Применение инструментов онтологического анализа для формирования расчётных моделей электроснабжения

И.Н. Фомин

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

Аннотация

Предлагается концепция интеллектуальной поддержки процесса автоматизированного формирования расчётных моделей электроснабжения в информационных системах энергетических предприятий, основанная на принципах управления знаниями. Концепция включает проведение онтологического анализа данных и формирование соответствующих баз знаний. Декомпозированы этапы процесса управления знаниями о параметрах расчётных моделей электроснабжения с целью разработки инструментов их автоматической генерации в биллинговых системах. Определены наборы параметров объектов электроснабжения и параметров, характеризующих объём энергопотребления, показатели цены и параметры расчёта стоимости потребленной электроэнергии, которые наряду с отношениями между сущностями и их функциональными связями определяют структуру онтологий. Впервые даны определения расчётной модели электроснабжения как семантической модели, состоящей из совокупности базовых понятий электроэнергетики, и как системы знаний о методах хранения и обработки информации о величинах энергопотребления. Построена онтология процесса формирования расчётных моделей с применением онтологического редактора Protégé. Сформулированы требования к базе знаний системы поддержки процесса формирования расчётных моделей в информационных системах и обоснована возможность применения технологий интеллектуального анализа данных с механизмами проверки на непротиворечивость, достаточность и непрерывность знаний посредством применения методов формирования нечётких правил. Это позволяет обосновать возможность применения принципов нечёткой логики для автоматизированного формирования расчётных моделей электроснабжения в биллинговых системах.

Ключевые слова: расчётная модель электроснабжения, СППР, биллинговые системы, онтологический анализ, базы знаний, нечёткая логика.

Цитирование: Фомин, И.Н. Применение инструментов онтологического анализа для формирования расчётных моделей электроснабжения // Онтология проектирования. – 2020. – Т. 10, №4(38). – С. 477-488. – DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-477-488.

Введение

В Российской Федерации как и во многих других странах цифровизация электросетевого комплекса отнесена к объектам критической информационной инфраструктуры [1, 2].

Для энергосетевых и энергосбытовых предприятий важной научно-технической задачей является автоматизированное формирование расчётных моделей электроснабжения. Расчётные модели в энергетике – это формы представления объекта электроснабжения или процесса электроснабжения через семантическую модель, состоящую из совокупности базовых понятий предметной области (ПрО) и функциональных связей между ними, или математическое описание, адекватно отражающее сущность и свойства этого объекта и процесса его электроснабжения. Набор технических параметров, зарегистрированных на определённый момент времени, а также набор входов и выходов бизнес-процессов и наборы функциональных связей требуется адекватно формализовывать, изменять, оптимизировать. Т.е. стоит задача управления расчётными моделями, позволяющими производить расчёты требуемых показателей по заданным техническим и коммерческим условиям электроснабжения, генерации, передачи и потребления электроэнергии [3].

В статье развиваются результаты, полученные в работах [3, 4], в которых:

- описаны типы задач, решаемые в электроэнергетике в отраслевых информационных системах;
- проведён теоретико-множественный анализ технико-экономических показателей для задач структурно-параметрического синтеза расчётных моделей электроснабжения;
- предложена концепция интеллектуальной поддержки деятельности энергетических предприятий, основанная на принципах управления знаниями.

При разработке концепции интеллектуальной поддержки деятельности энергетических предприятий были использованы принципы онтологического инжиниринга [5], предполагающего установление связей между прикладным классическим анализом данных и анализом формальных понятий [6].

Расчётные модели электроснабжения в отраслевых информационных системах формируются путём создания реляционных баз данных (БД). При разработке структур этих БД используются наборы нечётких множеств данных и функциональных связей, часто задаваемых естественным языком. Процессы формирования расчётных моделей электроснабжения состоят из сбора множеств этих данных и последовательной их обработки на разных этапах бизнес-процесса. Они характеризуются разнородностью источников информации, а также совокупностью концептов и связей между ними, из которых состоит семантическая модель.

Возможности применения принципов нечётких множеств данных и лингвистических переменных [7] для моделирования сложных технических систем при разработке алгоритмов и механизмов принятия решений, основанных на нечётком выводе, используются в менеджменте [8], в производстве [9], в других задачах [10, 11]. На современном этапе эти принципы стали применяться в задачах адаптивного управления [12, 13], в задачах разработки систем поддержки принятия решений (СППР) с применением принципов онтологического анализа.

В настоящей работе описывается формализация концепции автоматизации построения расчётных моделей и предлагаются инструменты онтологического анализа процесса формирования расчётных моделей для биллинговых систем энергетического предприятия посредством формирования онтологии и баз знаний (БЗ) ПрО. Использование имеющихся на энергетическом предприятии знаний и опыта персонала, сосредоточенных в стандартах, методиках, регламентах и в БД, как исходного материала для построения интеллектуальной системы поддержки процесса формирования расчётных моделей с СППР, позволит повысить эффективность энергосетевых и энергосбытовых предприятий, а также достичь заданных показателей энергоэффективности [1, 2].

