

**В. В. Антонов**, д-р техн. наук, проф., antonov.v@bashkortostan.ru,  
**Л. А. Кромина**, канд. техн. наук, доц., luyda-kr@yandex.ru,  
**Л. Е. Родионова**, канд. техн. наук, доц., lurik@mail.ru,  
**А. Р. Фахруллина**, канд. техн. наук, доц., almirafax@mail.ru,  
**Л. И. Баймурзина**, ст. преподаватель, lilabay@mail.ru,  
Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа,  
**Е. В. Пальчевский**, преподаватель, teelxp@inbox.ru,  
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва,  
**Е. А. Родионов**, вед. инженер центра технической поддержки, real42@yandex.ru,  
ООО "Сбербанк-сервис" г. Москва

## Концепция формирования интеллектуальных управляющих систем энергоснабжения городских сетей\*

*Вопросы интеллектуального управления в предметно-ориентированной области электроэнергетики (в нашем случае — энергосбережения) как основы любого индустриального производства в современных условиях требуют разработки и внедрения, в первую очередь, новых решений на основе современных IT-технологий.*

*По данным Всемирного банка известно, что энергоёмкость в России в 3...4 раза ниже, чем в европейских странах. Также известно, что в связи со вступившими в силу новыми положениями в сфере жилищно-коммунального хозяйства, направленными на повышение экономической эффективности в плане потребления электрической энергии, становится весьма актуальным вопрос об обеспечении ее точного и оперативного учета с возможностью дальнейшего прогнозирования потребления электроэнергии и состояния объектов электросети. Это позволит специализированным организациям и службам, а также управляющим органам в кратчайшие сроки принимать сбалансированные эффективные решения в условиях растущей экономической неопределенности.*

*В данной статье предлагается концепция интеллектуальной управляющей системы для управления процессом мониторинга состояния на основе данных интеллектуальных датчиков. Научная новизна заключается в разработке и применении новой интеллектуальной модели (теоретико-множественной модели процессов соглашения для жизненного цикла интеллектуально-управляющей системы) и методов математического моделирования на основе полученных и восстановленных больших разнородных данных при определении потерь электроэнергии с применением методов теории множеств и теории категорий.*

**Ключевые слова:** машинное обучение, искусственный нейрон, искусственный интеллект, теория категорий, интеграция систем, программно-аналитический комплекс, интеллектуальные датчики, энергоэффективность

### Введение

Одной из важнейших задач электроэнергетики в мире, в том числе и в Российской Федерации, является обеспечение качества поставляемой электроэнергии и повышение энергоэффективности за счет снижения энергопотерь и внедрения энергосберегающих мероприятий. В связи с тем, что Российская Федерация расположена в суровых климатических условиях, значительное потребление электроэнергии приходится на потребителей городов и районов (многоквартирные и частные дома), что составляет около трети от общего потребления электроэнергии страны в год. При этом по данным Международного энергетического агентства спрос на электроэнергию вырастет на 50 % к 2050 г. [1]. Более того, сокращение потерь при потреблении

электроэнергии и переход к более устойчивому использованию ресурсов все чаще становятся проблемой для любого вида деятельности. Во многих странах данная проблема частично решается с использованием умных сетей энергоснабжения Smart Grid, с помощью которых выстраиваются интеллектуальные коммуникации между отдельными задачами и операциями в течении всего жизненного цикла энергетических объектов в соответствии с принципами и методами системной инженерии.

Мировой опыт использования Smart Grid демонстрирует основные технологии стратегий внедрения интеллектуальных сетей: в Индии активно используют SCADA/Energy Billing, Energy Auditing & ABT Meter Interface/DMS/EMS и другие технологии; в Швеции автоматизировали и разработали интеллектуальную сеть морского порта в Стокгольме; в США разработали усовершенствованную систему распределения электроэнергии (DMS) и осуществляют мониторинг телемеханики и оборудования на подстанциях и др.

\*Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения Государственного задания № FEUE-2023-0007.

Значительный вклад в использование малой генерации в системах электроснабжения промышленных предприятий, в создание распределенной генерации в распределительной электрической сети, в планирование режимов сетей с объектами распределенной генерации, в разработку интеллектуальных управляющих систем внесли М. В. Батенин [2], Н. И. Воропай [3], Е. Н. Гежа [4], П. М. Ерохин, С. А. Ерошенко, А. В. Паздерин [5], П. В. Илюшин [6], А. Г. Фишов [7], А. А. Суворов [8], Chenjun Shi [9], С. W. Gellings [10], M. S. Hamad [11], Hong-Phuc Nguyen [12], Yoash Levron [13]. Множество публикаций посвящено разработке сложной электрической системы для автоматического управления электрической энергией, в том числе работа К. Р. Аллаева [14], энергетические и экономические показатели эффективности рассмотрены в работе Н. Р. Аvezовой [15] и др.

Проведенные исследования вышеупомянутых и не только литературных источников показали отсутствие работ, рассматривающих вопросы комплексного подхода к развернутой оценке энергоэффективности предприятия и выбору направлений ее повышения на промышленных предприятиях, а также определения критериев выбора эффективного мероприятия по энергосбережению. Таким образом, представленные в данной статье результаты исследования не имеют аналогов и обладают признаками научной новизны.

