

ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРОДУКЦИОННЫЕ ПРАВИЛА В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Гольдин Д.А., Чесноков А.М.
(Институт проблем управления РАН, Москва)
goldind@ipu.ru

Предложена методика использования средств искусственного интеллекта при построении многоуровневых информационно-вычислительных комплексов (ИВК) систем электроснабжения (СЭС) автономных объектов, основанная на совместном функционировании аппаратных средств, системы распределенных микропроцессоров и алгоритмов искусственного интеллекта.

Автономные системы электроснабжения, информационно-вычислительные комплексы, экспертные системы, продукционные правила, коэффициенты доверия.

Введение

К причинам, вызвавшим ускоренное развитие ИВК СЭС автономных объектов (авиационные и космические аппараты, вредные производства), следует отнести увеличение необходимой мощности электроснабжения, повышение ресурса и вероятности безотказной работы, которое уже не могло быть достигнуто за счёт улучшения силового оборудования или совершенствования структур систем распределения электрической энергии.

Требование автономности функционирования СЭС вытекает из практической невозможности непосредственного управления объектом оператором с управляющего комплекса. В связи с этим исчезает возможность оперативного вмешательства в управление СЭС в целом и ее подсистемами в частности и

должно быть обеспечено автономное, то есть независимое от оператора функционирование всех частей СЭС и ее ИВК в реальном времени управления с учетом программного управления, нештатных ситуаций и ресурсной деградации элементов СЭС. Следует заметить, что такое определение автономности отличается от аналогичного термина, принятого в теории автоматического управления, где под автономностью понимается независимость каждой из множества регулируемых величин в многоконтурной системе автоматического управления от всех остальных регулируемых величин или от всех задающих воздействий, кроме одного ей соответствующего.

Порядок подачи материала в этой статье определяется тем, что специфика автономной СЭС, как объекта управления и информатизации, первична, поэтому содержание интеллектуального комплекса распределения ресурсов, описанного во втором разделе, является следствием априорных свойств автономной СЭС.

1. Структура и функциональные элементы ИВК СЭС

Для обеспечения автономности СЭС предлагается стратегия построения ИВК автономных объектов на основе определения функций её отдельных элементов, способов их взаимодействия и разработки архитектуры. ИВК должен обеспечить выполнение рабочих функций СЭС, которые планируются и активируются с учётом имеющихся аппаратных, информационных и временных ресурсов и корректируются в случае отклонений от нормы. Функции диагностики технического состояния СЭС выполняются периодически или в тех случаях, когда в работе системы появляются сбои, аномальные отклонения или отказы подсистем. При этом определяются координаты, причины и последствия отклонений. Функции восстановления являются реакцией на обнаруженные отклонения. Они требуют определения и последующего привлечения соответствующих резервных ресурсов, а также планирования, составления графиков и проведения восстановительных операций. Функции сборки системы необходи-

мы в процессе первоначальной установки или последующего расширения системы. При этом необходимо знать текущие координаты и окончательные координаты, а также средства ввода каждого включаемого в систему компонента.

Обеспечение автономной работы СЭС с помощью бортового ИВК позволяет улучшить следующие характеристики СЭС [1]: количество энергии, поступающей к потребителям, увеличивается за счёт её более рационального расходования; количество нештатных ситуаций уменьшается за счет увеличения скорости восстановления после ликвидации аварии (нет необходимости участия оператора, так как СЭС может функционировать без связи с управляющим центром); увеличивается срок службы электрооборудования вследствие применения рациональных стратегий его использования.

Предлагается структура ИВК автономной СЭС (рис. 1), которая выполняется многоуровневой с иерархическими связями.

