

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.05

УДК 621.3

**А.С. Семенов, А.Б. Петроченков,
В.И. Южаков, С.Д. Иванов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В настоящее время нефтедобывающие предприятия ищут способы снижения себестоимости добываемой продукции, в том числе за счет повышения энергетической эффективности при потреблении и распределении электроэнергии. Данный вопрос является актуальным и требует рационального решения. Для этого необходимо изучить процессы потребления и распределения электроэнергии в электротехнических комплексах нефтедобывающих предприятий. Изучение предмета исследования может осуществляться с применением средств моделирования не только для реально существующих систем, но и с позиции оценки возможных событий при изменении режима работы электрооборудования. Моделирование потребления и распределения электрической энергии нефтедобывающего предприятия является неотъемлемой частью изучения системы в различных технологических режимах работы для оценки энергетической эффективности процесса добычи нефти. **Цель:** разработать модель процесса потребления и распределения электрической энергии в рамках электротехнического комплекса нефтяного месторождения имени В.П. Сухарева. Применяемым **методом** является математическое моделирование с использованием программного обеспечения LabVIEW. **Результаты:** создана цифровая модель потребления и распределения электроэнергии в рамках электротехнического комплекса месторождения имени В.П. Сухарева с помощью программного обеспечения LabVIEW. Модель представляет результат электропотребления на границе балансовой принадлежности, потребления активной и реактивной мощности каждой трансформаторной подстанции, установленной на месторождении, активных и реактивных потерь на каждой линии электропередачи, связывающих все подстанции. **Практическая значимость:** разработанная модель позволит наглядно произвести оценку потребления и распределения электрической энергии нефтедобывающего предприятия, найти проблемные участки с нерациональным расходом, поскольку параметры выводятся в одном текстовом окне, и имеется возможность записи этих данных в один текстовый документ. В дальнейшем при оптимизации реальной системы можно беспрепятственно осуществить анализ и прогноз, в режиме реального времени скорректировать слабые области структуры.

Ключевые слова: моделирование, электрическая энергия, электротехнический комплекс, нефтедобывающее предприятие, модель, программный комплекс.

A.S. Semenov, A.B. Petrochenkov,

V.I. Yuzhakov, S.D. Ivanov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MODELING OF POWER CONSUMPTION AND DISTRIBUTION PROCESSES IN THE ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEX OF AN OIL PRODUCTION ENTERPRISE

Currently, oil-producing enterprises are seeking ways to reduce the cost of extracted products, including through increased energy efficiency in electricity consumption and distribution. This issue is relevant and requires a rational solution. To achieve this, it is necessary to study the processes of electricity consumption and distribution in the electrical complexes of oil-producing enterprises. Additionally, modeling electricity consumption and distribution at oil-producing facilities is an integral part of assessing the energy efficiency of the oil extraction process. **Objective:** to develop a model of the process of consumption and distribution of electric energy of the electrical complex of the V.P. Sukharev oil field. The **method** used is mathematical modeling using *LabVIEW* software. **Results:** a digital model of electricity consumption and distribution has been created within the framework of the electrical complex of the V.P. Sukharev field using *LabVIEW* software. The model represents the result of power consumption at the boundary of the balance sheet. It also represents the consumption of active and reactive power of each transformer substation installed at the field, active and reactive losses on each power transmission line that connect all substations. **Practical significance:** The developed model allows you to visually assess the consumption and distribution of electric energy of an oil-producing enterprise, find problem areas with irrational consumption. The parameters are displayed in one text window, and it is possible to record these data in one text document. In the future, when optimizing a real system, it is possible to carry out analysis and forecast without hindrance, and correct weak areas of the structure in real time.

Keywords: modeling, electrical energy, electrical engineering complex, oil producing enterprise, model, software system.

Введение

Существует множество методов моделирования электроэнергетических систем: аналитические, численные и имитационные [1, 2]. У аналитических методов вследствие сложности большинства реальных систем законченное математическое описание либо не существует, либо при выводе формул, на которых основываются данные методы, принимается большое количество допущений, которые не всегда соответствуют реальной системе. По данным причинам в ряде случаев от применения аналитических методов приходится отказываться [3, 4]. Численные методы не всегда применимы для описания комплексных систем, состоящих из множества объектов [5]. Особенностью численных методов является описание процесса или системой уравнений, или

многофакторной функциональной зависимостью, на выходе которой получается результат с установленной точностью. По этим причинам применение имитационных методов, основанных на создании компьютерной, цифровой модели, является рациональным способом изучения процессов потребления и распределения электроэнергии (ЭЭ) [6, 7]. Данные модели электроэнергетической системы можно выполнить в различных программных обеспечениях (ПО), например: *RastrWin*, *SimInTech*, *LabVIEW* и *MatLab*. Использование ПО значительно упрощает операцию моделирования и анализ системы [8].

Процесс разработки модели в ПО *LabVIEW* нагляден, так как используется графический язык программирования «G» [11]. Однако ключевым преимуществом является наличие возможности создания собственных моделей каждого элемента электротехнического комплекса (ЭТК) по собственному математическому описанию. Данная возможность позволяет создать модель расчета потребления и распределения ЭЭ в установленном режиме с учетом внесения изменений в технологический процесс нефтедобывающего предприятия (НДП).

В сравнении с *MatLab* у *LabVIEW* есть преимущество в виде скорости расчета, а также возможности интеграции разработанной модели непосредственно в производственный процесс путем подключения данных из информационной среды или датчиков, что позволяет реализовать SCADA-систему предприятия. В таком случае скорость выполнения математических операций является определяющим фактором. В вопросах моделирования процессов потребления и распределения ЭЭ лучшим и апробированным ПО является *RastrWin*. Однако *RastrWin* выполняет расчет по указаниям мощностей потребителей по заранее рассчитанным и введенным параметрам электрооборудования, но основным недостатком является невозможность реализовать расчет электропотребления в зависимости от технологического режима добычи нефти. А потому выбор *LabVIEW* в качестве ПО для создания модели потребления и распределения ЭЭ в ЭТК НДП является обоснованным при условии, что необходимо выполнить расчет электропотребления скважин в заданном режиме работы [12–14].