### Теоретико-множественная модель процессов жизненного цикла интеллектуальной управляющей системы

Рассматривая базовые стандарты системной инженерии, отдельно выделим ISO/IEC/IEEE 15288:2015(E), отражающий все принципы описания жизненного цикла процессов системы и позволяющий управлять системой и реализовывать проектируемые функции (рис. 1) [16].

На примере разработки прототипа интеллектуальной управляющей системы (ИУС) на основе "Smart Grid" важно отметить, что появляется возможность автоматической оценки текущей ситуации и прогнозирования параметров потерь электроэнергии в будущем. Исходя из этого можно



Рис. 1. Стандарты системной инженерии  
Fig. 1. Systems engineering standards

сделать выводы о необходимости внедрения энергосберегающих мероприятий — интеллектуального мониторинга состояния объектов электросетей (на основе учета и прогнозных значений потребления электроэнергии, мощности и текущей нагрузки электросети), позволяющего выявлять потери (в том числе и тенденцию изменения потерь) электроэнергии, а также отслеживать нагрузку как на электросети в целом, так и на их объекты в частности [17, 18].

Таким образом, возникает задача, связывающая два независимых бизнес-процесса: с одной стороны, процесс поставки электроэнергии одними организациями, с другой, — процесс получения электроэнергии другими организациями — потребителями электроэнергии.

Рассмотрим стандарт системной инженерии ISO/IEC/IEEE 15288 для формализации целей, видов деятельности и ее результатов [16].

Данный стандарт описывает четыре группы процессов жизненного цикла (ЖЦ) системы (рис. 2).



Рис. 2. Процессы жизненного цикла международного стандарта ISO/IEC/IEEE 15288  
Fig. 2. ISO/IEC/IEEE 15288 International Standard processes

Поскольку в стандарте ISO/IEC/IEEE 15288 предусмотрены процессы согласования, существуют рабочие отношения, создающиеся по соглашению. При определении семантики отношений строгость отношения и значения сохраняются. Для моделирования процесса соглашения используются основные положения теории категорий. Рассмотрим основной процесс соглашения  $PS$  и подпроцессы приобретения  $PS_{pr}$  и поставок  $PS_{po}$  и определим для данных процессов категории и подкатегории. Категории и подкатегории включают цели и действия процесса, а также результаты. При взаимодействии подкатегорий внутри них определяются информационные объекты, в результате которых формируются коммутативный треугольник (рис. 3) [17].

Рассматривая процесс соглашения  $PS$  на примере заключения договора между потребителем электроэнергии и поставщиком электроэнергии, определяем его как процесс приобретения  $PS_{pr}$ . Соответствующим процессом поставки  $PS_{po}$  будет являться передача запланированного количества электроэнергии. Исходя из категории процесса соглашения  $PS$  получаем класс объектов. Классы объектов харак-

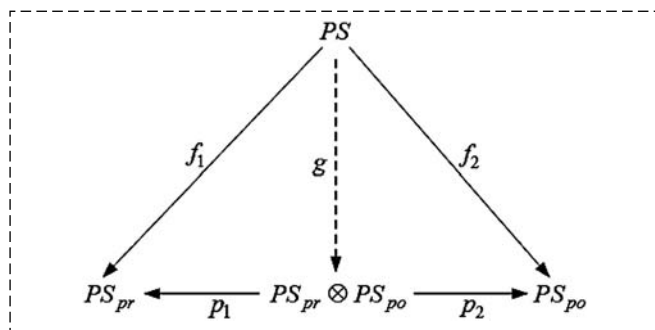


Рис. 3. Обобщенная схема коммутативного треугольника процесса соглашения

Fig. 3. Simplified diagram of a commutative triangle agreement process

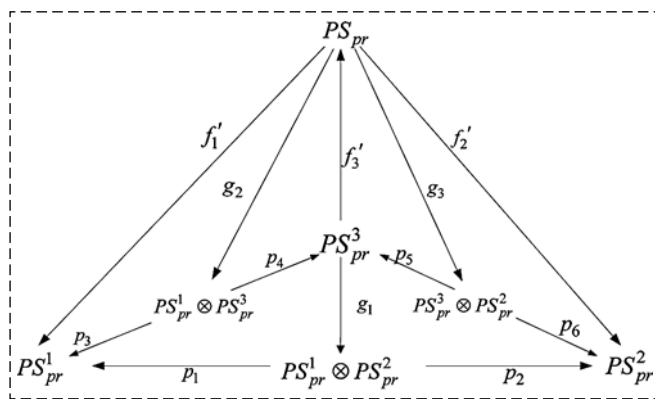


Рис. 4. Схема подкатегории процесса приобретения в виде коммутативного треугольника

Fig. 4. Commutative triangle of the acquisition process

теризуются следующими определенными отношениями пар:  $(PS, PS_{pr})$  и  $(PS, PS_{po})$  с соответствующими отображениями (морфизмами)  $f_1, f_2$ . Рассматривая процессы соглашения в виде взаимодействия процессов приобретения и поставок, представим этот процесс взаимодействия декартовым произведением

$$g : PS \rightarrow PS_{pr} \otimes PS_{po},$$

где  $g$  является единственным морфизмом и результатом процесса соглашения (рис. 3).