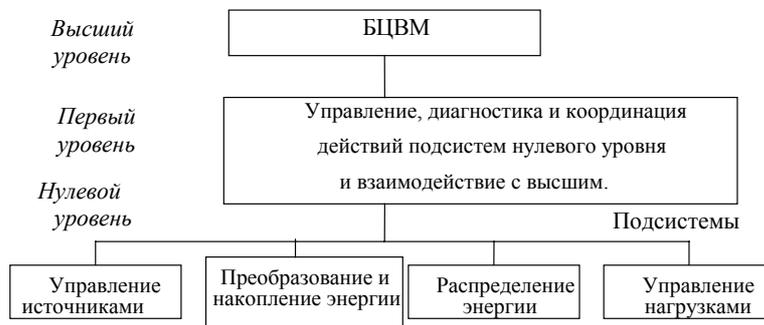


Рис. 1. Структура ИВК автономной СЭС

На нулевом уровне управления решаются детерминированные задачи локального автоматического управления: регулирование отдельных процессов генерирования, преобразования, управления и распределения; защита электротехнического оборудования от недопустимых режимов работы; логическое, ситуационное управление процессами; обмен информацией с более высоким уровнем управления.

На первом уровне управления решаются менее детерминированные задачи, содержащие условия по состоянию оборудования и режимам работы подсистем СЭС. В число этих режимов входят следующие: координация действий нулевого уровня управления, задание режимов, уставок регулирования и защит, определение состояния оборудования и порядка действий на заданном режиме; ввод резерва или изменение состава и структуры электротехнического оборудования нулевого уровня; диагностика отказов оборудования нулевого уровня; изменение алгоритмов функционирования подсистем нулевого уровня при деградации оборудования; связь с более высоким уровнем.

Высший уровень ИВК представляет собой гибридную ЭС. Связь между различными уровнями организуется с помощью локальной сети, причем более высокий уровень управления связывается со всеми контроллерами более низкого уровня управления. Устройства управления нулевого уровня связываются непосредственно с датчиками измеряемых величин и исполнительными механизмами.

Первый или второй уровень управления должен быть связан через дистанционную магистраль с центральным вычислительным комплексом.

В настоящее время при проектировании распределённых ИВК СЭС с иерархической структурой используются методы искусственного интеллекта, основанные на гибридных экспертных системах (ЭС) [1-2], на которые возлагаются функции: планирование стратегий для разрешения неоднозначных случаев; прогнозирование последствий неисправностей для текущего и будущего поведения системы; управление конфигурацией силовой части СЭС с целью минимизации последствий неисправностей; планирование коммутаций нагрузок.

Знания для ЭС, требуемые для контроля и диагностики элементов СЭС, подразделяются на следующие *категории*: непосредственные знания об элементах системы; знания о физических связях каждого элемента; знания о функциональных взаимоотношениях и взаимодействиях между элементами; зна-

ния о нормальных операциях в системе; знания об отказах и варианты поведения системы в нештатных ситуациях.

Функциональная единица ИВК, осуществляющая диагностирование и состоящая из датчиков интерфейса и программного обеспечения, работает в реальном масштабе времени, и это должно учитываться при её создании.

Принципы, лежащие в основе диагностирования СЭС, основаны на сравнении данных из априорной базы знаний (БЗ) о нештатных ситуациях с текущими измеренными координатами СЭС. В случае недостатка информации в базе знаний подключаются расчеты по математическим моделям СЭС, результаты вычислений по которым дополняют вектор измеренных координат, позволяют принять однозначное решение и дать прогноз.

Модели элементов СЭС должны иметь требуемую точность и должны быть достаточно просты для выполнения вычислений в пределах ограниченного времени. Они могут выполняться как количественные, качественные, статические или динамические.

Наиболее предпочтительным видом диагностирования элемента является прогноз развивающейся аварии, поскольку в этом случае её можно предотвратить. В электротехнических системах существует ряд методов, позволяющих выполнить прогнозирование развивающейся аварии. Прогноз может делаться на основании превышения допустимой температуры элемента, ухудшения сопротивления изоляции, увеличению вибраций в электромеханических элементах и т. д.

