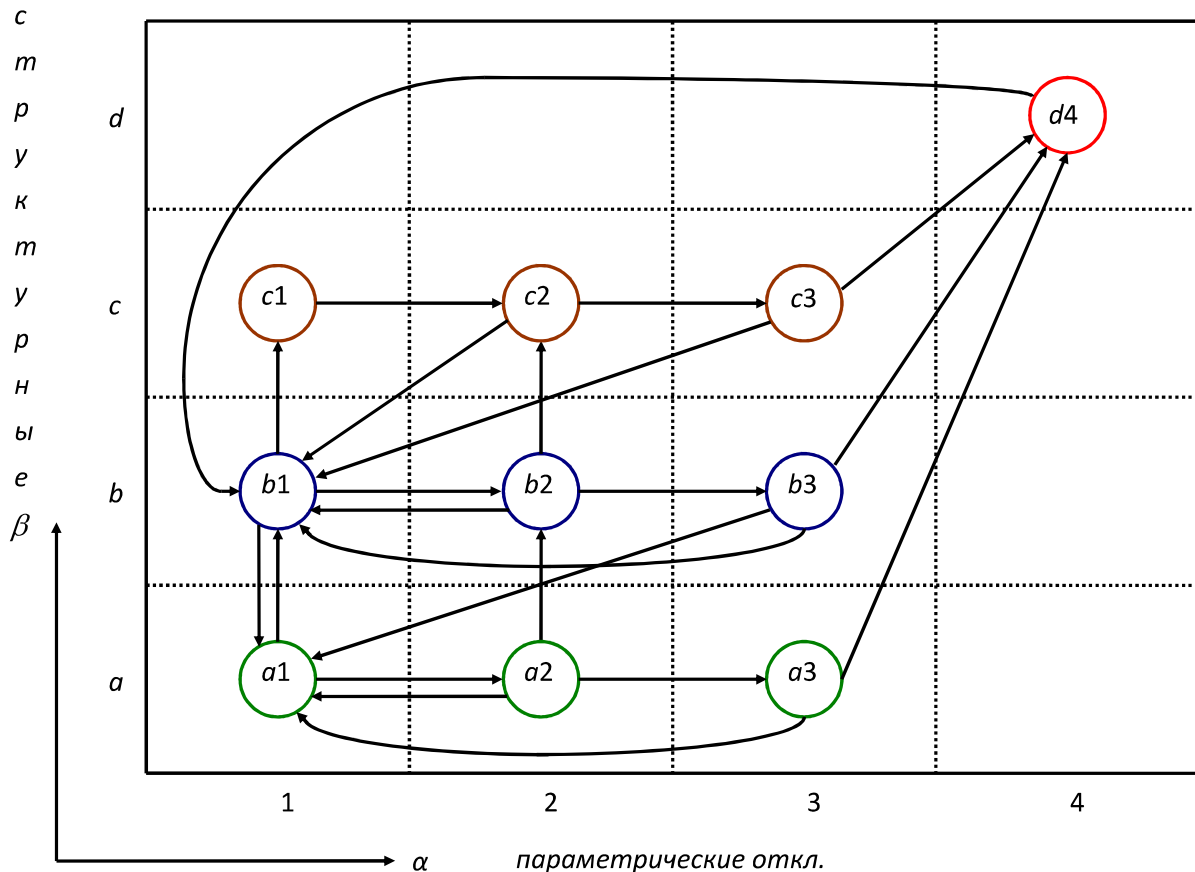


Рис. 1. Граф эволюции состояния электротехнической системы

Параметрические возмущения обусловлены непрерывным изменением интенсивности свойств комплектующих элементов ЭТС вследствие их старения, износа и действия внешних возмущающих воздействий. Эти возмущения приводят к непрерывному накоплению параметриче-

ских отклонений и, как следствие, к изменению запаса работоспособности ЭТС, каждому уровню которого в соответствии с заданной дискретностью ставится определенное состояние.