Рассмотрим отдельную подкатегорию — процесс приобретения  $PS_{pr}$ , который состоит из (рис. 4):

1. Цели процесса приобретения

$$PS_{pr}^1 = \{pr_1^1\}.$$

2. Деятельности в процессе приобретения

$$PS_{pr}^2 = \{pr_1^2, \dots, pr_8^2\}.$$

3. Результаты процесса приобретения

$$PS_{pr}^3 = \{pr_1^3, \dots, pr_7^3\}.$$

Аналогично описываются объекты внутри подкатегорий процесса приобретения  $PS_{pr}$ , где информационные объекты представлены декартовым произведением  $PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^2$  с морфизмами  $p_1 : PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^2 \rightarrow PS_{pr}^1$  и  $p_2 : PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^2 \rightarrow PS_{pr}^2$ , такими что для любого информационного объекта  $PS_{pr}$  с морфизмами  $f_1' : PS_{pr} \rightarrow PS_{pr}^1$  и  $f_2' : PS_{pr} \rightarrow PS_{pr}^2$  существует единственный морфизм  $g_1 : PS_{pr} \rightarrow PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^2$ , который определяется коммутативной диаграммой.

В результате получаем процесс приобретения в виде декартового произведения следующих проекций:

$$PS_{pr} = (PS_{pr}^1) \otimes (PS_{pr}^2) \otimes (PS_{pr}^1) \otimes (PS_{pr}^3) \otimes (PS_{pr}^3) \otimes (PS_{pr}^2). \quad (1)$$

Упростив формулу (1), получаем:

$$PS_{pr} = \{(PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^2), (PS_{pr}^1 \otimes PS_{pr}^3), (PS_{pr}^3 \otimes PS_{pr}^2)\}.$$

Аналогично описывается подкатегория "процесс поставки  $PS_{po}$ " (рис. 5).

В результате процесс приобретения может быть представлен в виде декартового произведения:

$$PS_{po} = (PS_{po}^1) \otimes (PS_{po}^2) \otimes (PS_{po}^1) \otimes (PS_{po}^3) \otimes (PS_{po}^3) \otimes (PS_{po}^2). \quad (2)$$

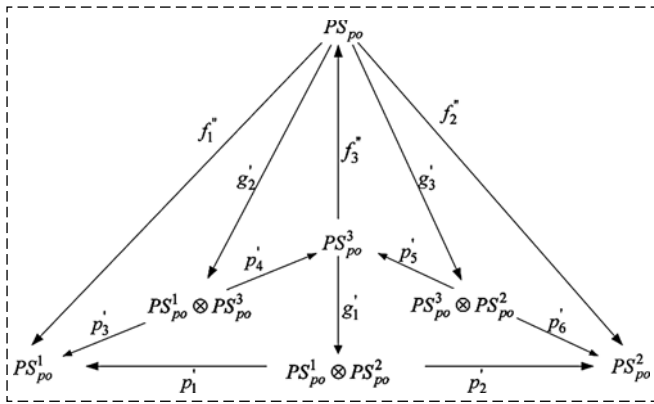


Рис. 5. Коммутативный треугольник процесса поставки  
Fig. 5. Commutative triangle of the supply process

Упростив формулу (2), получаем:

$$PS_{po} = \{(PS^1_{po} \otimes PS^2_{po}), (PS^1_{po} \otimes PS^3_{po}), (PS^3_{po} \otimes PS^2_{po})\}. \quad (3)$$

Далее представлен пример реализации теоретико-множественной модели процессов соглашения в виде математической модели распределения электроэнергии. Данная модель предоставляет возможность определять баланс и дисбаланс показателей объема передаваемой электроэнергии распределительными электрическими сетями конечным потребителям, а также потери электроэнергии на любом участке энергосети.

Энергоснабжение городских сетей обусловлено множествами потребителей электрической энергии, подстанциями, фидерами и оборудованием. Перед поступлением к конечному потребителю электрическая энергия проходит определенные участки сети, что показано на

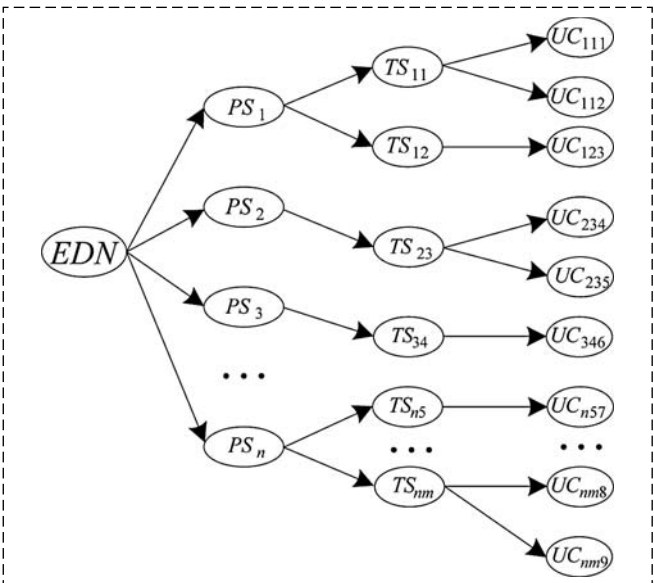


Рис. 6. Схема распределения электроэнергии  
Fig. 6. Power distribution scheme

рис. 6. На рис. 6 *EDN* — электрические распределительные сети, *PS* — силовая подстанция, *TS* — трансформаторная подстанция, *UC* — конечный потребитель.