1 Постановка задач

На современном этапе способ формирования и изменения расчётных моделей электроснабжения основан на формировании реляционных БД в отраслевых информационных биллинговых системах. Формированием и изменением расчётных моделей занимаются специалисты, которые должны обладать знаниями из области электротехники, электроснабжения, отраслевой экономики и иметь навыки формирования структур БД в прикладной информационной системе. Это усложняет работу специалистов и может приводить к возникновению инцидентов, обусловленных человеческим фактором. Поэтому для отрасли актуально применение научных подходов к задачам формирования структур БД биллинговых систем, их расчётных моделей и к задачам поддержки принятия решений при формировании и изменении расчётных моделей. Расчётные модели электроснабжения потребителей можно рассматривать как систему знаний о методах и средствах сбора, передачи, хранения и обработки информации о величинах энергопотребления.

С учётом данных определений и отраслевых требований рассматриваемые задачи могут быть сформулированы следующим образом:

- разработать модель процесса управления знаниями для поддержки принятия решений при формировании расчётных моделей энергоснабжения;
- разработать онтологию, определяющую БЗ о структуре электроснабжения потребителя;
- автоматизировать синтез расчётных моделей электроснабжения.

2 Формализация концепции интеллектуальной поддержки синтеза расчётных моделей электроснабжения на основе принципов управления знаниями

Диаграмма процесса управления знаниями о расчётной модели электроснабжения представлена на рисунке 1. Предложенная концепция интеллектуальной поддержки процесса формирования расчётных моделей включает в себя разработку визуальной объектно-ориентированной модели управления знаниями, модели формирования знаний и онтологической модели процесса автоматического формирования расчётных моделей. Формализация полученных знаний осуществляется в ходе разработки объектно-ориентированной модели управления набором знаний о технических и договорных (или коммерческих) условиях энергоснабжения. Это позволяет на начальных этапах проектирования информационных биллинговых систем сформировать БЗ о процессах энергоснабжения потребителей электроэнергии.

Рисунок 1 - Диаграмма процесса управления знаниями о параметрах расчётной модели электроснабжения в нотации IDEF0

В концепции, визуализированной на рисунке 1, онтология используется для формального описания объектов и отношений между ними. На основе разработанной онтологии строятся модели представления знаний о технических и договорных условиях электроснабжения в виде правил и прецедентов принятия решений при их формировании и изменениях, которые вместе с онтологией составляют основу БЗ СППР. Например, если потребители находятся в одной ценовой зоне рынка электроэнергии, то правила и прецеденты формирования расчётных моделей для них, с большой вероятностью, идентичны.

Сформированная структура БД трансформируется в набор структурированных знаний, которые преобразуются в реляционную БД отраслевой информационной системы посредством организации логического вывода, как результата совокупного применения цепочек

рассуждений и стратегий формирования решений на их основе. После получения результатов расчётов по созданным расчётным моделям производится адаптация БЗ и обучение СППР новым знаниям на основе интеллектуального анализа данных и формирования суждений экспертов в соответствии с изменениями технических условий электроснабжения потребителя. По результатам анализа корректируют набор данных о ПрО и повторяют цикл управления знаниями.

3 Разработка модели процесса управления знаниями при формировании расчётных моделей энергоснабжения на основе принципов онтологического анализа

Разработанная концепция интеллектуальной поддержки синтеза расчётных моделей основана на теоретико-информационном анализе знаний, определяет структуру представления знаний по результатам онтологического анализа и обеспечивает управление знаниями о расчётных моделях энергоснабжения в условиях их постоянного изменения. Это позволяет накапливать и применять знания и опыт экспертов посредством проведения различных мероприятий для улучшения использования существующих или создания новых индивидуальных или коллективных ресурсов знаний, согласно [14]. Управление знаниями обеспечивается управлением набором данных о параметрах расчётных моделей: их отбором, технической поддержкой, структурированием для использования в заданном контексте.

В ходе моделирования процесса сбора, хранения и управления наборами знаний о топологии сети электроснабжения, о наборе ограничений и о различных условиях электроснабжения устанавливаются отношения между когнитивными элементами бизнес-процесса энергетического предприятия: причинно-следственные отношения сходства, отношения обобщения, ассоциации, зависимости и реализации. Например, если в расчётной модели электроснабжения потребителя произошли изменения, то и в расчётной модели других потребителей, питающихся от того же источника, с большой вероятностью тоже произошли изменения. Эти компоненты необходимы для разработки комплекса объектно-ориентированных моделей, определяющих расчётную модель и структуру БД в информационной биллинговой системе. Такую модель можно представить в виде соотношений набора классов или онтологии [15]. В описываемой прикладной задаче онтологию O можно описать как:

$$O = \langle P, R, F \rangle$$

где P - описание материальных и абстрактных сущностей, формирующих конкретную расчётную модель; R - отношения между сущностями, входящими в расчётную модель; F - конечное число функциональных связей, заданных в концептах и соотношениях, являющиеся правилами вывода. Набор сущностей, входящих в расчётную модель, определён, например, в регламентах деятельности системного и коммерческого операторов оптового рынка электроэнергии и мощности (ОРЭМ) [16] и формализован в [4, 17]. К таким сущностям относятся параметры: объекта электроснабжения $\{P^O\}$, объёмов энергопотребления $\{P^V\}$, цены потребляемой электроэнергии $\{P^C\}$ и стоимости потреблённой электроэнергии $\{P^S\}$.