Структурные возмущения в отличие от параметрических возмущений приводят к накоплению структурных отклонений и, как следствие, к потере одного или нескольких свойств комплектующих элементов ЭТС, что отражается на изменении структуры ЭТС и в конечном счете приводит к ее внезапному отказу.

Представленный на рис. 1 граф дополняет установленные стандартом виды технических состояний. Рассмотрим эти состояния:

$\{a1\}$ – множество исправных состояний, различающихся объемом накопленных параметрических отклонений, которым соответствуют различные уровни $\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_{d-1}$ запаса работоспособности ЭТС;

$\{b1\}$ – множество работоспособных состояний, которые в общем случае различаются объемом накопленных параметрических и структурных отклонений. Различный объем структурных накоплений может иметь место, например, в ЭТС с резервированием;

$\{c1\}$ – множество состояний правильного функционирования, различающихся объемом накопленных параметрических и структурных возмущений в ЭТУ;

$\{a2\}$ – множество состояний ЭТС, при которых ни в одном режиме работы не выполняются внешние условия работоспособности системы. ЭТС выполняет свою основную функцию, но один или несколько показателей качества находятся за допустимыми пределами. Вместе с тем в ЭТС отсутствуют структурные отклонения, и как следствие – внезапный отказ;

$\{b2\}$ – множество состояний, отличающихся от множества $\{a2\}$ тем, что в ЭТС имеют место структурные отклонения, которые, однако, не привели к внезапному отказу;

$\{c2\}$ – множество состояний, отличающихся от множества $\{b2\}$ тем, что в ЭТС имеет место внезапный отказ и он выполняет возложенные на него функции с недопустимо низким уровнем качества лишь в одном или нескольких (но не всех) режимах работы;

$\{a3\}$ – множество состояний, различающихся уровнем параметрических отклонений, при которых ЭТС не способен выполнять возложенные на него функции вследствие недопустимо низких значений показателей качества. Вместе с тем в ЭТС отсутствуют структурные отклонения;

$\{b3\}$ – множество состояний, отличающихся от множества $\{a3\}$ тем, что в ЭТС имеют место структурные отклонения, которые, однако, не привели к внезапному отказу;

$\{c3\}$ – множество состояний, отличающихся от множества $\{c2\}$ тем, что ЭТС не способен выполнять возложенные на него функции вследствие недопустимо низких значений показателей качества;

$\{d4\}$ – множество состояний, различающихся уровнем параметрических и структурных отклонений, при которых ЭТС находится в предельном состоянии и физически не может выполнять возложенные на него функции (показатели назначения находятся на нулевом уровне).

Представим в виде графа (рис. 2) множество $\{b1\}$ работоспособных состояний ЭТС. Для наглядности будем предполагать, что в системе имеет место однократное резервирование элементов и три уровня качества, каждый из которых характеризуется запасом работоспособности ρ_1, ρ_2 и ρ_3 соответственно. Зная интенсивности переходов $\lambda_{12}, \dots, \lambda_{65}$ из одного состояния в другое, можно, используя уравнения Колмогорова, получить динамическую модель графа и вычислить стационарные вероятности пребывания ЭТС в каждом состоянии.

В общем случае, следуя введенному определению, для класса работоспособных состояний можно выделить сколь угодно большое число состояний, различающихся значением запаса работоспособности системы.

Качество и эффективность работы ЭТС определяются способами управления процессами формирования и сохранения ее необходимых свойств и значений параметров на всех этапах и стадиях жизненного цикла: при исследовании, проектировании, изготовлении, обращении, эксплуатации. Под управлением состоянием будем понимать целенаправленный процесс изменения управляющих воздействий, внутренних параметров и структуры ЭТС с целью предупреждения и устранения отказов ее элементов и достижения оптимального по заданному критерию качества функционирования.

