

УДК 697.317+62-533.66

А. В. Палагин, аспирант
 Е. В. Корепанов, кандидат технических наук, доцент
 ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ТЕПЛО-ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЯ НА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКАХ ЭНЕРГИИ

Рассматривается управление многокомпонентной (сложной) системой жизнеобеспечения здания с точки зрения современных тенденций системного анализа. Приведена поэтапная формализация (в первом приближении) задачи управления. В качестве математического аппарата системы управления предложена однослойная нейронная сеть. В контексте сложности задачи указаны достоинства и недостатки решения, рассмотрены некоторые аспекты фактической реализации данного подхода.

Ключевые слова: системный анализ, комплексная оценка, энергоэффективность, альтернативная энергетика, задача управления, тепловой насос.

Современные тенденции развития мировой энергетики и экономики требуют решения сложного комплекса задач:

1) повышение эффективности имеющихся технологий;

2) разработка новых технологий, изначально ориентированных на энерго- и ресурсосбережение. Особо актуальным для России является освоение технологий альтернативной энергетики на возобновляемых ресурсах как солнечной [1], так и геотермальной [2–5];

3) удовлетворенность участников, вовлеченных в процессы жизни систем [6];

4) возможность освоения новых технологий на имеющихся ресурсах;

5) оценку эффективности технологии на всех стадиях ее жизни [7];

6) увязку новой технологии с существующими технологиями (бесконфликтное внедрение, развертывание – [8]);

7) эффективное управление сложными многокомпонентными системами.

При этом в области задачи управления наблюдается сильное смещение от простого исполнения прямой функции (например, поддержание требуемой температуры) в сторону максимального удовлетворения участников процессов каждой стадии жизни системы. Данный принцип давно и надежно закрепился в области управления предприятиями; теперь же он начинает проникать в область управления техническими системами. Процессы, в которых задействованы современные технологии, предъявляют серьезные требования к гибкости систем. Особо важной особенностью современных систем становится способность к обучению, расширяемость, адаптируемость, масштабируемость.

Рассмотрим модель системы жизнеобеспечения здания, энергоснабжение которого обеспечивается как традиционными источниками энергии, так и альтернативными (рисунок).

Поскольку задача управления данной системой сложна и во всей полноте решить ее традиционным методом описания и алгоритмизации невозможно (слишком большое количество ситуаций, поведение

системы в которых необходимо спрогнозировать), предлагается воспользоваться методом постепенной формализации модели.



Источники энергообеспечения здания

На первом этапе определяются задачи, которые решает проектируемая система управления. Задачи складываются из сочетаний четырех групп потребителей энергии (как тепловой, так и электрической):

1. Система горячего водоснабжения (ГВС) – двоичный код задачи 0001.

2. Система отопления (СО) – двоичный код задачи 0010.

3. Система холодоснабжения (ХС) – двоичный код задачи 0100.

4. Бытовое электроснабжение (ЭС) – двоичный код задачи 1000.

Общее количество сочетаний равно 16 – от 0000 (не требуется решение ни одной подзадачи) до 1111 (требуется решение всех подзадач).

На втором этапе определяются ключевые компоненты, входящие в систему, их взаимодействие друг с другом (все то, вследствие чего множество компонентов организуются в систему, по определению из [9]).

Каждой подзадаче из первого этапа соответствует некоторое количество технологических цепочек, с помощью которых можно реализовать передачу энергии от источника к потребителю. Технологическая цепочка представляет ряд технологических

звеньев (технологическое звено – это и есть упомянутый компонент системы); начальным звеном всегда выступает источник энергии (ветер, солнце, центральное электроснабжение и т. д.), конечным – всегда потребитель энергии (ГВС, СО, ХС или бытовое ЭС). Промежуточными звеньями является то или иное оборудование.