При передаче электрической энергии на любом участке сети могут возникнуть потери, например: на линиях, связывающих распределительные электрические сети и силовые подстанции; на линиях, связывающих силовые и трансформаторные подстанции; на линиях, связывающих трансформаторные подстанции с конечным потребителем; на линиях, находящихся в конечных пунктах потребления.

Введем следующие обозначения:  $V^1$  — общий объем электрической энергии, предоставляемый распределительной электрической сетью;  $V^2$  — объем электрической энергии, получаемый всеми силовыми подстанциями;  $V^3$  — объем электрической энергии, предоставляемый всеми силовыми подстанциями;  $V^4$  — объем электрической энергии, получаемый всеми трансформаторными подстанциями;  $V^5$  — объем электрической энергии, предоставляемый всеми трансформаторными подстанциями;  $V^6$  — объем электрической энергии, получаемый всеми конечными потребителями;  $i$  — порядковый номер силовой подстанции,  $i = 1, \dots, n$ , где  $n$  — число силовых подстанций;  $j$  — порядковый номер трансформаторной подстанции,  $j = 1, \dots, m$ , где  $m$  — число трансформаторных подстанций;  $k$  — порядковый номер конечного потребителя,  $k = 1, \dots, t$ , где  $t$  — число конечных потребителей;  $p_i$  — параметр подключения  $i$ -й силовой подстанции к распределительной электрической сети, такой что

$$p_i = \begin{cases} 1, & \text{если силовая подстанция} \\ & \text{подключена;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

$p_{ij}$  — параметр подключения  $j$ -й трансформаторной подстанции к  $i$ -й силовой подстанции, такой что

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если трансформаторная} \\ & \text{подстанция подключена;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (5)$$

$p_{ijk}$  — параметр подключения  $k$ -го конечного потребителя к  $j$ -й трансформаторной подстанции  $i$ -й силовой подстанции, такой что

$$p_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{если конечный потребитель} \\ & \text{подключен;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

Тогда формулу для вычисления объема электрической энергии, получаемого всеми силовыми подстанциями, можно записать в виде

$$V^2 = \sum_{i=1}^n (V_i^2 p_i), \quad (7)$$

где  $V_i^2$  — объем электрической энергии, получаемый  $i$ -й силовой подстанцией.

Формула для определения объема электрической энергии, предоставляемого всеми силовыми подстанциями, имеет вид

$$V^3 = \sum_{i=1}^n (V_i^3 p_i), \quad (8)$$

где  $V_i^3$  — объем электрической энергии, предоставляемый  $i$ -й силовой подстанцией.

Объем электрической энергии, получаемый всеми трансформаторными подстанциями, можно вычислить по формуле

$$V^4 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (V_{ji}^4 p_{ij}), \quad (9)$$

где  $V_{ij}^4$  — объем электрической энергии, получаемый  $j$ -й трансформаторной подстанцией  $i$ -й силовой подстанции.

Объем электрической энергии, предоставляемый всеми трансформаторными подстанциями, может быть записан в виде

$$V^5 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (V_{ji}^5 \cdot p_{ij}), \quad (10)$$

где  $V_{ij}^5$  — объем электрической энергии, предоставляемый  $j$ -й трансформаторной подстанцией  $i$ -й силовой подстанции.

Тогда объем электрической энергии, получаемый всеми конечными потребителями, определяется по формуле

$$V^6 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l (V_{ijk}^6 p_{ijk}). \quad (11)$$

Таким образом, в системе энергообеспечения должен соблюдаться баланс, смысл которого заключается в том, что общий объем электрической энергии, предоставляемый распределительной электрической сетью, должен быть равен: объему электрической энергии, получаемому всеми силовыми подстанциями; объему электрической энергии, предоставляемому всеми силовыми подстанциями; объему электрической энергии, получаемому всеми трансформаторными подстанциями; объему электрической энергии, предоставляемому всеми трансформаторными подстанци-

ми; объему электрической энергии, получаемому всеми конечными потребителями, т.е.

$$V^1 = V^2 = V^3 = V^4 = V^5 = V^6. \quad (12)$$

Однако в реальности могут иметь место потери электрической энергии, которые можно классифицировать, как показано на рис. 7.

В рамках данной работы предлагается определять размер потерь на каждом конкретном участке сети следующим образом [22]:

1) потери на линиях, связывающих распределительные электрические сети и силовые подстанции,

$$P^1 = \frac{(V^1 - V^2) \cdot 100 \%}{V^1}; \quad (13)$$

2) потери на силовых подстанциях

$$P^2 = \frac{(V^2 - V^3) \cdot 100 \%}{V^2}; \quad (14)$$

3) потери на линиях, связывающих силовые и трансформаторные подстанции,

$$P^3 = \frac{(V^3 - V^4) \cdot 100 \%}{V^3}; \quad (15)$$

4) потери на трансформаторных подстанциях

$$P^4 = \frac{(V^4 - V^5) \cdot 100 \%}{V^4}; \quad (16)$$

5) потери на линиях, связывающих трансформаторные подстанции с конечным потребителем, а также потери в конечных пунктах потребления

$$P^5 = \frac{(V^5 - V^6) \cdot 100 \%}{V^5}. \quad (17)$$

Таким образом, общий объем потерь электроэнергии  $P$  определяется как сумма потерь на всех участках сети:

$$P = P^1 + P^2 + P^3 + P^4 + P^5. \quad (18)$$

В случае, когда общий объем потерь электроэнергии  $P$  превышает допустимое плановое значение потерь  $PL$ , следует выявлять причину и устранять ее [19, 20]. Предложенная математическая модель применима при реализации