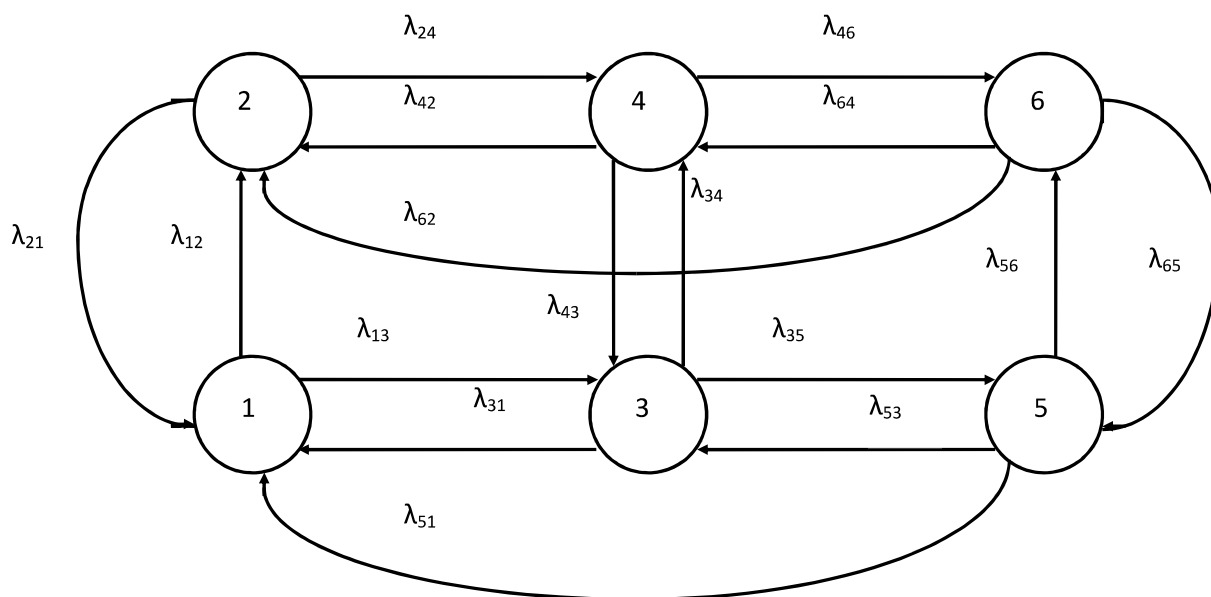


Рис. 2. Граф эволюции работоспособных состояний ЭТС

Для раскрытия сущности основных этапов жизненного цикла ЭТС следует использовать методологию системного анализа [1, 3].

Структура системотехнического комплекса ЭТС

Для анализа основных задач управления качеством технической эксплуатации ЭТС рассмотрим структуру системотехнического комплекса (рис. 3), которая включает в свой состав управляющую (УС), обслуживающую (ОС) и обеспечивающую системы. В состав последней входят: система материально-технического обеспечения (СМТО), система информационного обеспечения (СИО) и другие системы.