Все оборудование можно условно разделить на две группы:

1. Оборудование, отвечающее за отбор энергии от источника, транспортирование и передачу энергии потребителю:

- теплый пол;
- радиаторы и конвекторы водяного отопления;
- фанкойлы;
- приточная система вентиляции;
- канализационный теплоутилизатор;
- система охлаждения электрогенератора;
- вводное распределительное устройство (централизованное электроснабжение);
- солнечный плоский или вакуумный коллектор;
- ветрогенератор;
- солнечные электрические батареи;
- система сбора низкопотенциальной теплоты грунта (горизонтальный и вертикальный коллектор);
- вытяжная система вентиляции;
- теплоутилизатор системы вентиляции;
- наружный вентиляционный блок;
- канальный электронагреватель;
- канальный нагреватель;
- канальный охладитель.

2. Оборудование, отвечающее за преобразование энергии (энергетическое оборудование):

- теплонасосная установка;
- электрический котел;
- газогенератор;
- газовый котел или твердотопливный котел;
- электрогенератор или когенерационная установка.

Все многообразие компонентов системы разбивается на технологические пары, состоящие из отдающего теплоту компонента и принимающего. Пары объединяются в технологические цепочки передачи теплоты (от первичного источника к конечному потребителю). Для данной задачи может быть смоделировано 57 технологически взаимодействующих пар, образующих 71 технологическую цепочку.

Ниже приведены примеры технологической цепочки для получения ГВС.

1. Бытовые канализационные стоки → канализационный теплоутилизатор → теплонасосная установка → ГВС.

2. Наружный воздух (источник теплоты) → наружный вентиляционный блок → теплонасосная установка → ГВС.

3. Центральное газоснабжение → газовый котел → ГВС.

4. Солнце → солнечный коллектор → теплонасосная установка → ГВС.

Технологическая цепочка обладает важным свойством: количество задействованных звеньев. Эффективность, применимость всей цепочки зависит от свойств каждого звена. Так, ненадежное, выработавшее свой ресурс оборудование или слишком дорогой источник теплоты ставит под вопрос применение всей цепочки, где задействовано данное звено, какими бы эффективными ни были остальные звенья данной цепочки. Аналогичной является ситуация из области управления предприятием, когда отлично налаженная логистика (эффективное звено) доставляет в магазин товар с заводским браком (т. е. завод – неэффективное звено), что дискредитирует всю цепочку поставки.

Если решается совместная подзадача (например, ГВС+СО), то количество вариантов цепочек может возрасти.

Собственно задачей управления является выбор оптимальной технологической цепи либо оптимальное распределение нагрузки по нескольким наиболее подходящим цепям.

В общем случае система и ее компоненты все чаще рассматриваются не сами по себе, а в контексте той среды, где им предуготовано функционировать. Технические системы (в том числе системы жизнеобеспечения здания) – не исключение.

На третьем этапе описываются отношения системы с ее окружением, с внешним миром, а также свойства компонентов системы, участвующих в этом взаимодействии.

В рамках формализации модели вводится понятие «комплексная оценка» – некий численный критерий, однозначно характеризующий применимость, эффективность компонента / технологической цепочки / подсистемы / системы.

Так, на комплексную оценку технологической цепочки влияет каждый ее компонент. Каждый компонент оценивается по нескольким факторам. Введем понятие «значение фактора» (обозначается x) – непосредственное значение величины, по которой происходит оценка. Например, мощность оборудования в ваттах или выработанный ресурс в часах. Кроме значения фактора необходимо учитывать степень влияния этого фактора на общую оценку эффективности компонента, для чего введем понятие «важность фактора» или «приоритет фактора» (обозначается w). Таким образом, общее «участие» конкретного фактора в оценке компонента равно произведению значения фактора на важность этого фактора. Важность фактора – оценка относительная и характеризует, насколько рассматриваемый фактор важнее других.