На основе вышеперечисленных факторов моделирование процессов потребления и распределения ЭЭ в рамках ЭТК НДП будет производиться в ПО *LabVIEW*.

Разработка моделей элементов электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия

Исходя из сформулированной цели, требуется создать имитационную модель всего ЭТК НДП. В состав ЭТК НДП входят комплектные трансформаторные подстанции (КТП) и линии электропередачи (ЛЭП). К секциям шин низкого напряжения КТП подключаются статические нагрузки (СН) и установки электроприводного центробежного насоса (УЭЦН). УЭЦН является составным элементом, состоящим из станции управления (СУ), трансформатора, ЛЭП, погружного электродвигателя (ПЭД) в механической связи с электроприводным центробежным насосом (ЭЦН).

При моделировании всего ЭТК НДП необходимо создать простые, неделимые элементы, которыми являются: трансформатор, ЛЭП, СУ, статическая электрическая нагрузка, ПЭД в механической связи с ЭЦН. Из неделимых элементов создаются составные модели КТП, впоследствии объединяющиеся в общую модель ЭТК НДП.

Для создания перечисленных элементов ЭТК НДП в ПО LabVIEW используются следующие встроенные функции: «Path»; «Read Delimited Spreadsheet»; «Index Array»; «Formula Node»; «Numeric Controls and Indicators»; «Feedback Node»; «Select Function»; «Not A Number/Path/Refnum? Function». В ПО LabVIEW модели обозначаются как виртуальный инструмент (ВИ), математический аппарат которой задается блок-схемой из перечисленных функций, опираясь на которые в будущем будут формироваться более сложные узлы ЭТК [15].

Моделирование в ПО LabVIEW осуществляется с помощью объектно-ориентированного подхода, суть которого заключается в использовании понятий «класс», «свойство» и «метод». Классами моделей являются конечные элементы; свойствами служат исходные данные, которые используются при вычислениях; методы представляют собой расчетные величины, которые передаются в следующий класс для выполнения дальнейших расчетов.

Свойства класса «Станция управления»:

- активная мощность на выводе станции управления (P);
- реактивная мощность на выводе станции управления (Q);
- напряжение на зажимах ввода станции управления (U_{vnfact});
- коэффициент полезного действия станции управления (KPD);

– фактическая частота питающего напряжения после станции управления (f_2).

Методы класса «Станция управления»:

– передача информации о фактической частоте питающего напряжения на нижестоящие элементы (f_2);

– фактическая величина активной мощности на вводе станции управления (P_{cs});

– фактическая величина реактивной мощности на вводе станции управления (Q_{cs}).

Таким образом, математическое описание станции управления представляет собой множество, изображенное в выражении (1). Блок-схема класса «Станция управления» представлена на рис. 1.

$$CY = P; Q; Uvnfact; KPD; f_2 \quad (1)$$

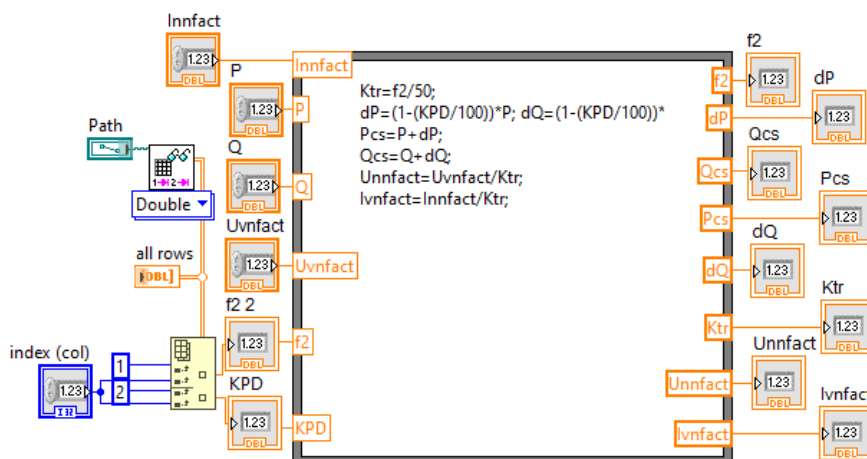


Рис. 1. Блок-схема класса «Станция управления»

Свойства класса «Трансформатор»:

– напряжение обмотки высокого напряжения трансформатора (Uvn);

– напряжение обмотки низкого напряжения трансформатора (Unn);

– номинальная мощность трансформатора (Sn);

– потери холостого хода трансформатора (dP_{xx});

– потери короткого замыкания трансформатора (dP_{kz});

– ток холостого хода трансформатора (I_{xp});

– напряжение короткого замыкания (U_{kz});

– частота питающего напряжения станции управления (f_2);

- активная проводимость (g);
- температура окружающей среды (Toc);
- дискрет устройства регулирования (D);
- ступень устройства регулирования напряжения (St);
- температура обмоток (Tob);
- температурный коэффициент процессов в трансформаторе (Tm);
- фактическое напряжение ($Uvnfact$).

Методы класса «Трансформатор»:

- потери активной мощности в трансформаторе (dP);
- потери реактивной мощности в трансформаторе (dQ);
- напряжение вторичной обмотки трансформатора ($Uunnfact$);
- вычисление тока первичной обмотки трансформатора (Ivn);
- вычисление номинального тока (In).