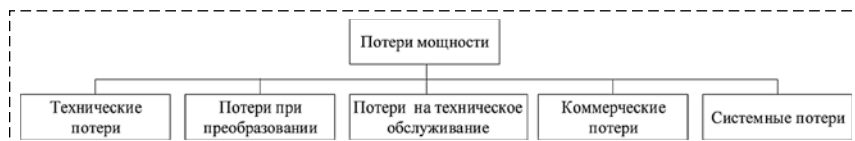


Рис. 7. Классификация потерь электроэнергии

Fig. 7. Classification of electricity losses

Баланс на основании ежемесячных сводных актов первичного учета перетоков электрической энергии по сетям ООО "Башкирэнерго"

*Balance based on monthly summary acts of primary metering of electric energy flows through the networks of Bashkirenergo LLC*

Наименование показателя	Единица измерения	Значения до внедрения ИУС	Значения после внедрения ИУС
Отпуск электроэнергии в сеть	тыс. кВт·ч	21 327 410,34	21 327 410,34
Отпуск электроэнергии из сети, в том числе:	тыс. кВт·ч	19 739 619,10	19 739 619,10
Отпуск электроэнергии из сети нижестоящим сетевым организациям	тыс. кВт·ч	3 604 033,49	3 604 033,49
Полезный отпуск электроэнергии из сети потребителям, юридическим лицам	тыс. кВт·ч	13 017 803,15	13 017 803,15
Полезный отпуск электроэнергии из сети населению и приравненным к нему потребителям	тыс. кВт·ч	3 117 782,47	3 117 782,47
Потери электроэнергии в сети	тыс. кВт·ч	1 587 791,23	1 190 843,42
Потери электроэнергии в сети	%	7,44	5,58
Затраты на покупку потерь электроэнергии в сетях (финансовые убытки)	млн руб.	4 418,68	3 314,01

интеллектуальной системы, направленной на организацию энергосбережения.

На сегодняшний день главным показателем эффективности функционирования предприятия является потеря электроэнергии. На различных территориях нашей страны существуют свои нормы или же приемлемый уровень потерь электроэнергии, а также максимально возможный уровень потерь по техническим причинам. Представленная математическая модель с аналитическими показателями говорит о том, что увеличение показателя уровня потерь электроэнергии влечет за собой проблему, требующую анализа и принятия решения. Суммарное выражение всех имеющихся потерь предприятия должно стремиться к нулю, иначе потери электроэнергии являются прямыми финансовыми убытками электрических сетей.

Конечно, в теории финансовые убытки обязаны приравниваться к нулю, но в действительности расчеты выработанной электроэнергии, технические и абсолютные потери всегда имеют погрешности. С помощью предлагаемой ИУС на основе теоретико-множественной модели процессов соглашения и анализа данных во время совершенных операций данные погрешности должны быть сведены к минимуму.

В качестве примера рассмотрим результат, полученный в рамках внедрения ИУС в компанию ООО "Башкирские распределительные электрические сети". В табл. 1 представлена информация о балансе электрической энергии и мощности, в том числе об отпуске электроэнергии, потерях

электроэнергии из сети ООО "Башкирэнерго" по уровням напряжений [21, 22].

В результате проведенного сравнительного анализа мы видим, что существенно сократились финансовые затраты на потери электроэнергии в сети на 1 104,67 млн руб., потери электроэнергии уменьшились на 1,86 %. Осуществление всесторонних изменений системы управления с помощью ИУС привело к улучшению ключевых показателей результативности и росту эффективности предприятия.

### Структура интеллектуальной управляющей системы

Определяя структуру на основе теоретико-множественной модели ИУС, получаем схему хранилища данных ИУС, представленную на рис. 8.

ИУС характеризуется возможностью использования различных СУБД (Oracle, MySQL, Data Warehouse, OLTP, OLAP и др.), современных средств хранения и оперативной аналитической обработки информации. При использовании ИУС руководители получают эффективный инструмент для анализа количества энергопотерь, а также для формирования данных о энергопотерях, представленных в табличном и графическом виде. Данная ИУС решает задачи обеспечения централизованного сбора и хранения, обработки, обновления и структуризации, интеграции и консолидированного анализа. Подсистемы ИУС отвечают принципам развиваемости, блочности построения и адаптивности функциональной части.