К параметрам объектов электроснабжения $\{P^O\}$ относятся учётные показатели, определяющие: объект электроснабжения; субъект рынка электроэнергии, осуществляющий электроснабжение объекта; группу потребителей, к которой относится владелец объекта электроснабжения; группы точек поставки, от которых питается объект электроснабжения; тип договора электроснабжения между поставщиком и потребителем электроэнергии и мощности; точку поставки и точку учёта потребляемой электроэнергии объектом энергоснабжения и их признаки транзитности; сетевую организацию, по сетям которой выполняется электроснабжение; регион, в котором находится объект электроснабжения; зону рынка электроэнергии;

уровень напряжения, на котором осуществляется электроснабжение объекта; расчётный период, разграничивающий данные об энергопотреблении (час, сутки, месяц).

К множеству параметров, определяющих объём энергопотребления $\{P^V\}$, относятся учётные показатели, определяющие: вид массива данных об объёмах энергопотребления (интервальные, интегральные, плановые, фактические); набор данных Системного оператора, влияющих на показатель уровня потребляемой и резервируемой мощности; набор данных Коммерческого оператора, влияющих на показатель уровня потребляемой и резервируемой мощности; тип тарифа на энергию (одно-, двух- или трёхставочный); тип тарифа на услуги по передаче электроэнергии (одно-, двухставочный); способ учёта объёмов (интегральный в целом за период, интервальный по часам, по зонам суток); число зон суток; признак факта (требования) почасового планирования энергопотребления потребителем.

К параметрам цен и тарифов потребляемой электроэнергии $\{P^C\}$ относятся учётные показатели определяющие: набор данных Коммерческого оператора, влияющих на формирование розничных цен; наборы повышающих и понижающих индикативов, влияющих на формирование розничных цен; признак факта (требования) трансляции цен электроэнергии и мощности с ОРЭМ; тарифы электросетей на передачу электроэнергии; тарифы на услуги инфраструктур ОРЭМ; сбытовые надбавки; удельную стоимость электроэнергии на ОРЭМ, ценовую категорию объекта электроснабжения.

К параметрам, в совокупности определяющим стоимость потреблённой электроэнергии $\{P^S\}$, относятся: учётные показатели стоимости электроэнергии, дифференцируемой и недифференцируемой по часам в ценовых или неценовых зонах рынка; стоимость электроэнергии, дифференцируемой по зонам суток в ценовых или неценовых зонах рынка; стоимость электроэнергии с учётом отклонений от плановых объёмов потребления в ценовых или неценовых зонах рынка; стоимость сетевой или резервируемой мощности при двухставочном тарифе на передачу в ценовых или неценовых зонах рынка; стоимость электроэнергии с учётом отклонений при одноставочном тарифе, дифференцированном по зонам суток в неценовой зоне рынка; стоимость электроэнергии с учётом отклонений при двухставочном тарифе в неценовой зоне рынка; стоимость мощности с учётом отклонений фактической мощности от договорной.

Основной задачей при разработке интеллектуальной СППР является задача выбора модели представления полученных от экспертов знаний о существующих топологиях электроснабжения и расчётных моделях для отражения в БЗ СППР. В настоящей работе выбрана модель представления знаний на основе онтологии поддержки принятия решений.

Разрабатываемая онтология должна представлять собой формальное явное описание определённых выше параметров $\{P^O\}$, $\{P^V\}$, $\{P^C\}$ и $\{P^S\}$ в виде классов и их свойств (слотов) с ограничениями, наложенными на слоты. Такая онтология обеспечивает общий набор параметров расчётных моделей, определяет семантику сообщений и интерпретацию контекста данных о прецедентах в виде функциональных связей в определённых соотношениях. Онтология, состоящая из представленного набора классов, создаёт основу для того, чтобы при управлении взаимодействующими процессами лица, участвующие в формировании расчётных моделей в информационных системах, могли корректно обмениваться информацией и понимать друг друга. В процессе автоматического формирования расчётных моделей энергоснабжения онтология выполняет следующие основные функции:

- определяет общую базу реальных и абстрактных сущностей, используемых при формировании расчётных моделей энергоснабжения (например: точка учёта электроэнергии, точка поставки электроэнергии);
- обеспечивает возможность совместного применения знаний, представленных в онтологии, при синтезе новых или изменении существующих расчётных моделей (например, в

целях организации электроснабжения нового потребителя или при изменении топологий сети, которая питает потребителей).