Задача четвертого этапа постепенной формализации – математическая (и программная) реализация аппарата комплексной оценки. Как упоминалось ранее, учет большого количества факторов затрудняет алгоритмизацию выбора оптимального решения. Наиболее доступным с точки зрения простоты и полноты осуществления поставленной задачи является применение в качестве математического аппарата в первом приближении однослойной нейронной

сети с сигмоидальной передаточной функцией [10, 11], которая будет заниматься оценкой применимости той или иной технологической цепочки. Количество нейронов соответствует количеству технологических цепочек.

Формула для определения комплексной оценки технологической цепи:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-S}}$$

Взвешенная сумма значений учитываемых факторов

$$S = \sum_{i=1}^N x_i w_i,$$

где x_i – значение i -го фактора; w_i – значение важности i -го фактора; N – количество учитываемых факторов.

Если оценивается только одно звено в цепи, то N равно количеству факторов оценки одного звена; если оценивается вся технологическая цепочка, N равно суммарному количеству оцениваемых факторов всех участвующих в цепочке звеньев.

Результатом оценки применимости технологической цепочки (выход соответствующего нейрона) будет значение от 0 до 1, что в первом приближении можно принять как долю данной цепочки от общего количества теплоты, задействованной в текущей подзадаче.

Важным моментом является приведение значения каждого фактора к диапазону от 0 до 1. Например, при работе с максимальной мощностью оборудования за 1 удобно принять значение максимальной отопительной нагрузки на здание с запасом 20 %. Таким образом, значение мощности любого компонента заведомо попадет в данный диапазон. Диапазон приведения по каждому фактору принимается одинаковый для всех компонентов, т. е. не допускается приводить мощность теплонасосной установки в 30 кВт к диапазону от 0 до 70 кВт, а газовый котел в 45 кВт установленной мощности оценивать по этому параметру в диапазоне от 40 до 60 кВт.

Приведенное значение фактора определяется методом простой линейной интерполяции:

$$x = \frac{x_p - x_{p \min}}{x_{p \max} - x_{p \min}},$$

где x – приведенное значение фактора (от 0 до 1); x_p – текущее реальное значение фактора (например, мощность в Вт или стоимость в руб.); $x_{p \min}$ – реальное минимальное значение фактора (можно принять 0, единицы измерения те же, что и для x_p); $x_{p \max}$ – реальное максимальное значение фактора.

Значение важности факторов w_i устанавливается заказчиком или определяется методом экспертных оценок, поэтому в зависимости от конечного назначения системы вектор w_i может меняться. Так, в экспериментальных установках не важен фактор долговечности оборудования, но важен фактор простоты и скорости монтажа; в реализации же системы в настоящих условиях фактор долговечности необходимо оценивать наравне или даже выше, нежели простоту монтажа.

Для нормальной работы математической модели рекомендуется в первом приближении значение каждого фактора принимать от 0 до 1 (или от 0 до 100 %), где 1 – наиболее значимый, наиболее важный фактор оценки.

Стоит отметить, что фактор оценки может иметь:

- негативный смысл (значение имеет отрицательный знак) – чем больше значение фактора, тем хуже (например, стоимость);
- позитивным смысл (значение имеет отрицательный знак) – чем больше значение такого фактора, тем лучше (например, долговечность на отказ).

Ниже приведен пример распределения приоритетов (вектор w), принятый в данной модели для оборудования (табл. 1) и для источников теплоты (табл. 2).

В качестве пятого этапа «смоделируем» особенности фактической реализации системы управления на нейронных сетях.

В данной системе отсутствует непосредственная обратная связь, т. к. концепция распределения приоритетов изначально призвана к тому, чтобы управление системой осуществлялось с ориентированием на заранее поставленные условия (например, выбор наиболее надежной технологической цепочки или выбор наименее изношенного оборудования).