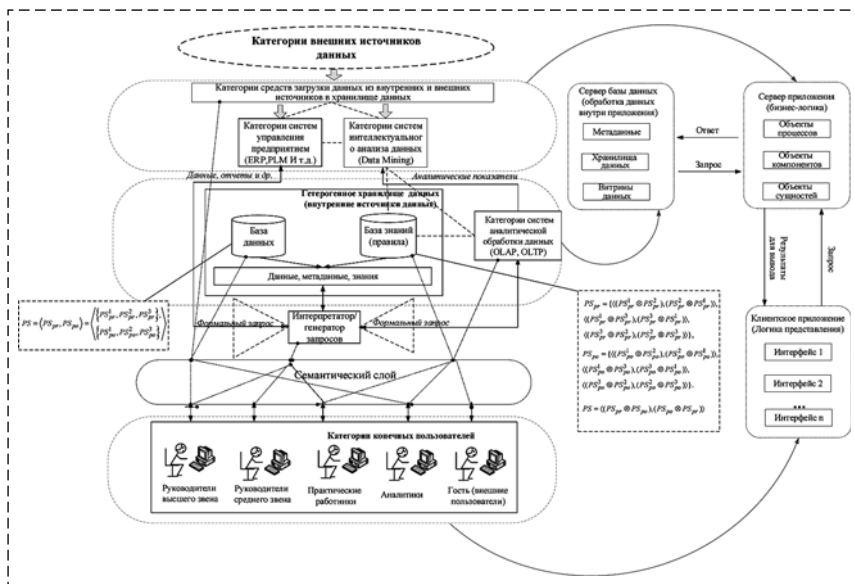


Рис. 8. Обобщенная схема хранилища данных ИУС  
 Fig. 8. Generalised schematic diagram of an IMS data warehouse

Для частного случая — управления потерями — основными данными для БД служат показатели электроэнергии, где имеется полная информация о показателях потерь электроэнергии, идентификатор таблицы, в которой хранятся значения атрибутов, а также идентификаторы размерности значений атрибута.

В базе знаний описан алгоритм работы программы в терминах теории категорий множеств.

Внешними источниками данных являются:

- министерство энергетики РФ;
- местная администрация города и района;
- взаимодействующие организации (предприятия, многоквартирные и частные дома);
- вышестоящие органы управления (холдинги, корпорации и т. д.).

### Заключение

В рамках проведенного исследования разработаны:

- 1) универсальная многомерная структура ИУС, позволяющая повысить эффективность обработки, передачи, интеграции данных и знаний интеллектуального контента в компьютерных сетях, на примере формирования плана передачи электрической энергии.;
- 2) математическая модель, предоставляющая возможность определять баланс и дисбаланс показателей объема передаваемой распределительными электрическими сетями до конечных потребителей электроэнергии, а также потери электроэнергии на любом участке энергосети.

Построенная математическая модель может быть применима при реализации интеллектуальной системы, направленной на организацию энергосбережения.

Таким образом, предложенные модели целесообразно применять в рамках реализации ИУС, что в полной мере обеспечит оперативность выявления потерь электрической энергии.

На основании проведенного исследования сформулированы основы построения структуры ИУС для описанной предметной области с использованием теории категорий и формальных языков для формального описания объектов и их взаимодействия,

а также с применением аппарата искусственного интеллекта.

Предложенная ИУС позволяет осуществить пополнение коллекций данных и их предварительную обработку с выявлением особенностей, классификацию, систематизацию, оптимизацию и очистку для повышения информационной насыщенности. Также облегчается интерпретация результатов апробации предложенных теоретических основ на реальных примерах для сложных систем.

### Список литературы

1. International Energy Agency. Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050. Paris: OECD/IEA, 2013. 284 p.
2. Батенин В. М., Бушуева В. В., Воропай Н. И. Инновационная электроэнергетика. М.: Энергия, 2017. 584 с.
3. Воропай Н. И., Суслов К. В. Задачи обоснования разработки систем активного электроснабжения // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 2—6.
4. Гежа Э. Н., Ивкин Э. С., Сердюков О. В., Глазырин В. Е., Глазырин Г. В., Марченко А. И., Семендяев Р. Ю., Фишин А. Г. Системная автоматизация интеграции локальных систем электроснабжения с синхронной малой генерацией в электрические сети" // Ретранслятор. 2018. Т. 2, № 32. С. 24—31.
5. Ерохин П. М., Ерошенко С. А., Паздерин А. В., Самойленко В. О., Рывлин А. Л., Стерлягова С. А. Разработка адекватных технических условий на технологическое присоединение объектов малой мощности к электрическим сетям // Промышленная энергетика. 2016. Т. 2. С. 6—12.
6. Ильишин П. В., Кучеров Ю. Н., Жук А. З., Веселов Ф. В. Особенности интеграции малых распределенных тепловых электростанций в энергосистему // Энергетическая академия. 2014. Т. 6, № 3. С. 36.
7. Фишов А. Г., Ландман А. К., Сердюкова О. В. SMART-технологии подключения к электрическим сетям и управления режимами малой генерации // VIII Международная

молодежная научно-техническая конференция "Электроэнергетика глазами молодежи — 2017. Самара: СамГТУ, 2017. С. 27—34.

8. Суворов А. А., Гусев А. С., Андреев М. В., Ставицкий С. А. Проблема достоверности расчетов токов короткого замыкания в электроэнергетических системах и средства их всережимной проверки // Известия РАН. Энергия. 2018. Т. 2. С. 13—25.