На рисунке 2 показан фрагмент онтологии процесса формирования расчётных моделей электроснабжения, разработанной с применением онтологического редактора *Protégé* 4.3.

Рисунок 2 - Фрагмент онтологии процесса формирования расчётных моделей

Выбор использования редактора *Protégé* для построения онтологий обусловлен обеспечением целостного подхода к процессу формирования расчётной модели, возможностью сохранения свойств массивов данных в формате XML для загрузки их в отраслевые информационные системы, а также возможностью достижения: системности (визуально определяются функциональные связи элементов расчётной модели); единообразия (реальные и абстрактные элементы расчётной модели гармонично соседствуют в одной модели); комплексности (построение онтологии позволяет восстановить недостающие логические связи) [5].

Набор параметров $\{P^O\}$, $\{P^V\}$, $\{P^C\}$ и $\{P^S\}$ формирует свои множества предметных онтологий и онтологий функциональных связей элементов расчётной модели с набором параметров P . С учётом этого, структура разработанной онтологии поддержки процесса формирования расчётных моделей может быть представлена в виде системы онтологий $Z = \langle O, P, M \rangle$, где O – онтология верхнего уровня (метаонтология), которая включает в себя общие объекты, их атрибуты, значения и отношения, определяющие свойства расчётной модели; M – модели машин выводов, ассоциированных с онтологической системой Z .

Метаонтологию O составляют общие понятия области управления знаниями, такие как «объект», «атрибут», «значение», «отношение» и прочие элементы расчётной модели. Применение метаонтологий позволяет проектировать алгоритмы экспертных систем и СППР с использованием моделей машин выводов.

Модель машины вывода M позволяет управлять производственной системой и выполнять функции просмотра существующих фактов из БД и правил из БЗ, которые сформировали расчётную модель. Модель машины вывода управляет записью в БД новых событий по формированию или изменению расчётных моделей и определяет порядок применения правил, если это возможно. Таким образом, расчётная модель формируется системой управления БД, структура которой формируется автоматически, посредством применения машины вывода.

Машина вывода, являясь элементом СППР, управляет процессом принятия решения, сохраняя для пользователя СППР информацию о полученных заключениях, и запрашивает у него информацию, если для срабатывания очередного правила в рабочей памяти оказывается недостаточно данных.

В предлагаемой концепции СППР машина вывода может представлять собой небольшую программу из двух компонент, одна из которых реализует собственно вывод, а другая управляет этим процессом. В *Protégé* эту роль выполняет надстройка *Reasoner*. Как правило, компонента вывода действует на основании правила: «Если известно, что истинно утверждение *A* и существует правило вида «ЕСЛИ *A*, ТО *B*», тогда утверждение *B* также истинно».

При постоянном пополнении БЗ в процессе управления знаниями о параметрах расчётной модели электроснабжения, изображённой на рисунке 1, в реальных энергетических предприятиях можно реализовать проверку на непротиворечивость любых функциональных связей, заданных в концептах и/или соотношениях, т.е. контроля того, являются ли выполняемыми критерии принадлежности к категории с точки зрения логики. Возможности онтологического редактора *Protégé* 4.3 позволили смоделировать эту проверку и создать иерархию понятий для анализа на противоречивость.

4 Применение принципов нечёткой логики для автоматизированного формирования расчётных моделей

Представленная онтология является основой БЗ СППР, которая обеспечивает интеллектуальную поддержку процесса формирования расчётных моделей посредством автоматического изменения структуры БД биллинговой системы.

Изучение бизнес-процессов энергетических предприятий выявило, что формирование расчётных моделей часто происходит в условиях неопределённости и нехватки информации, по крайней мере, на момент заключения контрактов энергоснабжения, а также в аварийных ситуациях. Значительная доля информации доступна в виде эвристических описаний процессов сбора данных, поэтому она может быть нечёткой и неопределённой. Кроме того, знания экспертов, которые служат основой для построения правил в БЗ, могут быть выражены нечётко в виде лингвистических переменных, на естественном языке, отражая опыт энергетиков и экономистов.

В предложенной концепции формирования расчётных моделей, выражающейся в определённой последовательности обработки информации (рисунок 1), применение тех или иных правил осуществляется посредством механизма логического вывода. Это, в частности, означает, что входящий поток информации, состоящей из набора знаний эксперта о ПрО, сформированной как на основе методов извлечения знаний из экспертов, так и извлечения знаний из данных [18], может представляться в виде нечётких правил, согласно которым к набору технических и коммерческих условий должно подбираться некоторое действие по формированию или изменению расчётных моделей.