Таким образом, математическое описание трансформатора представляет собой множество, изображенное в выражении (2). Блок-схема класса «Трансформатор» представлена на рис. 2.

$$T = \left\{ \begin{array}{l} Uvn; Uunn; Sn; dPxx; dPkz; Ixsp; Ukz; f_2; g; Toc; \\ D; St; Tob; Tm; Uvnfact; dP; dQ; Uunnfact; Ivn; In \end{array} \right\}. \quad (2)$$

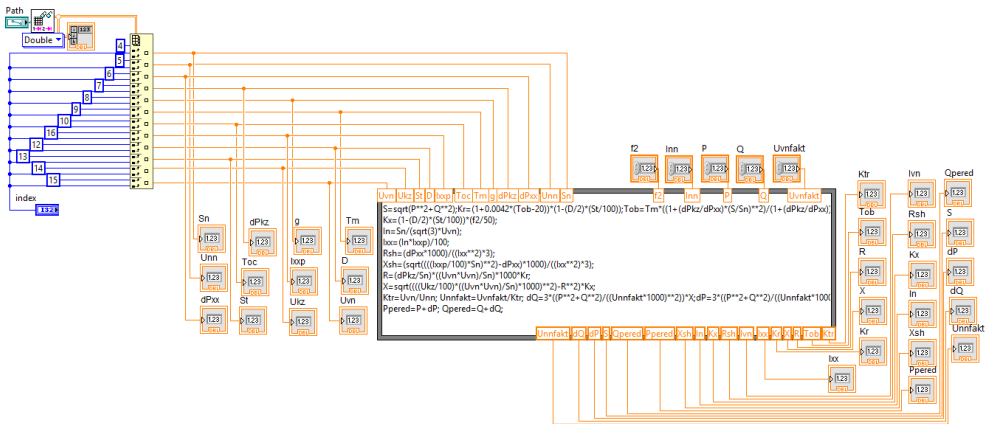


Рис. 2. Блок-схема класса «Трансформатор»

Свойства класса «Линия электропередачи»:

- ток нагрузки, протекающий через линию электропередачи (I);
- активная мощность нагрузки, подключенная к линии электропередачи (P);

- реактивная мощность нагрузки, подключенная к линии электропередачи (Q);
- частота питающего напряжения (f_2);
- напряжение вначале линии электропередачи (U);
- удельное активное сопротивление линии электропередачи (r_0);
- удельное индуктивное сопротивление линии электропередачи (x_0);
- длина линии электропередачи (L);
- допустимый длительный ток линии электропередачи (I_{dop});
- допустимая температура изоляции линии электропередачи (T_{id});
- удельная емкость линии электропередачи (C_0);
- удельное сопротивление изоляции линии электропередачи (R_{iz}).

Методы класса «Линия электропередачи»:

- активная мощность перед линией электропередачи с учетом потерь (P_{pered});
- реактивная мощность перед линией электропередачи с учетом потерь (Q_{pered});
- напряжение после линии электропередачи с учетом потери напряжения ($U_{poslepad}$).

Таким образом, математическое описание линии электропередачи представляет собой множество, изображенное в выражении (3). Блок-схема класса «Линия электропередачи» представлена на рис. 3.

$$Л = I; P; Q; f_2; U; r_0; x_0; L; I_{dop}; T_{id}; C_0; R_{iz} . \quad (3)$$

Свойства класса «ПЭД в механической связи с ЭЦН»:

- фактическое напряжение на зажимах двигателя (U_{fact});
- фактическая частота питающего напряжения после станции управления (f_2);
- максимальный напор ЭЦН (Q_{max});
- динамический уровень скважины (H_{din});
- номинальный ток ПЭД (I_{dvnom});
- номинальный коэффициент активной мощности ПЭД ($\cos \phi_n$);
- буферное давление скважины (P_{buf});
- дебит нефтяной жидкости скважины (Q_{jid});
- номинальная мощность ПЭД (P_{nom});
- коэффициенты полиномиальной зависимости КПД ЭЦН (k_1, \dots, k_6).

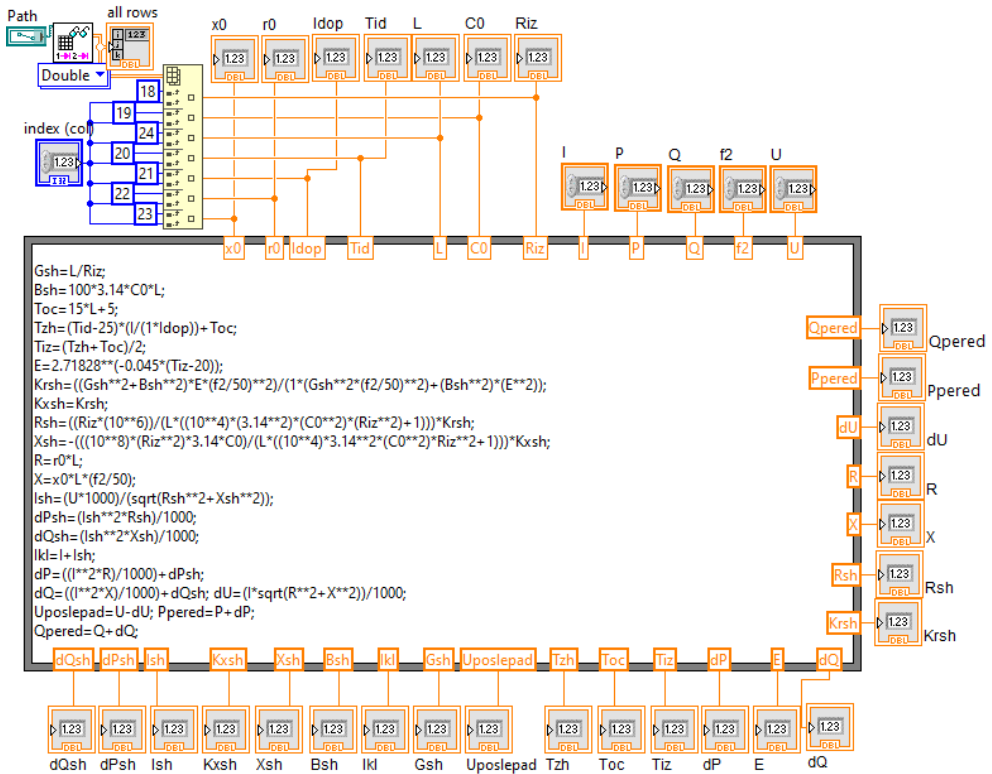


Рис. 3. Блок-схема класса «Линия электропередачи»

Методы класса «ПЭД в механической связи с ЭЦН»:

- фактическая потребляемая активная мощность двигателя (P_{dvf});
- фактическая потребляемая реактивная мощность двигателя (Q_{dvf});
- фактический ток двигателя (I_{dv}).

Таким образом, математическое описание статической электрической нагрузки представляет собой множество, изображенное в выражении (4).