Таблица 1. Вектор значений важности факторов оценки оборудования

Наименование фактора, ед. изм.	Важность фактора, в % (вектор w)	Реальное минимальное значение диапазона	Реальное максимальное значение диапазона	Негативный/позитивный фактор
Выработанный ресурс, ч	50	0	100 000	Негативный
Стоимость 1 ч работы, руб./ч	100	0	5000	Негативный
Надежность (вероятность безотказной работы в течение срока эксплуатации), %	100	0	96	Позитивный
Общий ресурс на отказ, ч	100	0	100 000	Позитивный
Текущие амортизационные накопления, % от стоимости	50	0	500	Позитивный
Стоимость работ по техническому обслуживанию за период эксплуатации 15 лет, руб.	80	0	100 000	Негативный
Затраты электроэнергии для транспортирования (преобразования) энергии, Вт/Вт	80	0	2	Негативный

Таблица 2. Вектор значений важности факторов оценки источников теплоты

Наименование фактора, ед. изм.	Важность фактора, в % (вектори)	Реальное минимальное значение диапазона	Реальное максимальное значение диапазона	Негативный/позитивный фактор
Стоимость 1 Дж теплоты, руб./Дж	100	0	1000	Негативный
Текущее значение запаса, Дж	80	0	10 ¹²	Позитивный
Время подвоза партии с запасом теплоты в ГДж, ч	60	0	72	Негативный
Отрицательное воздействие на окружающую среду (условная оценка: 0 – «нет», 1 – «да»)	80	0	1	Негативный

Опосредованная обратная связь реализована через стоимость эксплуатации (стоимость 1 часа работы), итоговое значение стоимости эксплуатации за определенный период (например, с момента пуска-наладки и до текущего момента) и иные значения факторов, которые изменяются в течение эксплуатации. Многофакторная модель позволяет гибко «настроить» вектора приоритетов под конкретный объект. Если комплекс управляющей автоматики позволяет «открыть» доступ к вектору приоритетов, конечный пользователь может переопределить его, когда в ходе эксплуатации возникнет необходимость скорректировать работу системы.

Комплексной оценке можно подвергать также компоновку и комплектацию оборудования и даже целые проектные решения для отыскания оптимального.

Описанный подход (постепенная формализация модели + комплексная оценка) может быть использован не только для компоновки, подбора оборудования и выбора оптимальной (по комплексной оценке) технологической цепочки, но и при решении задачи управления режимом работы системы теплоснабжения здания.

Что касается физического исполнения системы управления на нейронных сетях, то программный алгоритм реализации выполняется стандартными средствами разработки и может быть развернут на уже существующих объектах с имеющимися комплексами автоматики, т. к. объекты регулирования, средства связи и диспетчерского контроля при внедрении данной технологии управления остаются без изменений. Профиль объекта не имеет значения, но могут быть учтены особенности каждого.

Постановка и математическая модель позволяют добавлять в схему новые компоненты, подсистемы и факторы оценки практически без дополнительного усложнения алгоритмов работы.

Для данной модели рассматривалась сигмоидальная передаточная функция. Однако функцию можно подбирать исходя из акцента на определенную часть спектра (например, вблизи 0 или 1).

При сравнительной простоте, гибкости и прочих достоинствах подход комплексной оценки обладает рядом недостатков:

- необходима первичная настройка – некое распределение приоритета между факторами, чтобы имелась возможность сразу приступить к выполнению задачи управления;
- на начальном этапе предлагается выставлять значения приоритетов факторов методом экспертных оценок;

- по перечисленным выше причинам следует вероятность недостаточно объективного распределения значений вектора важности факторов.

Для эффективной работы алгоритма необходим опыт эксплуатации с реализацией обратной связи от полученных результатов работы к распределению важности факторов. Таким образом, может сложиться ситуация, когда будет иметь место эксплуатационный период неэффективного управления. Однако если имеется опыт эксплуатации существующей системы с подобным подходом к задаче управления, его можно использовать при разработке и обучении вновь разрабатываемых систем.