Известно, что нечёткая логика делится на нечёткую логику в узком смысле, которая является специальной многозначной логикой, стремящейся к описанию феномена неопределённости, и на нечёткую логику в более широком смысле, основанную на использовании естественного языка [19]. Таким образом, обоснование возможности применения принципов нечёткой логики для автоматизированного формирования расчётных моделей нужно начинать с формализации требований к БЗ СППР. Важнейшими из принципов инженерии знаний являются следующие требования [20]:

- семантическая целостность знаний;
- непротиворечивость, полнота и непрерывность знаний;

- корректность взаимодействия пользователей с СППР.

Для разработки набора этих нечётких правил на основе интеллектуального анализа данных предлагается применять модифицированный метод формирования нечётких правил, представленный в [8]. Этот метод позволяет сформировать в онтологии множества:

- классов абстрактных элементов расчётной модели (нечётких сущностей);
- нечётких свойств расчётной модели;
- значений нечётких свойств, представленных лингвистическими переменными;
- экземпляров;
- бинарных нечётких отношений между концептами $\{R\}$.

Согласно [7], выделение классов, их свойств, значений переменных, множеств экземпляров и отношений на основе онтологии базы нечётких правил позволяет синтезировать расчётные модели электроснабжения на основе лингвистической переменной L , которая может быть описана набором вида

$$L = \langle W, T, X, G, M \rangle,$$

где W – наименование лингвистической переменной; T – базовое множество лингвистической переменной или множество её значений (терм-множество), представляющих собой наименования нечётких переменных, областью определения каждой из которых является множество X ; G – синтаксическая процедура, позволяющая оперировать элементами терм-множества T (в частности, генерировать новые термы (значения)); M – семантическая процедура, позволяющая превратить каждое новое значение лингвистической переменной, образуемое процедурой G , в нечёткую переменную, т.е. сформировать соответствующее нечёткое множество [7].

Известно большое число алгоритмов работы механизма принятия решений, основанных на нечётком выводе, которые отличаются не только характером и последовательностью операций, выполняемых в ходе фазсификации нечёткого логического вывода и дефазсификации, но и видом используемых нечётких правил [11]. Представив процесс формирования расчётных моделей электроснабжения через выделение классов, их свойств, значений переменных, множеств экземпляров и отношений, согласно [8], определив параметры основной переменной, согласно [7], в настоящей работе был формализован набор знаний о нечётко определённых технических и коммерческих условиях электроснабжения с помощью модели нечёткого вывода, в основе которой лежит нечёткая БЗ с правилами нечёткого её формирования, по методике, описанной в [12]. Согласно этой методике, совокупность условий и выводов в нечёткой БЗ определяет продукционное нечёткое правило в адаптивной нечёткой модели «Такаги-Сугено-Канга» (ТСК) [12]. Эти модели характеризуются прозрачностью, высокой точностью и малым количеством правил, что позволяет на их основе конструировать алгоритмы обучения БЗ. Построенные по этой модели алгоритмы обучения состоят из трёх этапов:

- 1) разбиение пространства ввода-вывода с помощью метода нечёткой кластеризации;
- 2) определение параметров последовательной части правила из наддетерминированной пакетной постановки задачи методом наименьших квадратов с использованием алгоритма декомпозиции сингулярных значений;
- 3) адаптация этих параметров рекурсивным методом наименьших квадратов.

Для расчётной модели, представленной в виде системы с n входами и одним выходом, множество известных параметров, представляющих знания о ней, может быть описано в ТСК-модели совокупностью нечётких правил вида

$$R_i : \text{Если } p_1 \text{ из } \{P\}, \text{ есть } A_1^i; p_2 \text{ из } \{P\} \text{ есть } A_2^i, \dots p_n \text{ из } \{P\} \text{ есть } A_n^i, \text{ то } y^i = f(p_1^i, \dots, p_n^i),$$

где R_i есть i -е нечёткое продукционное правило соотношений элементов расчётной модели, в котором $i = 1, 2, \dots, K$; p_j есть входные переменные из множества параметров $\{P\}$, (для $j = 1, 2, \dots, n$); A_i^j – нечёткие подмножества, определённые при помощи принадлежностей (тре-

угольных, трапециевидных или гауссовых); y^i – выход i -го правила. Совокупность нечётких продукционных правил соотношений элементов расчётной модели образует нечёткую базу правил $\{R_i\}_{i=1}^K$.

Чёткая функция выхода, в этом случае, будет иметь вид: $y^i = f(p_1^i, \dots, p_n^i)$, а нечёткая функция выхода может быть записана в форме

$$y = \sum_{i=1}^K \frac{w^i}{\sum_{j=1}^K w^j} y_i = \sum_{i=1}^K w^i y_i,$$

где $w^i = T_{j=l}^n(A_j^i(x_j))$, где T_j^n – оператор $t_{\text{норм}}$.

Для того, чтобы определить непрерывность $\{R_i\}_{i=1}^K$, были использованы понятия:

- упорядоченная совокупность нечётких множеств;
- прилегающие нечёткие множества, определённые в [12].