Блок-схема класса «Статическая электрическая нагрузка» представлена на рис. 4.

$$\text{ПЭД} = \{U_{fakt}; f_2; Q_{max}; H_{din}; I_{dvnom}; \cos \varphi_n; P_{buf}; Q_{jid}; P_{nom}; k_1; \dots; k_6\}. \quad (4)$$

Свойства класса «Статическая электрическая нагрузка»:

- фактическое напряжение нагрузки (U_{fakt});
- активная мощность нагрузки (P);
- реактивная мощность нагрузки (Q).

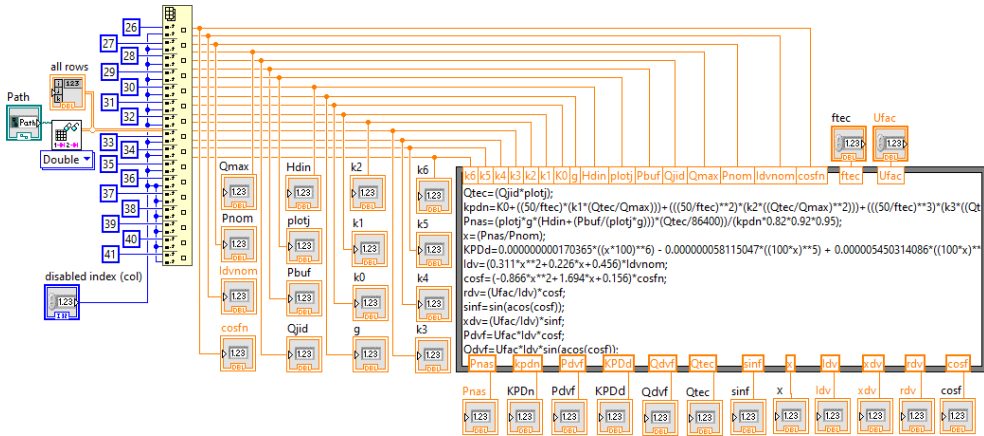


Рис. 4. Блок-схема класса «ПЭД в механической связи с ЭЦН»

Методы класса «Статическая электрическая нагрузка»:

- фактическая активная мощность с учетом потерь в линии до статической нагрузки (P_{pered});
- фактическая реактивная мощность с учетом потерь в линии до статической нагрузки (Q_{pered});
- фактический ток нагрузки (I).

Таким образом, математическое описание статической электрической нагрузки представляет собой множество, изображенное в выражении (5). Блок-схема класса «Статическая электрическая нагрузка» представлена на рис. 5.

$$CH = U_{fakt}; P; Q \quad (5)$$

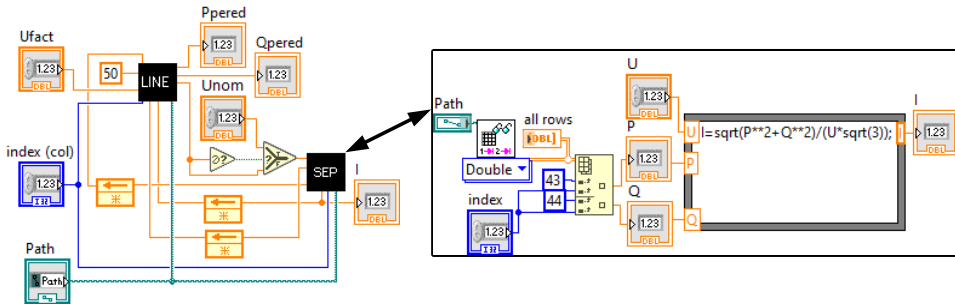


Рис. 5. Блок-схема класса «Статическая электрическая нагрузка»

Во все модели вводится массив значений, хранящийся в excel-файле, путь к которому указывается через элемент «Path» с помощью элемента «Read Delimited Spreadsheet». В блоке «Index Array» с ис-

пользованием констант указываются порядковые номера столбцов, в которых содержатся необходимые параметры для перечисленных блок-схем. Необходимые параметры определяются свойствами классов и перечнем номинальных параметров оборудования.

Моделирование составных элементов в ПО LabVIEW осуществляется посредством объединения описанных классов в новую ВИ по принципу вложенности. Например, ВИ «УЭЦН» будет состоять из класса «Станция управления», «Трансформатор», «Линия электропередачи», «ПЭД в механической связи с ЭЦН» [9]. Для наглядности отображения ВИ используются уникальные графические обозначения. На рис. 6 представлена блок-схема ВИ «УЭЦН», где блок «СУ» является ВИ класса «Станция управления»; блок «Т» является ВИ класса «Трансформатор»; блок «LINE» является ВИ класса «Линия электропередачи»; блок «М» является ВИ класса «ПЭД в механической связи с ЭЦН».

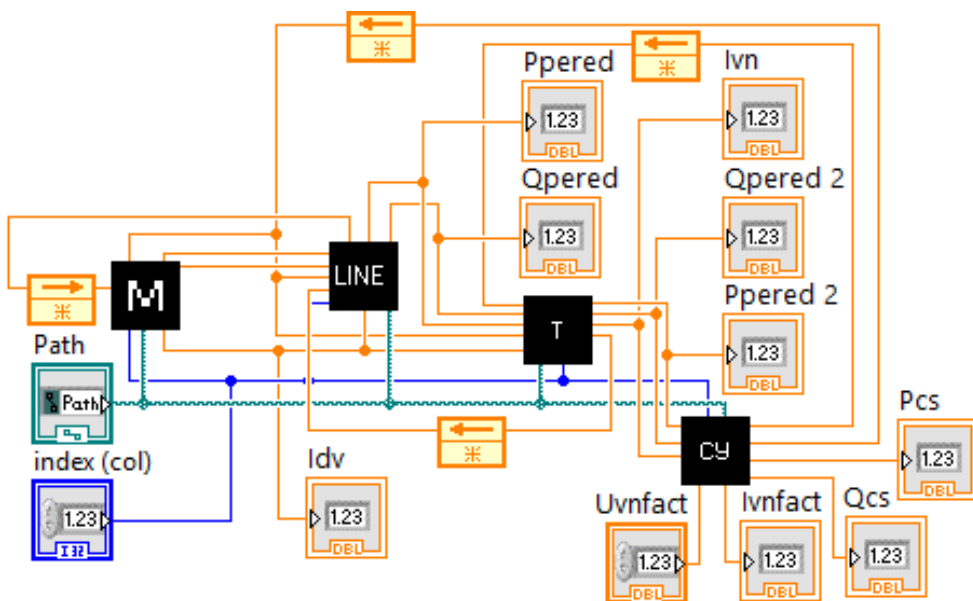


Рис. 6. Блок-схема ВИ «УЭЦН»

Аналогичным образом создается ВИ «Комплектная трансформаторная подстанция» (рис. 7). Особенностью создания моделей трансформаторных подстанций является необходимость разработки ВИ для каждой подстанции отдельно, что обусловлено разным количеством присоединений.