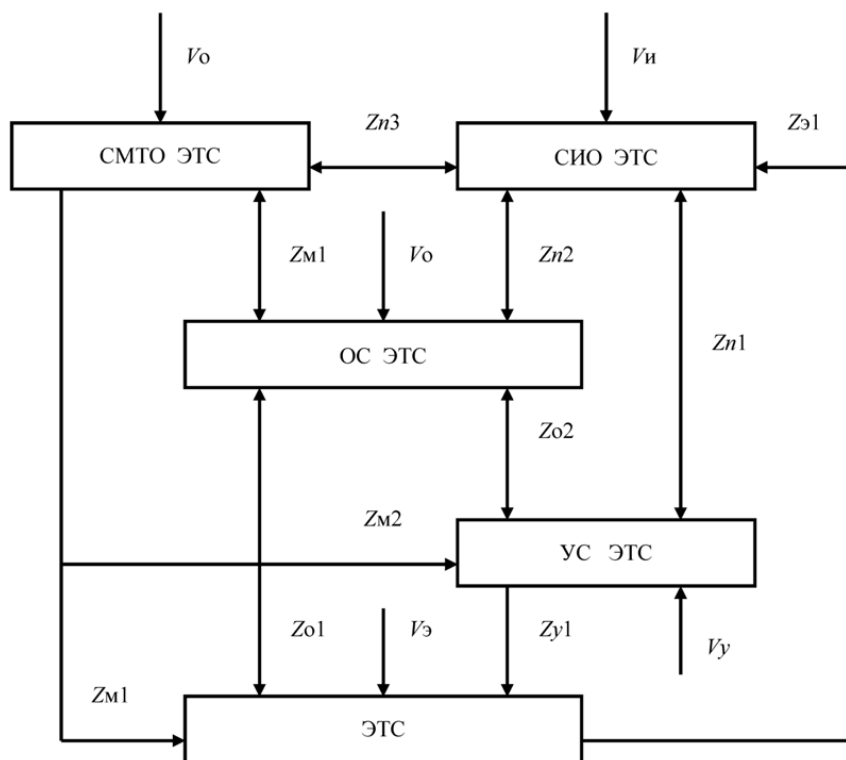


Рис. 3. Структура системотехнического комплекса ЭТС

Под управляющей понимается система, осуществляющая пуск, реверсирование, остановку, защиту электрических машин или других элементов ЭТС, а также обеспечивающая поддержание заданных режимов самих ЭТС и их изменение в соответствии с потребностями целевого использования. Управляющую систему образуют: персонал, управляющий работой ЭТС, необходимые технические средства управления, расходные материалы, продукты, изделия, техническая документация.

Обслуживающая система занимается поддержанием и восстановлением работоспособного состояния ЭТС и ее элементов посредством технического обслуживания и ремонта. В ее состав входят соответствующие персонал, технические средства, расходные материалы, продукты, изделия и техническая документация. Система материально-технического обеспечения создает материальные условия для нормального функционирования ЭТС и ее управляющей, обслуживающей и информационной систем, снабжая их необходимыми расходными материалами, продуктами и изделиями. Система информационного обеспечения предназначена для получения, переработки, передачи и хранения информации о состоянии ЭТС и составляющих ее ЭТУ [5].

Связь ЭТС с управляющей, обслуживающей и обеспечивающей системами в соответствующих им условиях V изображена на схеме (см. рис. 3) векторами направленных воздействий Z . Индексы при Z и V отражают их принадлежность к одной из указанных систем, а также порядковый номер воздействия. При эксплуатации ЭТС образуются несколько замкнутых контуров управления качеством, отличающиеся один от другого принципом действия, характером решаемых задач и техническими средствами СИО. В зависимости от вида информации V_0 и V_n , получаемой соответственно обслуживающей и информационной системами, можно выделить контур оперативного управления состоянием ЭТС, который базируется на информации о фактическом состоянии системы, получаемой в результате периодической проверки, и контур статистического управления состоянием ЭТС, который основывается на статистической информации о поведении однотипных ЭТУ. Контур управления качеством материально-технического обеспечения ЭТС образован связями $Z_{\alpha 1}, Z_{\alpha 3}, Z_{\alpha n}$. Основной задачей контура является обеспечение ЭТС комплектами запасных изделий и приборов (ЗИП).

Структурная схема процесса управления состоянием ЭТС

В наиболее общем виде процесс управления состоянием ЭТС, охватывающий все стадии и этапы ее жизненного цикла, можно представить в виде структурной схемы, приведенной на рис. 4. В качестве объекта управления выступают свойства и параметры ЭТС и составляющих ее ЭТУ. Можно выделить три контура управления состоянием – параметрическое, координатное и структурное.