При синтезе расчётных моделей нужно добиваться, чтобы логика их формирования, образующаяся приведёнными нечёткими множествами, обеспечивалась неперекрывающимися и непротиворечивыми данными. Непротиворечивость обеспечивается за счёт исключения правил, имеющих одинаковые предпосылки и разные заключения. При этом выбирается лишь одно правило группы противоречивых правил.

$\{R_i\}_{i=1}^K$ является метрикой, определяющей уровень достаточности знаний, необходимых для формирования расчётной модели электроснабжения. Неполная база правил имеет так называемые «пустые места» для определенных ситуаций (на семантическом уровне), т.е. не определены связи между входами и выходами. Этот эффект обусловлен свойствами нечётких множеств, которые используются в условиях правил.

В качестве меры достаточности $adeq(x)$ можно использовать критерий

$$adeq(x) = \sum_{i=1}^{N_r} \{ \prod_{j=1}^{N_p} \mu_{Aik}(p) \},$$

где p – физическая переменная входных данных (основание лингвистической переменной); N_p – число условий в правиле; N_r – число правил в базе правил.

Численные значения, которые принимает критерий $adeq(x)$, позволяют классифицировать базы правил по полноте знаний: если $adeq(x) = 0$, то это «неполная» база правил; если $1 > adeq(x) > 0$, то это «незначительно полная» база правил; если $adeq(x) = 1$, то это «точно полная» база правил; если $adeq(x) > 1$, то это «сверхполная» или избыточная база правил. Таким образом, проверка нечёткой базы правил на непрерывность, непротиворечивость и полноту позволяет повысить адекватность расчётных моделей электроснабжения, синтезируемых автоматически.

Концепция формирования БЗ, принципы онтологического анализа данных, критерии достаточности данных и принципы нечёткой логики в перспективе приемлемы для создания отраслевых СППР с функциями автоматизированного формирования расчётных моделей.

Заключение

Поставлена и решена научно-техническая задача, актуальная для предприятий, осуществляющих учёт и реализацию электроэнергии и услуг по её передаче – интеллектуальная поддержка процесса формирования расчётных моделей на основе онтологического анализа и БЗ. Обоснована возможность и разработана концепция интеллектуальной поддержки процесса синтеза расчётных моделей электроснабжения на основе принципов управления знаниями, включающая проведение онтологического анализа этого процесса и формирование БЗ, встроенной в онтологию, что позволяет накапливать и применять знания и опыт специалистов и экспертов. Показано, что принципы нечёткой логики приемлемы для создания базы нечётких правил для отраслевых СППР с функциями автоматизированного формирования

расчётных моделей. Создаваемые БЗ проверяются на непрерывность, непротиворечивость и полноту. Это позволяет проводить адаптацию параметров правил формирования расчётных моделей электроснабжения на основе обучения, а также обеспечить объективизацию знаний в расчётных моделях отраслевых информационных систем.