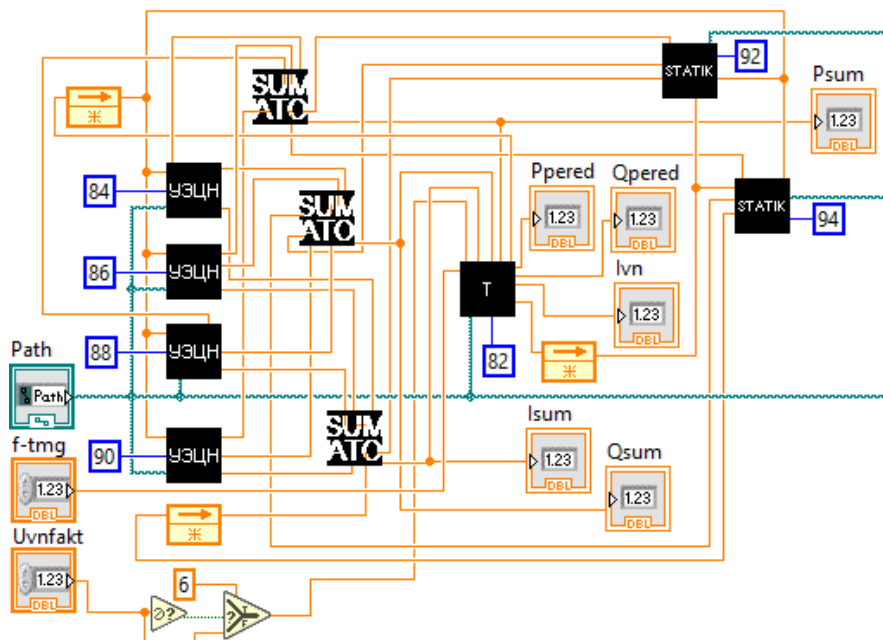


Рис. 7. Пример блок-схемы ВИ «Комплектная трансформаторная подстанция»

ВИ «Комплектная трансформаторная подстанция» составлена по принципу рекурсивного метода вычисления, когда расчет выполняется итеративно. Такой подход необходим для определения фактического напряжения на вводе в каждый класс модели. Первая итерация ($n = 1$) выполняется с номинальными параметрами напряжения на каждом элементе, последующие итерации ($n = n + 1$) будут учитывать величину падения напряжения на предыдущем элементе. Расчет выполняется до тех пор, пока результат вычисления текущей итерации не станет равным результату предыдущей итерации [10]. Таким образом, напряжение на любом элементе ЭТК НДП представляется в виде множества значений напряжений на разных итерациях:

$$U^{<i>} = U_1; \dots; U_n, \quad (6)$$

где $<i>$ – принадлежность массива для конкретного элемента; n – номер итерации.

Расчет прекращается, когда критерий сходимости стент меньше или равен 0,001:

$$|U_n - U_{n+1}| \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где ε – заданный порог сходимости.

Моделирование процесса потребления и распределения электроэнергии в электротехническом комплексе нефтедобывающего предприятия

Модель всего ЭТК НДП содержит в своем составе ВИ всех КТП, которые соединяются между собой ВИ ЛЭП. Расчет выполняется также итеративным методом.

Так как ВИ ЭТК НДП в ПО LabVIEW содержит большое количество элементов, итоговая модель представлена в виде структурной схемы, отражающей итеративность расчета (рис. 8).

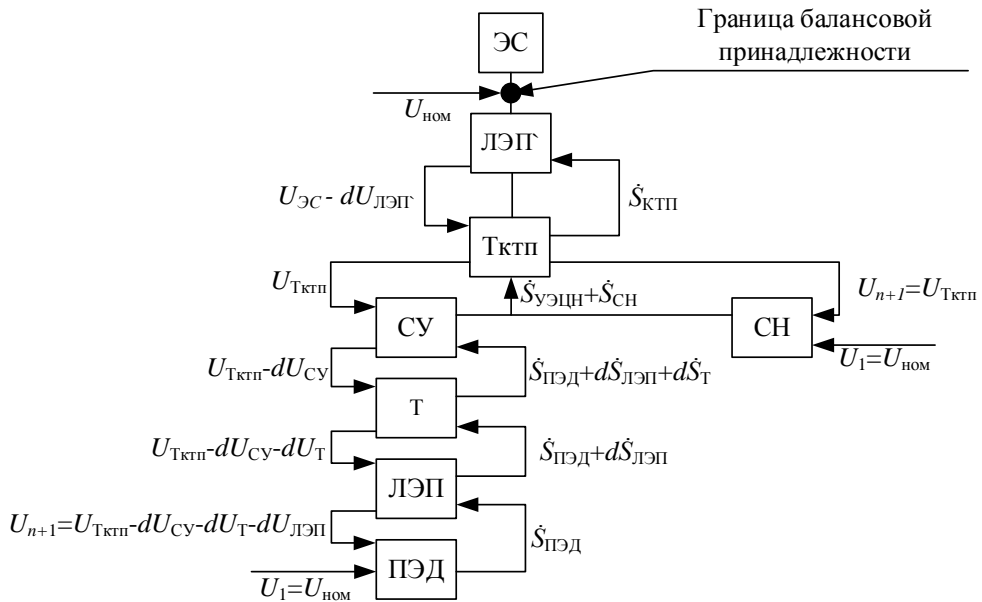


Рис. 8. Структурная схема итеративного расчета модели ЭТК НДП

Используемый для моделирования ПО LabVIEW позволяет создавать пользовательский интерфейс. При использовании стандартных элементов ПО LabVIEW «Number To Fractional String Function» (функция преобразования числа в дробную строку), «Concatenate Strings Function» (функция объединения строк) показатели потребления электрической мощности выводятся на пользовательском интерфейсе (рис. 9).