9. Lei L., Lezhu C., Sheng X., Yongjia X., Chenjun S. Design and implementation of intelligent monitoring terminal for distribution room based on edge computing // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 1131—1138.

10. Gellings C. W. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response. River Publishers, 2009. 250 p.

11. Mohab G., El-Banna S. H., El-Dabah M., Hamad M. S. Intelligent Energy Management System for an all-electric ship based on adaptive neuro-fuzzy inference system // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 7989—7998.

12. Wang K., Dagne T. B., Lin C. J., Haile B. W., Nguyen H. P. Intelligent control for energy conservation of air conditioning system in manufacturing systems // Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 2125—2137.

13. Onile A. E., Machlev R., Petlenkov E., Levron Y., Belikov J. Uses of the digital twin's concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management // A review, Energy Reports. 2021. Vol. 7. P. 997—1015.

14. Allaev K., Makhmudov T. Research of small oscillations of electrical power systems using the technology of embedding systems // Electrical Engineering. 2020. Vol. 102. P. 309—319.

15. Avezova N. R., Avezov R. R., Samiev K. A. et al. Comparative Heating Performance and Engineering Economic Indicators of the "Trombe Wall" System in Different Climate Zones of Uzbekistan // Applied Solar Energy. 2021. Vol. 57. P. 128—134.

16. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 System and software engineering — System life cycle processes.

17. Куликов Г. Г., Ризванов К. А., Петров Ю. Е. Системный подход к построению структуры организационно-функциональной модели цифрового моделирования производственных процессов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная техника, управление, радиоэлектроника. 2018. № 2. С. 60—70.

18. Куликов Г. Г., Антонов В. В., Фахруллина А. Р., Родионова Л. Е. Формальная модель процессов взаимодействия компонентов программных систем на основе фрактального подхода // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2018. № 4. С. 48—69.

19. Kulikov G. G., Antonov V. V., Antonov D. V. Theoretical and applied aspects of building models of information systems // LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2011. 134 p.

20. Kulikov G. G., Antonov V. V., Rodionova L. E., Fakhrullina A. R., Kromina L. A. Architecture of the intelligent software-analytical complex for operating big in a subject-oriented area (for example in the power engineering) // Proceedings 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: ICOECS 2020. 2020. P. 1—6.

21. Раскрытие информации в соответствии со Стандартами раскрытия информации субъектами оптового и розничного рынков электрической энергии, утвержденными постановлением Правительства Российской Федерации от 21.01.2004 № 24 [Электронный ресурс]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102085036>

22. Севек В. К., Сагааноол К. Б., Манчык-Сат Ч. С., Монгушова С. П. Состав и классификация потерь электроэнергии при ее передаче // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2014. № 3. С. 124—130.

## The Concept of Formation of Intelligent Control Systems of Power Supply of Urban Networks

V. V. Antonov, antonov.v@bashkortostan.ru, L. A. Kromina, luyda-kr@yandex.ru,

L. E. Rodionova, luyda-kr@yandex.ru, A. R. Fakhrullina, almirafax@mail.ru, L. I. Baimurzina, lilabay@mail.ru,  
Ufa University of Science and Technology, Ufa, 450008, Russian Federation,

E. V. Palchevsky, teelxp@inbox.ru,

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 109456, Russian Federation

E. A. Rodionov, real42@yandex.ru,

LLC "Sberbank Service", Moscow, 127018, Russian Federation

Corresponding author: Palchevsky Evgeny V., Lecturer, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, 109456, Russian Federation, e-mail: teelxp@inbox.ru

Accepted on November 22, 2023

### Abstract

Modern capabilities of intelligent control systems are increasingly being used in areas previously considered the exclusive work of people — experts with relevant experience in a particular field. Machine learning capabilities in the field of electric power industry, obtaining forecasts based on the data of intelligent sensors of various purposes are not an exception. At present the Russian Government has adopted a program for the development of the manufacturing industry until the end of 2035: during this time manufacturing output should grow by 192 %. It is obvious that this program should also meet the requirements of the modern scientific concept of industrial revolution "Industry 4.0", when manufacturing enterprises and corporations begin to develop and apply subsystems and elements of "smart manufacturing", which help to build intelligent communications between individual tasks and operations during the entire life cycle of production, in accordance with the principles and methods of systems engineering. It is important to note that the issues of intelligent management in the subject-oriented area of electric power industry (in our case — energy saving), as the basis of any industrial production in modern conditions, require the development and implementation, first of all, of new solutions based on modern IT-technologies. It is known that energy intensity in Russia, according to the World Bank, is 3-4 times lower than in European countries. It is also known that in connection with the new provisions in the field of housing and communal services, aimed at improving economic efficiency in terms of electricity consumption, it becomes very important to ensure

its accurate and operational accounting with the possibility of further forecasting of electricity consumption and the state of power grid facilities, which will allow specialized organizations and services, as well as the managing bodies in the shortest time to make a balanced specialized decisions This paper proposes the concept of intelligent control system to manage the process of condition monitoring based on data from intelligent sensors. The novelty of the concept is to consider a variant of solving the problem of integration of information systems associated with weakly structured subject-oriented information flows in the electric power industry enterprise by using methods of set theory and category theory.