Список источников

- [1] Правительство РФ, Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации // Распоряжение Правительства РФ № 511-р от 03.04.2013 г. (в ред. от 29.11.2017 г.).
- [2] Указ президента РФ № 203 от 09.05.2017 г. О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы // Собрании законодательства РФ от 15.05.2017 г. № 20. 2901 с.
- [3] **Фомин, И.Н.** Концепция интеллектуальной поддержки синтеза расчётных моделей электроснабжения // Инновационные научные исследования в современном мире: теория, методология, практика / И.Н. Фомин // Сборник статей по материалам II - Международной научно-практической конференции (18 февраля 2020 г., г. Уфа). – Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки, 2020. - С.24-32.
- [4] **Фомин, И.Н.** Теоретико-множественный анализ технико-экономических показателей для задач структурно-параметрического синтеза расчётных моделей электроснабжения / И.Н. Фомин, Т.Э. Шульга, Н.В. Сердюкова // Труды Академэнерго, Исследовательский центр проблем энергетики Казанского научного центра РАН. – Казань, № 2. 2016. - С.82-94.
- [5] **Гаврилова, Т.А.** Инженерия знаний. Модели и методы / Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, Д.И. Муромцев, СПб.: Лань, 2016. - 324 с.
- [6] **Смирнов, С.В.** Онтологический анализ предметных областей моделирования / С.В. Смирнов // Известия Самарского научного центра РАН. Т.3. №1, 2001. - С.62–70.
- [7] **Заде, Л.А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. - 165 с.
- [8] **Черняховская, Л.Р.** Формирование правил принятия решений в управлении проектами по результатам онтологического анализа / Л.Р. Черняховская, А.И. Малахова // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV международной конф. (25-28 июня 2013 г. Самара, Россия). – Самара: СамНЦ РАН, 2013. - С.343–350.
- [9] **Сытник, А.А.** Онтология предметной области «Удобство использования программного обеспечения» / А.А. Сытник, Т.Э. Шульга, Н.А. Данилов // Труды ИСП РАН, том 30, вып. 2, 2018. - С.195-214.
- [10] **Шульга, Т.Э.** О возможности применения LSPL-шаблонов для извлечения текста экземпляров классов онтологии / Т.Э. Шульга, А.О. Дмитриев, Д.И. Паневин // В сб.: Проблемы управления в социально-экономических и технических системах, Мат. XV Междунар. науч.-практ. конф. - М.: Наука, 2019. - С.3-6.
- [11] **Долинина, О.** Алгоритм принятия решения для экспертных систем, использующих механизм нечеткого вывода / О. Долинина, А. Шварц // Материалы XXVI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-26), Саратов - Нижний Новгород. 2013.
- [12] **Егупов, Н.Д.** Методы робастного, нейро-нечёткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова; издание 2-ое, стереотипное. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э Баумана, 2002 - 744 с.
- [13] **Рутковский, Л.** Методы и технологии искусственного интеллекта: Пер. с польск. / Л. Рутковский. – М.: Горячая линия–Телеком, 2010 – 520 с.
- [14] ГОСТ Р 53894-2016. Менеджмент знаний. Термины и определения. Стандартиформ, 2017.
- [15] **Gruber, T.** A translation approach to portable ontology specifications / T. Gruber // Knowledge Acquisition. 1993. V 5. P.199–220.
- [16] НП Совет рынка, Регламент внесения изменений в расчётную модель электроэнергетической системы // НП Совет рынка, Регламент ОРЭМ от 01.12.2019 г. https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_regulation/reglaments/r2_01122019_22112019.pdf.
- [17] **Фомин, И.Н.** Математическая модель и алгоритм оперативного управления генерирующим оборудованием ТЭС / И.Н. Фомин, В.А. Иващенко, Т.Э. Шульга // Прикладная информатика, 2018. Т.13. № 3(75). - С.24-34.
- [18] **Камаев, В.А.** Интеллектуальные системы автоматизации управления энергосбережением / В.А. Камаев, М.В. Щербаков, А. Бребельс // Открытое образование. 2011. № 2-2. С.227-231.
- [19] **Новак, В.** Математические принципы нечёткой логики / В. Новак, И. Перфильева, И. Мочкорж // Пер с англ.; Под ред. Аверкина А.Н. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 352 с.
- [20] **Бадамшин, Р.А.** Проблемы управления сложными динамическими объектами в критических ситуациях на основе знаний / Р.А. Бадамшин, Б.Г. Ильясов, Л.Р. Черняховская. – М.: Машиностроение, 2003 – 240 с.

Сведения об авторе

Фомин Игорь Николаевич, 1969 г. рождения. Окончил Московский государственный открытый университет по специальности электропривод и автоматизация производственных предприятий (1995), магистратуру Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина по специальности информатика и вычислительная техника (2012). Член Национальной палаты инженеров России, доцент кафедры «Информационно-коммуникационные системы и программная инженерия» Института прикладных информационных технологий и коммуникаций Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина, кандидат технических наук. В списке научных работ более 50 публикаций в области энергетики и системного анализа. AuthorID (РИНЦ): 748971. www.infomin.ru. ignik16@yandex.ru.

Поступила в редакцию 25.09.2020, после рецензирования 14.12.2020. Принята к публикации 18.12.2020.

Application of ontological analysis tools for the formation of calculation models of power supply

I.N. Fomin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU), Saratov, Russia,

Abstract

The concept of intellectual support of the process of automated formation of calculation models of power supply in information systems of energy enterprises, based on the principles of knowledge management, is proposed. The concept includes carrying out ontological data analysis and the formation of the corresponding knowledge bases. The stages of the knowledge management process about the parameters of the calculated power supply models have been decomposed in order to develop tools for their automatic generation in billing systems. Sets of parameters of power supply objects and parameters characterizing the volume of energy consumption, price indicators and parameters for calculating the cost of consumed electricity, which, along with the relations between entities and their functional connections, determine the structure of ontologies, have been determined. For the first time, the definitions of the computational model of power supply are given as a semantic model consisting of a set of basic concepts of the electric power industry, and as a system of knowledge about methods of storing and processing information about the values of energy consumption. An ontology of the process of forming calculation models using the Protégé ontological editor is built. Requirements for the knowledge base of the system for supporting the formation of calculation models in information systems are formulated and the possibility of using data mining technologies with mechanisms for checking the consistency, sufficiency and continuity of knowledge through the use of methods for forming fuzzy rules is substantiated. This makes it possible to substantiate the possibility of applying the principles of fuzzy logic for the automated generation of calculation models of power supply in billing systems.

Key words: *calculation model of power supply, DSS, information billing systems, ontological analysis, knowledge bases, fuzzy logic.*

Citation: *Fomin I.N. Application of ontological analysis tools for the formation of calculation models of power supply [In Russian]. Ontology of designing. 2020; 10(4): 477-488. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-477-488.*

List of figures

Figure 1 - Diagram of the knowledge management process about the parameters of the calculation model of power supply in the IDEF0 notation

Figure 2 - Fragment of the ontology of the calculation models forming process

References

- [1] The Government of the Russian Federation. The Strategy for the Development of the Electric Grid Complex of the Russian Federation [In Russian]. Order of the Government of the Russian Federation No. 511-р. (2013. April 03).