Произведено сравнение результатов расчета разработанной модели в ПО LabVIEW с моделью, созданной в ПО RastrWin [17–19]. Выбор ПО RastrWub основан на следующих факторах: расчет происходит

с большой точностью; математическое описание оборудования приближено к реальным параметрам [17]; ПО используют такие компании, как ПАО «ФСК ЕЭС», АО «СО ЕЭС», ООО «ЭСКО» и другие.

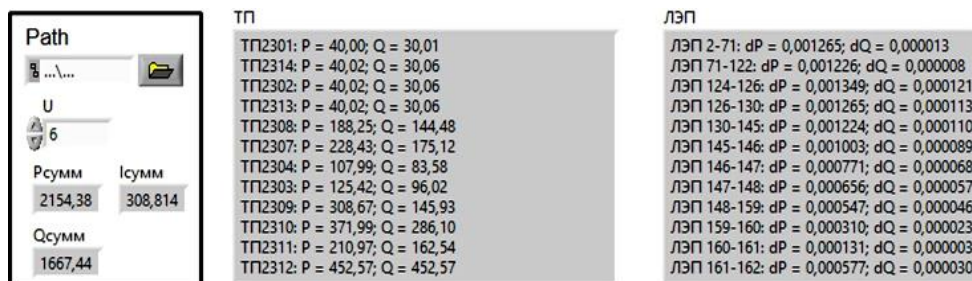


Рис. 9. Пользовательский интерфейс модели ЭТК НДП

Результатом сравнения является оценка адекватности разработанной модели в вопросе распределения электрических мощностей с допущением, что результат, полученный в ПО RastrWin, считается истинным. Для проверки выделены три удаленные КТП: № 2310, № 2311 и № 2312, мощность потребителей которых задана случайно.

Перечисленные КТП соединены ЛЭП № 159-160, № 160-161, № 161-162 соответственно. Номинальные параметры оборудования идентичны в сравниваемых моделях. Сравнение результатов моделирования представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение результатов моделирования в ПО RastrWin с созданной моделью в ПО LabVIEW

Параметр	RastrWin		LabVIEW		Отклонение, %	
	P, кВт	Q, квар	P, кВт	Q, квар	P	Q
Нагрузка КТП 2310	41,726	48,587	41,726	48,587	0,000	0,000
Нагрузка КТП 2311	40,759	48,527	40,759	48,527	0,000	0,000
Нагрузка КТП 2312	33,225	33,854	33,225	33,854	0,000	0,000
КТП 2310	41,880	49,100	42,240	49,230	0,860	0,265
КТП 2311	40,910	49,030	41,450	49,690	1,320	1,346
КТП 2312	33,320	34,170	34,520	34,520	3,601	1,024
ЛЭП159-160	0,043	0,025	0,044	0,025	1,523	1,659
ЛЭП160-161	0,018	0,010	0,019	0,010	3,681	1,000
ЛЭП161-162	0,004	0,002	0,004	0,002	3,000	3,321
$\sum P$	116,175	–	118,280	–	1,812	–
$\sum Q$	–	132,337	–	133,500	–	0,879

Произведено сравнение результатов расчета разработанной модели УЭЦН в ПО LabVIEW с результатами инструментальных замеров, на примере скважины № 111 месторождения им. Сухарева (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение электропотребления скважины при инструментальном замере с результатом моделирования

Параметры ГДС и установленное оборудование		Электропотребление, кВт·ч	
Трансформатор	ТМПН-160/1902	модель	скважина
Кабельная линия	КПБП 3×10, L=2105, м	275,5	268,7±2,69
Насос	ЭЦН-60		
СУ	Эталон-250		
Двигатель	ПЭД45-117-1400		
f_2 , Гц	46		
$Q_{нс}$, м ³ /сут	60		
$H_{дин}$, м	970		
$\rho_{ж}$, кг/м ³	838		
$P_{БУФ}$, МПа	6		

Относительная погрешность моделирования электропотребления УЭЦН составила 1,5–3,5 % с учетом погрешности измерительного прибора ±0,5 %.

Заключение

Произведен анализ методов моделирования электроэнергетической системы, по результатам которого был выбран имитационный метод на базе ПО LabVIEW. В данном ПО разработаны ВИ: СУ, ЛЭП, ПЭД в связи с ЭЦН, трансформатор, СН. На основе перечисленных ВИ создана модель ЭТК НДП.

Созданная модель ЭТК НДП имеет перспективы производственного внедрения, в частности, для оценки энергетической эффективности режима работы УЭЦН и анализа процессов потребления и распределения электроэнергии. Указанные способы применения могут использоваться для укрепления энергетической политики предприятия. Разработанные ВИ могут использоваться для создания ЭТК любых месторождений, что повышает значимость разработанной модели для НДП.

Перспективой дальнейшего исследования является совершенствование разработанной модели посредством интеграции аппарата задания оптимального режима работы ЭТК, способа сопоставления

балансов мощностей в сети электроснабжения НДП [21, 22] и формировании отчетов с рекомендациями, направленными на повышение энергетической эффективности.

Библиографический список

1. Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента: учеб. пособие / Н.Ц. Гатапова, А.Н. Колиух, Н.В. Орлова, А.Ю. Орлов. – Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2014. – 77 с.

2. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебник для вузов / В.А. Веников, Г.В. Веников. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.

3. Гизатуллин, Ф.А. Анализ энергоэффективности электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия / Ф.А. Гизатуллин, М.И. Хакимьянов // Вестник Уфим. гос. авиацион. техн. ун-та. Электротехника. Производство, преобразование, передача, распределение и регулирование электроэнергии. – 2017. – Т. 21, № 3 (77). – С. 54–59.