При решении задачи управления с использованием нейронных сетей возникает сложность выбора передаточной функции управляющего нейрона, а также трактовка его значения. Например, технологическая цепочка № 1 набрала при комплексной оценке 56 условных баллов, а цепочка № 2 – только 40. В первом приближении можно принять эти баллы как долю от общей нагрузки и распределить эту нагрузку по цепочкам в пропорции 56:40. С другой стороны, комплексная оценка цепочки № 1 выше, т. е. при данном стечении обстоятельств она эффективнее, следовательно, можно всю нагрузку передать на нее, что сэкономит ресурс оборудования из цепочки № 2.

Несмотря на недостатки, алгоритм управления, основанный на нейронных сетях, обладает достаточной гибкостью, способностью к расширяемости. Необходимо отметить, что недостатки применяемого подхода являются не причиной отказа от него, а основанием для его дальнейшего развития, что соответствует идее постепенной формализации моделей. Система, основанная на данном подходе, ориентируется на собственный опыт, т. е. учитывает изменения в характере работы оборудования (например, на основании статистики по отказам оборудования скорректировать значения важности фактора «надежность»), при этом сохраняет интерактивность, обладает свойством адаптации на любой стадии жизни. Последнее в некоторой степени является предпосылкой к переходу от однослойных/многослойных нейронных сетей к структурированным. Все это позволяет судить о большом потенциале данного подхода в задачах управления многокомпонентными системами.

Библиографические ссылки

1. Палагин А. В., Стерхов А. И., Корепанов Е. В. Сравнение систем естественного освещения зданий по функционально-энергетическим факторам // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 191–194.

2. Палагин А. В., Корепанов Е. В. Моделирование нестационарного теплообмена грунта с U-образным коллектором теплонасосной установки // Вестник МГСУ. – 2011. – № 7. – 456–462.
3. Булдакова И. Н., Корепанов Е. В. Нагрев теплоносителя в трубе U-образного грунтового коллектора теплонасосной установки // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 175–177.
4. Агафонов С. А., Булдакова И. Н., Корепанов Е. В. Математическая модель управления тепловым режимом здания с теплонасосной установкой // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения / под общ. ред. Л. П. Мышляева. – Новокузнецк, 2010. – С. 206–210.
5. Кутявина М. Л., Корепанов Е. В. Утилизация теплоты сточных вод с помощью тепловых насосов // Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке электронное научное издание : сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием. – Ижевск, 2013. – С. 1336–1339.
6. ГОСТ Р ИСО 9004–2010. Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества.
7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288–2005. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.
8. Системная инженерия. Принципы и практика применения / А. Косяков, У. Н. Свит, С. Дж. Сеймур, С. М. Бимер. – М. : ДМК Пресс, 2014. – 624 с.
9. Волкова В. Н., Денисов А. А. Теория систем и системный анализ : учеб. пособие. – М. : Высш. шк., 2006. – 511 с.
10. Некротюк А. В., Палагин А. В., Корепанов Е. В. Применение нейронных сетей для оптимизации системы микроклимата цеха монтажа радиоэлектронной аппаратуры // Глобальная научная интеграция. – 2013. – № 6. – С. 55–56.
11. Ясницкий Л. Н. Введение в искусственный интеллект : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М. : Академия, 2010. – 176 с.

* * *

A. V. Palagin, Post-graduate, Kalashnikov ISTU

E. V. Korepanov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

Controlling the system of building heat-cooling by alternative energy sources

The article describes the process of controlling the multicomponent (complex) system of buildings life support with account of modern system analysis tendencies. Step-by-step formalization (as a rough approximation) of control task is given. A single-layer neural network is proposed as the math aid of the control system. Within the context of the task difficulty the pros and cons of the solution are pointed, several aspects of physical implementation of this approach are considered.

Keywords: system analysis, complex rating, efficiency of energy supplying, alternative energy, control task, heat pump.

Получено: 30.03.15