- [2] Decree of the President of the Russian Federation No. 203, On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017–2030 [In Russian]. Collected Legislation of the Russian Federation (2017 May 09) No. 20. 2901 p.
- [3] **Fomin IN**. The concept of intellectual support for the synthesis of calculation models of power supply [In Russian]. Innovative scientific research in the modern world: theory, methodology, practice. (Ufa, Russia, 2020. February 18) Collection of articles based on the materials of the II - International scientific and practical conf.: 24-32.
- [4] **Fomin IN, Shulga TE, Serdyukova NV**. Set-theoretic analysis of technical and economic indicators for problems of structural and parametric synthesis of computational power supply models [In Russian]. Transactions of Akademenergo, Center of the Russian Academy of Sciences. Kazan, Russia. 2016; 2: 82-94.
- [5] **Gavrilova TA, Kudryavtsev DV, Muromtsev DI**. Engineering knowledge. Models and methods: Textbook. [In Russian] SPb . Lan, 2016.
- [6] **Smirnov SV**. Ontological analysis of subject areas of modeling [In Russian]. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol. 3. # 1. 2001: 62–70.
- [7] **Zade LA**. The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions [In Russian]. Mir, 1976.
- [8] **Chernyakhovskaya LR, Malahova AI**. Formation of decision-making rules in project management based on the results of ontological analysis [In Russian]. Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh: Trudy XV mezhdunarodnoj konferentsii (2013, June 25-28. Samara, Russia). [Issues of control and modeling in complex systems: Proceedings of the XV International Conference]. Samara: SAM NC RAS, 2013: 343–350.
- [9] **Sytnik AA, Shulga TE, Danilov NA**. Ontology of the subject area "Software Usability" [In Russian]. Proceedings of ISP RAS, 2018; 30(2): 195-214.
- [10] **Shulga TE, Dmitriev AO, Panevin DI**. On the possibility of using LSPL-Templates for extracting the text of instances of ontology classes [In Russian]. Materials of the XV International Scientific and Practical Conference. 2019: 3-6.
- [11] **Dolinina O, Schwartz A**. Decision-making algorithm for expert systems using the fuzzy inference mechanism [In Russian]. Proceedings of the XXVI International Scientific Conference MMTT-26, Saratov, Russia, 2013.
- [12] **Egupov ND**. Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control: A Textbook [In Russian] MGTU, 2002.
- [13] **Rutkovskij L**. Methods and technologies of artificial intelligence [In Russian]. Transl. Polish, Goryachaya liniya–Telekom, 2010. 520 p.
- [14] GOST R 53894-2016, Knowledge management. Terms and Definitions [In Russian]. Standartinform, 2017.
- [15] **Gruber T**. A translation approach to portable ontology specifications. Knowledge Acquisition.V 5. 1993.
- [16] NP Market Council, Regulations for Amendments to the Design Model of the Electric Power System [In Russian]. NP Market Council, Regulations for the Wholesale Electric Power Market (2019 December 01) https://www.np-sr.ru/sites/default/files/sr_regulation/reglaments/r2_01122019_22112019.pdf.
- [17] **Fomin IN, Shulga TE, Ivaschenko VA**. A mathematical model and algorithm of operational control of TPP generating equipment [In Russian]. Prikladnaya informatika, Sinergiya, 2018; 13(3): 24-34.
- [18] **Kamaev VA, Shcherbakov MV, Brebels A**. Intelligent systems of automation of energy saving management [In Russian]. Otkrytoe obrazovanie. 2011; 2-2: 227-231.
- [19] **Novak V, Perfilieva I, Mochkorzh I**. Mathematical principles of fuzzy logic. Publisher: Kluwer Academic Publisher, Boston. 1999.
- [20] **Badamshin RA, Ilyasov BG, Chernyakhovskaya LR**. Management problems of complex dynamic objects in critical situations based on knowledge [In Russian]. Mechanical Engineering, 2003. 240 p.

About the author

Igor Nikolaevich Fomin, (b.1969). PhD. In 1995 he graduated from the Moscow State Open University with a degree in electric drive, automation of industrial enterprises, and in 2012 he received a master's degree in computer science and computer technology at Gagarin State Technical University of Saratov. Igor Fomin is a member of the National Chamber of Engineers of Russia, Associate Professor of the Department of Information and Communication Systems and Software Engineering of the Institute of Applied Information Technologies and Communications of the Saratov State Technical University. The list of scientific works includes more than 50 publications in the field of energy and systems analysis. AuthorID (RSCI): 748971. www.infomin.ru. ignik16@yandex.ru.

Received September 25, 2020. Revised December 14, 2020. Accepted December 18, 2020.