Степень сложности диагностирования системы в целом может быть разной. В простейшем случае это может быть измерение и сравнение токов в различных ветвях СЭС, основанное на законах Кирхгофа. Усложнением этого метода может быть применение баланса мощностей в системе и т.д. Однако во всех случаях необходимо уметь определять характеристики источников токов нагрузки. Для их определения достаточно знать два параметра характеристики: крутизну (или жёсткость) и начальный ток. С помощью этих характеристик по величинам напряжения на шинах могут быть определены токи подключённых нагрузок, а также общий ток, протекающий по шинам. Таким

образом, зная параметры характеристик нагрузок, можно прогнозировать величины токов на всех участках цепей СЭС. Помимо указанных, в *сведения о нагрузках* [2] включаются: название нагрузки; пространственные координаты; текущее состояние (норма, цепь разомкнута, неустойчивое короткое замыкание, устойчивое короткое замыкание); суммарное время включения; время наработки на отказ; средняя долговечность; стандартное отклонение от средней долговечности; количество циклов включения/отключения.

2. Структура интеллектуального комплекса распределения ресурсов ИВК СЭС

Характер функционирования интеллектуальной части ИВК СЭС со структурой и свойствами, описанными выше, рассмотрим на примере *интеллектуального комплекса распределения ресурсов* (ИКРР) автономной СЭС.

Целью его создания является обеспечение безопасного, высококачественного распределения энергетических ресурсов СЭС в сложных условиях при наличии внешних помех в каналах связи и отказов внешнего и бортового оборудования. На рис. 2 приведена структурная схема ИКРР где обозначено: ЭС ФО – экспертная система руководства функционированием объекта, ГР – подсистема генерации режимов, САУ – система автоматического управления, СОИ – система отображения информации.

В общем, виде задачи управления и функции отдельных систем комплекса ИКРР можно описать следующим образом (без задач бортовой диагностики).

Если в процессе работы СЭС в ЭС ФО поступает информация об изменении внешних условий или помехах, то она, оценив обстановку, при необходимости включает подсистему генерации режимов (подсистема ГР), выдает ей целевые установки и оценивает полученные варианты режимов. Затем, выбрав лучший вариант и сообщив об этом оператору, либо сразу приступает к его реализации, изменив соответствующим образом, план работы СЭС, либо предварительно предъявляет оператору варианты

сценариев с оценкой степени риска и ограничений на динамические параметры.

В процессе работы ЭС ФО контролирует: источники информации, средства связи, исполнительные органы, ограничения на параметры и режимы управления, точность выполнения отдельных режимов управления. Если в ЭС ФО поступает информация об отказах или отсутствии сигналов от подсистем, то

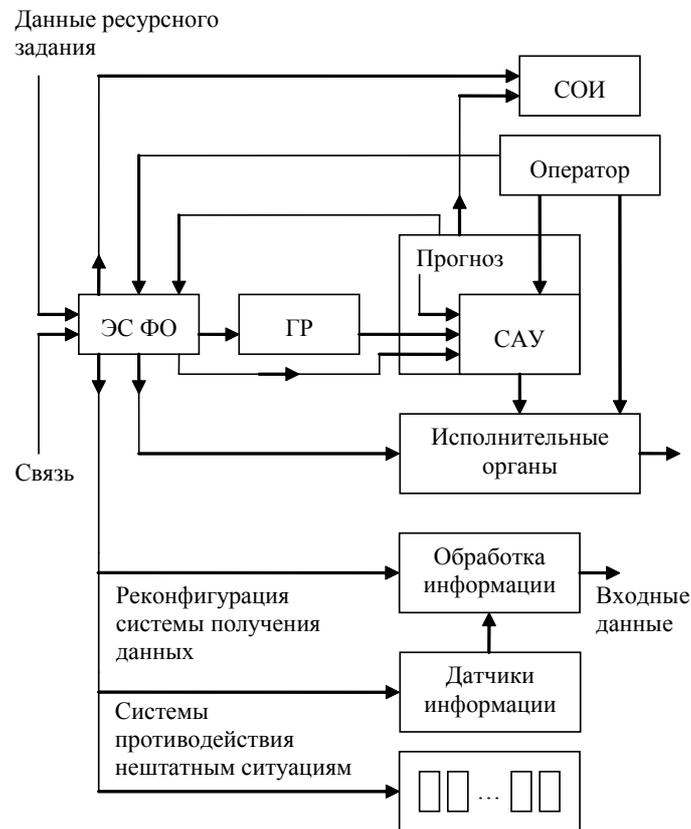


Рис. 2. Структура интеллектуального комплекса распределения ресурсов автономной СЭС.