4. Семенов, А.С. Повышение энергетической эффективности электротехнического комплекса нефтедобывающего предприятия / А.С. Семенов, С.В. Мишуринских, А.Б. Петроченков // Электротехника. – 2023. – № 11. – С. 29–37.

5. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.

6. Колесов, Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: учеб. пособие / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 224 с.

7. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учебник для академического бакалавриата / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 7-е изд. – М.: Юрайт, 2021. – 343 с. (Бакалавр. Академический курс).

8. Мороз, Д.Р. Моделирование потребления электроэнергии промышленными предприятиями с неоднозначной взаимосвязью между электропотреблением и отчетным выпуском продукции / Д.Р. Мороз, Е.Л. Шенец // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2007. – № 6. – С. 20–31.

9. Мишуринских, С.В. Методические рекомендации по оценке реактивной мощности, потребляемой погружным асинхронным электродвигателем.

тродвигателем / С.В. Мишуриных, А.Б. Петроченков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 38. – С. 175–194. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.2.09

10. Использование матрично-топологического метода для расчета потребления электрической энергии по заранее сформированному набору данных / А.С. Семенов, А.Г. Лейсле, А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 35. – С. 184–201. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.12

11. LabVIEW Features and Applications: National Instruments Corp. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ni.com/en/shop/LabVIEW.html> (дата обращения: 14.05.2024).

12. Matrix-topological calculation of consumption and distribution of electric energy in the electric power system using a filtered dataset / A.S. Semenov, A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin, A.G. Leysle // 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia. – 2020. – P. 5–10.

13. Modeling power-supply systems with gas-turbine units as energy sources / A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin, D.Y. Leizgold, A.S. Semenov // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 91, № 11. – P. 673–680.

14. Pavlov, N.V. Multiagent approach for modeling power-supply systems with microgrid / N.V. Pavlov, A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin // Russian Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 92, № 11. – P. 637–643.

15. Железнов, И.Г. Сложные технические системы (оценка характеристик): учеб. пособие для технических вузов / И.Г. Железнов. – М.: Высшая школа, 1984. – 119 с.

16. Методические материалы. Рекурсивные функции и алгоритмы: ЭТИ (филиал) СГТУ им. Ю.А. Гагарина [Электронный ресурс]. – URL: <http://techn.sstu.ru/kafedri/подразделения/1/MetMat/shaturn/theoralg/8.html> (дата обращения: 13.05.2024).

17. Программные комплексы RastrWin: Екатеринбургский фонд «Фонд им. Д.А. Арзамасцева» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rastrwin.ru/index.php> (дата обращения: 11.05.2024).

18. Об оценке электропотребления погружного электрооборудования на физической модели / А.В. Ляхомский, А.Б. Петроченков, Е.Н. Перфильева, А.В. Ромодин, С.В. Мишуриных // *Промышленная энергетика*. – 2020. – № 8. – С. 26–33.

19. Ромодин, А.В. Оценка эффективности энергосберегающих мероприятий на предприятиях нефтегазодобывающей отрасли / А.В. Ромодин, А.В. Кухарчук, С.В. Мишуриных // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 11, ч. 3. – С. 593–598.

20. МИ 1317-2004. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров. – М.: ВНИИМС, 2004. – 50 с.

21. Павлов, Н.В. Разработка мультиагентной системы управления электрическими режимами электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с распределенной генерацией / Н.В. Павлов, А.Б. Петроченков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2022. – № 42. – С. 151–177. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.08

22. Павлов, Н.В. Обеспечение баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, использующими попутный нефтяной газ / Н.В. Павлов, А.Б. Петроченков, Н.Л. Бачев // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2023. – № 46. – С. 108–132. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.2.05

References

1. Gatapova N.Ts., Koliukh A.N., Orlova N.V., Orlov A.Iu. *Osnovy teorii i tekhniki fizicheskogo modelirovaniia i eksperimenta* [Fundamentals of theory and techniques of physical modeling and experiment]. Tambov: Tambovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2014, 77 p.

2. Venikov V.A., Venikov G.V. *Teoriia podobiia i modelirovaniia (primeritel'no k zadacham elektroenergetiki)* [The theory of similarity and modeling (in relation to the tasks of the electric power industry)]. 3rd ed. Moscow: Vysshiaia shkola, 1984, 439 p.

3. Gizatullin F.A., Khakim'ianov M.I. Analiz energoeffektivnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa neftegazodobyvaiushchego predpriiatiia [Analysis of the energy efficiency of the electrical complex of an oil and gas producing enterprise]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika. Proizvodstvo, preobrazovanie, peredacha, raspredelenie i regulirovanie elektroenergii*, 2017, vol. 21, no. 3 (77), pp. 54-59.

4. Semenov A.S., Mishurinskikh S.V., Petrochenkov A.B. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti elektrotekhnicheskogo kompleksa neftedobyvaiushchego predpriiatiia [Improving the energy efficiency of the electrical complex of an oil-producing enterprise]. *Elektrotehnika*, 2023, no. 11, pp. 29-37.

5. Samarskii A.A., Mikhailov A.P. Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery [Mathematical Modeling: Ideas. Methods. Examples]. 2nd ed. Moscow: Fizmatlit, 2001, 320 p.

6. Kolesov Iu.B., Senichenkov Iu.B. Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy [Modeling of systems. Dynamic and hybrid systems]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2012, 224 p.

7. Sovetov B.Ia., Iakovlev S.A. Modelirovanie sistem: uchebnik dlia akademicheskogo bakalavriata [System Modeling: Textbook for Academic Undergraduate studies]. 7nd ed. Moscow: Iurait, 2021, 343 p. (Bakalavr. Akademicheskii kurs).

8. Moroz D.R., Shenets E.L. Modelirovanie potrebleniia elektroenergii promyshlennymi predpriiatiami s neodnoznachnoi vzaimosviaziu mezhdu elektropotrebeniem i otchetnym vypuskom produktsii [Modeling of electricity consumption by industrial enterprises with an ambiguous relationship between electricity consumption and reported output]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG. Energetika*, 2007, no. 6, pp. 20-31.