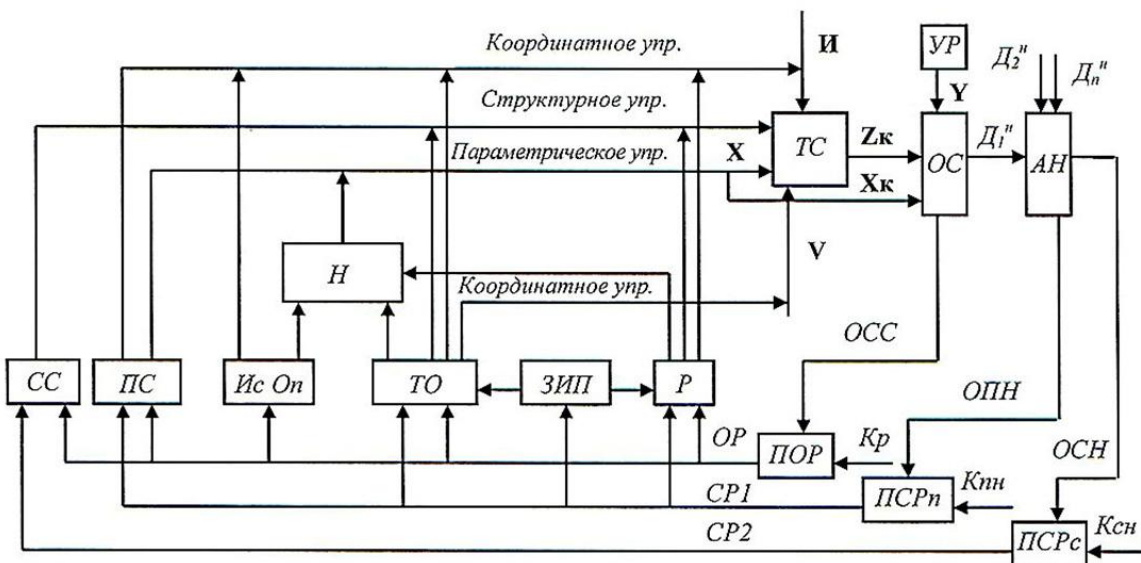


Рис. 4. Структура процесса управления состоянием ЭТС

Параметрическое управление предполагает целенаправленное воздействие на внутренние параметры X ЭТС. При координатном управлении эти воздействия представляют собой изменение параметров входных сигналов u и параметров внешних воздействий V , определяющих условия эксплуатации ЭТС. При структурном управлении управляющими воздействиями являются изменение состава элементов ЭТС и (или) связей между ними. Такое управление характерно для адаптивных систем. Необходимым условием реализации любого контура управления является возможность определения состояния ЭТС и ее элементов в любой момент времени.

При оперативном управлении принятие оперативного решения (ПОР) осуществляется с учетом требований заданного критерия работоспособности K_p ЭТС. Принятие статистического решения (ПСРп и ПСРс) производится на основе оценки параметрической надежности (ОПН) и оценки структурной надежности (ОСН), которые получают в результате анализа надежности (АН) по донесениям $D_1^n, D_2^n, \dots, D_n^n \rightarrow$ об изменениях технического состояния, постепенных и внезапных отказах элементов ЭТС. При этом учитываются требования критерия параметрической надежности $K_{пн}$ и критерия структурной надежности $K_{сн}$. Оперативное решение (ОР) определяет на стадии эксплуатации ЭТС необходимый объем технического обслуживания (ТО) по состоянию или ремонта (Р) по состоянию, а также виды структурного синтеза (СС).

Параметрическое управление при испытании опытных образцов (ИсОп) осуществляется в результате выполнения операции настройки (Н). Структурный синтез реализуется в виде функций реконфигурации структуры системы и аварийной защиты. На стадии проектирования решение предполагает выполнение структурного синтеза (поиск варианта технического решения выбор оптимального по заданному критерию варианта) и параметрического синтеза (ПС). Статистическое решение (СР1) на стадии эксплуатации предусматривает регламентированное техническое обслуживание и ремонт, а на стадии проектирования – реализацию задачи параметрического синтеза по критерию, учитывающему показатели параметрической надежности ЭТС. Статистическое решение (СР2) предполагает на стадии проектирования реализацию функции резервирования с целью обеспечения требуемой структурной надежности.