на основе имеющихся у нее данных и знаний она производит реконфигурацию, как системы предварительной обработки информации, так и системы управления ФО, а также вносит необходимые изменения в план режимов СЭС. При этом возможны варианты, когда она оставит за автоматикой лишь часть функций управления СЭС, передав основную часть оператору, продолжая работать в режиме контроля и совета.

При оценке точности выполнения режимов управления СЭС и возможности продолжения её функционирования ЭС ФО использует данные качественного прогноза, полученного на основе имеющихся знаний, а также точную прогнозную информацию от системы управления объектом и информацию о внешних возмущениях. В необходимых случаях ЭС ФО предупреждает оператора, а в критических ситуациях принимает решение самостоятельно.

САУ автономной СЭС при ее использовании в составе ИКРР должна отвечать следующим *требованиям*, которые во многом аналогичны требованиям к САУ современных сложных технических объектов:

1. Высокое качество управления.

В настоящее время среди разработчиков САУ получило широкое распространение заблуждение, что недостатки алгоритмов управления можно устранить, введя в систему интеллектуальную компоненту. Однако ЭС предназначены для решения задач управления на тактико-стратегическом уровне. За уровень непосредственного управления СЭС должны отвечать алгоритмы управления САУ, которые и должны обеспечивать высокое качество, под которым понимается: отсутствие взаимного влияния каналов управления; высокое качество управления в условиях внешних помех; постоянство динамических характеристик (важно для контроля со стороны оператора и ЭС ФО); возможность работы САУ со значительными скачками по входным параметрам и с заданиями, поступающими в виде кусочно-линейных функций. Это требование связано с характером команд, формируемых ЭС ФО.

2. «Человекоподобный» характер управления САУ.

Это требование важно не только для повышения доверия оператора к системе, но и для того, чтобы обеспечить единообразное построение и работу ЭС ФО как в ручном, так и в автоматическом режимах.

3. Исключение возможности потери управления СЭС при появлении режимов обрыва или короткого замыкания.

4. Возможность изменения приоритетов управления режимами СЭС.

Два последних требования актуальны для ЭС ФО в сложных условиях функционирования или при нештатных ситуациях.

5. Возможность быстрого перехода с автоматического на ручной режим управления и обратно.

6. Возможность комбинаций каналов ручного и автоматического режимов.

7. Возможность работы САУ с различными источниками информации.

Требования 5-7 важны для обеспечения функционирования СЭС при отказах внешнего или бортового оборудования.

8. Возможность использования прогнозной информации. Прогнозная информация важна для контроля оператором работы СЭС. Та же самая информация поступает в ЭС ФО.

9. Адаптация САУ ко всем возможным рабочим режимам.

10. Наличие входов по основным ограничениям автоматического режима. В зависимости от режима и условий работы ЭС формирует все основные ограничения САУ.

Одними из основных требований к бортовым ЭС, в том числе к ЭС ФО, являются высокое быстродействие и способность работать с неполной и недостоверной информацией. Указанные требования определяют *средства* реализации ЭС ФО: модульность системы, использование правил с коэффициентами доверия (КД), наличие модулей с байесовской логикой и модулей «алгоритмического» типа (для предварительной обработки информации, реализации подсистемы ГР и доступа к внешним БД). Предлагаемая структура использования различных средств реализации основных модулей ЭС ФО показана на рис. 3.