**Keywords:** machine learning, artificial neuron, artificial intelligence, category theory, systems integration, information and control system, smart sensors, energy efficiency

**Acknowledgements:** The research is carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of the basic part of the state task for higher education institutions # FEUE-2023-0007.

For citation:

Antonov V. V., Kromina L. A., Rodionova L. E., Fakhullina A. R., Baimurzina L. I., Palchevsky E. V., Rodionov E. A. The Concept of Formation of Intelligent Control Systems of Power Supply of Urban Networks, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 4, pp. 190–198.

DOI: 10.17587/mau.24.190-198

## References

1. International Energy Agency. Transition to Sustainable Buildings: Strategies and Opportunities to 2050, Paris, 2013, 290 p.
2. Batenin V. M., Bushueva V. V., Voropai N. I. Innovative electric power industry, Moscow, Energy, 2017, 584 p. (in Russian).
3. Voropay N. I., Suslov K. V. Tasks of substantiation of the development of active power supply systems, *Industrial Energy*, 2018, no. 1, pp. 2–6 (in Russian).
4. Gezha E. N., Ivkin E. S., Serdyukov O. V., Glazyrin V. E., Glazyrin G. V., Marchenko A. I., Semendyaev R. Yu., Fishin A. G. System automation of the integration of local power supply systems with synchronous small generation into electric networks, *Retranslator*, 2018, vol. 2, no. 32, pp. 24–31 (in Russian).
5. Erokhin P. M., Eroshenko S. A., Pazderin A. V., Samoilenko V. O., Ryvlin A. L., Sterlyagova S. A. Development of adequate technical conditions for the technological connection of low-power facilities to electric networks, *Industrial Energy*, 2016, vol. 2, pp. 6–12 (in Russian).
6. Ilyushin P. V., Kucherov Yu. N., Zhuk A. Z., Veselov F. V. Features of the integration of small distributed thermal power plants into the energy system, *Energy Academy*, 2014, vol. 6, no. 3, p. 36 (in Russian).
7. Fishov A. G., Landman A. K., Serdyukova O. V. SMART technologies for connecting to electric grids and controlling modes of small generation, *VIII International Youth Scientific and Technical Conference "Electric power industry through the eyes of youth – 2017"*, pp. 27–34 (in Russian).
8. Suvorov A. A., Gusev A. S., Andreev M. V., Stavitsky S. A. The problem of reliability of calculations of short-circuit currents in electric power systems and means of their all-mode verification, *Izvestiya RAN. Energy*, 2018, vol. 2, pp. 13–25 (in Russian).
9. Lei L., Lezhu C., Sheng X., Yongjia X., Chenjun S. Design and implementation of intelligent monitoring terminal for distribution room based on edge computing, *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 1131–1138 (in Russian).
10. Gellings C. W. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response, River Publishers, 2009, 250 p.
11. Mohab G., El-Banna S. H., El-Dabah M., Hamad M. S. Intelligent Energy Management System for an all-electric ship based on adaptive neuro-fuzzy inference system, *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 7989–7998.
12. Wang K., Dagne T. B., Lin C. J., Haile B. W., Nguyen H. P. Intel-ligent control for energy conservation of air condition-ing system in manufacturing systems, *Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 2125–2137.
13. Onile A. E., Machlev R., Petlenkov E., Levron Y., Belikov J. Uses of the digital twin's concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management, *A review, Energy Reports*, 2021, vol. 7, pp. 997–1015.
14. Allaev K., Makhmudov T. Research of small oscillations of electrical power systems using the technology of embedding systems, *Electrical Engineering*, 2020, vol. 102, pp. 309–319 (in Russian).
15. Avezova N. R., Avezov R. R., Samiev K. A. et al. Comparative Heating Performance and Engineering Economic Indicators of the "Trombe Wall" System in Different Climate Zones of Uzbekistan, *Applied Solar Energy*, 2021, vol. 57, pp. 128–134.
16. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 System and software engineering — System life cycle processes.
17. Kulikov G. G., Rizvanov K. A., Petrov Yu. E. A systematic approach to building the structure of an organizational-functional model of digital modeling of production processes, *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technology, control, radio electronics*, 2018, no. 2, pp. 60–70 (in Russian).
18. Kulikov G. G., Antonov V. V., Fakhullina A. R., Rodionova L. E. Formal model of the processes of interaction between components of software systems based on the fractal approach, *Electrotechnical and information complexes and systems*, 2018, no. 4, pp. 48–69 (in Russian).
19. Kulikov G. G., Antonov V. V., Antonov D. V. Theoretical and applied aspects of building models of information systems, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 134 p.
20. Kulikov G. G., Antonov V. V., Rodionova L. E., Fakhullina A. R., Kromina L. A. Architecture of the intelligent software-analytical complex for operating big in a subject-oriented area (for example in the power engineering), *Proceedings of 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: ICOECS 2020*, 2020, pp. 1–6.
21. Disclosure of information in accordance with the Standards for Disclosure of Information by the Entities of the Wholesale and Retail Electricity Markets, approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 24 dated January 21, 2004, available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102085036>
22. Sevek V. K., Saganool K. B., Manchyk-Sat C. S., Mon-gushovna S. R. Composition and classification of electricity losses during transmission, *Bulletin of the Tuva State University. Technical and physical and mathematical sciences*, 2014, no. 3, pp. 124–130 (in Russian).