Как следует из рис. 4, можно выделить три основных принципа управления – по ресурсу, по уровню надежности и по состоянию.

При управлении по ресурсу ЭТС эксплуатируется до выработки определенного ресурса. При управлении по уровню надежности ЭТС эксплуатируется до тех пор, пока интенсивность отказов не превысит установленный уровень. При управлении по состоянию ЭТС эксплуатируется до тех пор, пока ее параметры находятся в пределах установленных допусков.

Важнейшим элементом эксплуатации по состоянию является контроль, с помощью которого осуществляется наблюдение за состоянием ЭТС, его оценка и прогнозирование. При этом каждому состоянию соответствует определенный запас работоспособности ЭТС или его элемента. Под запасом работоспособности будем понимать степень приближения вектора фактического состояния ЭТС к его предельно допустимому значению, множество предельно допустимых значений которого определяется границей области работоспособности [6].

Заключение

Процесс управления состоянием сложных ЭТС предполагает необходимость решения целого комплекса задач анализа и синтеза, имеющих место на различных этапах их жизненного цикла. Функционально-структурный подход позволяет определить стратегию решения этих задач и выделить их основные особенности.

Список литературы

1. Саушев, А. В. Методы управления состоянием электротехнических систем / А. В. Саушев. – СПб. : Санкт-Петербург. гос. ун-т водных коммуникаций, 2004. – 126 с.
2. Юрков, Н. К. Инструментальная среда повышения надежности РЭС / Н. К. Юрков, Б. К. Кемалов, В. П. Перевертов // Надежность и качество : тр. Междунар. симп. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 2. – С. 192–194.
3. Юрков, Н. К. Оценка надежности радиовысотометров с учетом предварительной информации / Н. К. Юрков, А. Е. Бухаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 4. – С. 176–186.

4. Абрамов, О. В. Параметрический синтез стохастических систем с учетом требований надежности / О. В. Абрамов. – М. : Наука, 1992. – 176 с.
5. Юрков, Н. К. Системный подход к организации жизненного цикла сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 27–34.
6. Саушев, А. В. Области работоспособности электротехнических систем / А. В. Саушев. – СПб. : Политехника, 2013. – 407 с.

УДК 629.12.04

Саушев, А. В.

Структура процесса управления состоянием сложных электротехнических систем / А. В. Саушев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 23–30.

Саушев Александр Васильевич

кандидат технических наук, профессор,
кафедра электропривода и электрооборудования
береговых установок,
Государственный университет морского
и речного флота им. адмирала С. О. Макарова,
198034, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
(812) 334-38-34
E-mail: saushev@bk.ru

Аннотация. Приводится функционально-структурный анализ сложных электротехнических систем, и рассматриваются методологические основы управления их состоянием на различных стадиях жизненного цикла. Приводятся определения основных понятий, и раскрывается сущность эволюции состояния электротехнических систем. Рассматриваются возможные принципы управления и особенности их реализации.

Ключевые слова: системный анализ, электротехническая система, жизненный цикл, управление состоянием, структурная схема.

Saushev Aleksandr Vasil'evich

candidate of technical sciences, professor,
sub-department of electric drive and electric equipment
of coastal installations,
State University of sea and river fleet
named after admiral S. O. Makarov,
198034, 5/7 Dvinskaya street, St. Petersburg, Russia
(812) 334-38-34
E-mail: saushev@bk.ru

Abstract. The functional and structural analysis of difficult electrotechnical systems is provided, and methodological bases of management by their condition at various stages of life cycle are considered. Definitions of the main concepts are given, and the essence of evolution of a condition of electrotechnical systems reveals. The possible principles of management and feature of their realization are considered.

Key words: system analysis, electrotechnical system, life cycle, management of a condition, block diagram.