Модульность системы позволяет: вести разработку ЭС по частям, обрабатывая БЗ для отдельных задач; относительно просто модифицировать систему и наращивать ее возможности, изменяя или добавляя модули; повысить эффективное быстродействие за счет работы машины вывода только с необходимыми для данной ситуации модулями; сократить объем БЗ ЭС за



Рис. 3. Модули экспертной системы руководства функционированием объекта и средства их реализации

счет использования разными модулями одних и тех же подмодулей; организовать разбиение БЗ на управляющие модули (отвечают за общий ход решения) и предметные модули (решают конкретные задачи); организовать гибкую функциональную структуру модулей, управляемую ситуациями (данными).

Последние два обстоятельства особенно важны, так как, фактически, они означают адаптацию функциональной структуры ЭС под различные условия, ситуации и задачи.

Продукционные правила вида «Если-То» - наиболее распространенный метод представления знаний в ЭС. Правила обеспечивают естественный способ описания процессов в сложной изменяющейся внешней среде. В программах традиционного типа схема передачи управления предопределена в самой программе, а ветвление происходит только в заранее выбранных точках. Для интеллектуальных задач, где ветвление скорее норма, чем исключение, этот способ малоэффективен [3]. В этих задачах правила дают возможность на каждом шаге решения оценить ситуацию и предпринять соответствующие действия. Кроме этого, применение правил обеспечивают следующие преимущества: простота и высокое быстродействие; модульность - каждое правило описывает небольшой, относительно независимый блок знаний (микромодуль); удобство модификации - старые правила можно изменять и заменять на новые относительно независимо от других правил; ясность: знания в виде правил легко формулируются и воспринимаются экспертами; прозрачность: использование правил облегчает реализацию способности системы к объяснению принятых решений и полученных результатов; возможность постепенного наращивания: добавление правил в БЗ происходит относительно независимо от других правил.

Для работы с ненадежными данными и знаниями используются модифицированные продукционные правила, дополненные специальной характеристикой, отличной от «истина - ложь». Она может иметь символическое выражение в виде дополнительных значений: «верно», «весьма вероятно», «вероятно», «маловероятно» и «невозможно». Однако чаще всего для степени

уверенности в данных и знаниях используется числовая характеристика в форме действительного числа в диапазоне от 0 до 1 или целого числа, например, от 0 до 100. Такую числовую характеристику называют по-разному – «коэффициент определенности», «коэффициент уверенности», «коэффициент доверия», «степень доверия», «субъективная вероятность» и т.п.

Применение правил с несложным механизмом обработки целочисленных КД (рис. 3) позволяет обеспечить высокое быстродействие со средним уровнем робастности системы.

Для ситуаций, характеризующихся высокой степенью ненадежности данных и знаний, необходимо использовать специальные средства. В частности, возможно использование систем с байесовской логикой, в которых правила организуются в байесовскую сеть вывода. Эти системы отличаются очень высоким уровнем робастности, однако, требуют больших вычислений. Поэтому в составе инструментальных средств построения бортовых ЭС целесообразно иметь специализированные модули с байесовской логикой.

Предложенные в статье средства искусственного интеллекта для ИВК автономных СЭС были реализованы, в частности, в научно-исследовательской работе по разработке ИВК высокоресурсного автономного космического аппарата с химическими источниками энергии. Другими областями приложения полученных результатов могут быть ИВК автономных транспортных средств или вредных производств.

Литература

1. GOLDIN D.A., PAVLOV B.V., CHESNOKOV A.M. *Structures of informational control complex of technical systems / IFAC Symposium on Manufacturing, Modeling, Management and Control. MIM 2000. Greece, 2000. Preprints, pp. 217-221.*
2. S.C.LEE, L.E.LOLLAR. *Development of component centred fault monitoring and diagnosis. Knowledge based system for space power system // Proc. 23th Intersoc Energy Convers. Eng. Conf., 1988, V.1, p. 377-381.*

3. *Построение экспертных систем.* Под ред. Ф. Хайеса-Рота и др. // М., «Мир», 1987.