9. Mishurinskikh S.V., Petrochenkov A.B. Metodicheskie rekomendatsii po otsenke reaktivnoi moshchnosti, potrebliaemoi pogrurnym asinkhronnym elektrodvigatelem [Methodological recommendations for evaluating the reactive power consumed by a submersible asynchronous electric motor]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2021, no. 38, pp. 175-194. DOI: 10.15593/2224-9397/2021.2.09

10. Semenov A.S., Leisle A.G., Petrochenkov A.B., Romodin A.V. Ispol'zovanie matrichno-topologicheskogo metoda dlia rascheta potrebleniia elektricheskoi energii po zaranee sformirovannomu naboru dannykh [Using the matrix-topological method to calculate the consumption of electrical energy from a pre-formed data set]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2020, no. 35, pp. 184-201. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.12

11. LabVIEW Features and Applications: National Instruments Corporation, available at: <https://www.ni.com/en/shop/LabVIEW.html> (accessed 14 May 2024).

12. Semenov A.S., Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Leysle A.G. Matrix-topological calculation of consumption and distribution of electric energy in the electric power system using a filtered dataset. *2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latviya*, 2020, pp. 5-10.

13. Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Leizgold D.Y., Semenov A.S. Modeling power-supply systems with gas-turbine units as energy sources. *Russian Electrical Engineering*, 2020, vol. 91, no. 11, pp. 673-680.

14. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B., Romodin A.V. Multiagent approach for modeling power-supply systems with microgrid. *Russian Electrical Engineering*, 2021, vol. 92, no. 11, pp. 637-643.

15. Zheleznov I.G. Slozhnye tekhnicheskie sistemy (otsenka kharakteristik) [Complex technical systems (performance assessment)]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1984, 119 p.

16. Metodicheskie materialy. Rekursivnye funktsii i algoritmy: Engel'sskii tekhnologicheskii institut (filial) Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni Iu.A. Gagarina [Methodological materials. Recursive functions and algorithms: Engels Institute of Technology (branch) Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin], available at: <http://techn.sstu.ru/kafedri/подразделения/1/MetMat/shaturn/theoralg/8.html> (accessed 13 May 2024).

17. Programmnye kompleksy RastrWin: Ekaterinburgskii fond "Fond imeni D.A. Arzamastseva" [RastrWin software packages: Yekaterinburg Foundation "D.A. Arzamastsev Foundation"], available at: <https://www.rastrwin.ru/index.php> (accessed 11 May 2024).

18. Liakhomskii A.V., Petrochenkov A.B., Perfil'eva E.N., Romodin A.V., Mishurinskikh S.V. Ob otsenke elektropotrebleniia pogruzhnogo elektrooborudovaniia na fizicheskoi modeli [On the assessment of the electrical consumption of submersible electrical equipment on a physical model]. *Promyshlennaia energetika*, 2020, no. 8, pp. 26-33.

19. Romodin A.V., Kukharchuk A.V., Mishurinskikh S.V. Otsenka effektivnosti energosberegaiushchikh meropriatii na predpriatiiakh neftegazodobyvaiushchei otrasli [Assessment of the effectiveness of energy-saving measures at enterprises of the oil and gas industry]. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 11, part 3, pp. 593-598.

20. MI 1317-2004. Gosudarstvennaia sistema obespecheniia edinstva izmerenii. Rezul'taty i kharakteristiki pogreshnosti izmerenii. Formy predstavleniia. Sposoby ispol'zovaniia pri ispytaniikh obraztsov produktsii i kontrole ikh parametrov [MI 1317-2004. The state system of ensuring the uniformity of measurements. The results and characteristics of the measurement error. Forms of representation. Methods of use in testing product samples and control of their parameters]. Moscow: VNIIMS, 2004, 50 p.

21. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B. Razrabotka mul'tiagentnoi sistemy upravleniia elektricheskimi rezhimami elektrotekhnicheskogo kompleksa neftegazodobyvaiushchego predpriatiia s raspredelennoi generatsiei [Development of a multi-agent control system for electrical modes of an electrical complex of an oil and gas producing enterprise with distributed generation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2022, no. 42, pp. 151-177. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.2.08

22. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B., Bachev N.L. Obespechenie balansa moshchnosti v elektricheskoi seti neftegazodobyvaiushchego predpriatiia s ob'ektami raspredelennoi generatsii, ispol'zuiushchimi poputnyi neftianoi gaz [Ensuring the balance of power in the electric network of an oil and gas producing enterprise with distributed generation facilities using associated petroleum gas]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2023, no. 46, pp. 108-132. DOI: 10.15593/2224-9397/2023.2.05

Сведения об авторах

Семенов Александр Сергеевич (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ASSEMENOV@pstu.ru).

Петроченков Антон Борисович (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: petrochenkov@pstu.ru).

Южаков Виктор Иванович (Пермь, Российская Федерация) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: naviu@mail.ru).

Иванов Станислав Дмитриевич (Пермь, Российская Федерация) – магистрант кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Sdivanov003@mail.ru).

About the authors

Alexander S. Semenov (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of the Department «Microprocessor Units of Automation» Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ASSEMENOV@pstu.ru).

Anton B. Petrochenkov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department «Microprocessor Units of Automation» Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: petrochenkov@pstu.ru).

Victor I. Yuzhakov (Perm, Russian Federation) – Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: naviu@mail.ru).

Stanislav D. Ivanov (Perm, Russian Federation) – master's degree student of the Department «Microprocessor Units of Automation» Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: Sdivanov003@mail.ru).

Поступила: 12.05.2024. Одобрена: 22.05.2024. Принята к публикации: 08.07.2024.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Моделирование процессов потребления и распределения электроэнергии в электротехническом комплексе нефтедобывающего предприятия / А.С. Семенов, А.Б. Петроченков, В.И. Южаков, С.Д. Иванов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 82–103. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.05

Please cite this article in English as:

Seменов A.S., Petrochenkov A.B., Yuzhakov V.I., Ivanov S.D. Modeling of power consumption and distribution processes in the electrical engineering complex of an oil production enterprise. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 50, pp. 82-103. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.05