

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.12

УДК 621.311:537.31:004.432.2

А.С. Семенов¹, А.Г. Лейсле², А.Б. Петроченков¹, А.В. Ромодин¹¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия²ООО «Трансресурс», Пермь, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТРИЧНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ЗАРАНЕЕ СФОРМИРОВАННОМУ НАБОРУ ДАННЫХ

Вопросы рационального использования, контроля и сбережения энергоресурсов рассматриваются в качестве актуальных как в текущий момент времени, так и в долгосрочной перспективе. Комплексное решение задач снижения энергетических затрат и повышения энергетической эффективности предполагает грамотную энергетическую политику предприятий за счет построения и развития систем энергетического менеджмента. Основу таких систем составляют механизмы сбора, обработки и анализа данных, полученных с использованием различных информационно-аналитических решений, средств мониторинга и контроля, позволяющих определять ключевые показатели, которые характеризуют эффективность производственной деятельности. Наличие большого числа факторов, связанных с изменением параметров электроэнергетической системы, обуславливает необходимость применения для оценки и прогнозирования таких показателей методов математического моделирования электропотребления. **Цель исследования:** разработка методики расчета потребления и распределения электроэнергии на основе матрично-топологического метода в системе электроснабжения месторождений нефти с использованием информации, поступающей из существующих систем мониторинга. **Методы:** линеаризация данных во временном ряду для фильтрации исходного массива информации. Отфильтрованные массивы информации используются в качестве основы объединённого набора данных для матрично-топологического расчета. **Результаты:** разработаны методика и алгоритм матрично-топологического расчета электропотребления объектов нефтедобычи, которые позволяют сформировать исходный набор аналитических данных при использовании минимального количества информации, поступающей с систем мониторинга в процессе нефтедобычи, создать единый *dataset* системы электроснабжения предприятия с применением математические модели ее отдельных элементов, а также провести по сформированному *dataset* расчет распределения (потребления) электрической энергии в рамках всего месторождения с использованием матрично-топологического метода. На базе предлагаемой методики матрично-топологического расчета произведена оценка потребления электроэнергии на примере месторождения имени Сухарева предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». **Практическая значимость:** разработанная методика может быть использована для моделирования различных производственных ситуаций, формирования балансовых заявок, упрощения процесса подбора оборудования или принятия решений.

Ключевые слова: матрично-топологический метод, системный расчет, потребление электрической энергии, обработка наборов данных.

A.S. Semenov¹, A.G. Leisle², A.B. Petrochenkov¹, A.V. Romodin¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

USE OF MATRIX-TOPOLOGICAL METHOD TO CALCULATE ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION FROM A PREVIOUSLY FORMATED DATA SET

The issues of rational use, control and saving of energy resources are considered as relevant both at the current moment of time and in the long term. A comprehensive solution to the problems of reducing energy costs and increasing energy efficiency presupposes a competent enterprises energy policy through the construction and development of energy management systems. The basis of such systems is made up of mechanisms for collecting, processing and analyzing data obtained using various information and analytical solutions, monitoring and control means that allow determining key indicators that characterize the production activities efficiency. The presence of a large number of factors associated with a change in the parameters of the electric power system necessitates the use of mathematical modeling methods of power consumption to assess and predict such indicators.

Purpose: development of a methodology for calculating the consumption and distribution of electricity based on the matrix-topological method in the power supply system of oil fields using information from existing monitoring systems. **Methods:** linearization of data in a time series to filter the original array of information. Filtered arrays of information are used as the basis for a combined dataset for matrix-topological calculations. **Results:** a method and an algorithm for matrix-topological calculation of power consumption of oil production facilities was developed. The method allows to form an initial set of analytical data using a minimum amount of information coming from monitoring systems in the process of oil production, to create a single dataset of an enterprise power supply system using mathematical models of its individual elements, and also to carry out, according to the generated dataset, the calculation of the distribution (consumption) of electrical energy within the entire field using the matrix-topological method. On the basis of the proposed method of matrix-topological calculation, an assessment of electricity consumption was made using the example of the Sukharev field of the company LLC LUKOIL-PERM. **Practical relevance:** the developed methodology can be used to simulate various production situations, form balance orders, simplify the process of selecting equipment or making decisions.

Keywords: Matrix-topological method, system calculation, of electrical energy consumption, processing of data sets.

Введение. На данный момент отечественные предприятия являются подготовленными к внедрениям решений, обеспечивающих комплексное решение проблем обеспечения толерантности электроэнергетических систем на основе информационно-аналитических сред принятия решений, имеющих связь с автоматизированными системами оперативного диспетчерского управления и противоаварийной автоматики различного уровня иерархии, до сих пор работавшими автономно [1, 2]. Полученная информация с таких систем способствует грамотному распределению имеющихся мощностей, регулированию режимности работы, определению ключевых показателей, которые характеризуют эффективность производственной деятельности

[3]. Концепция сбора информации на производственных объектах, совмещенная со схемой замещения системы электроснабжения, представлена на рис. 1.

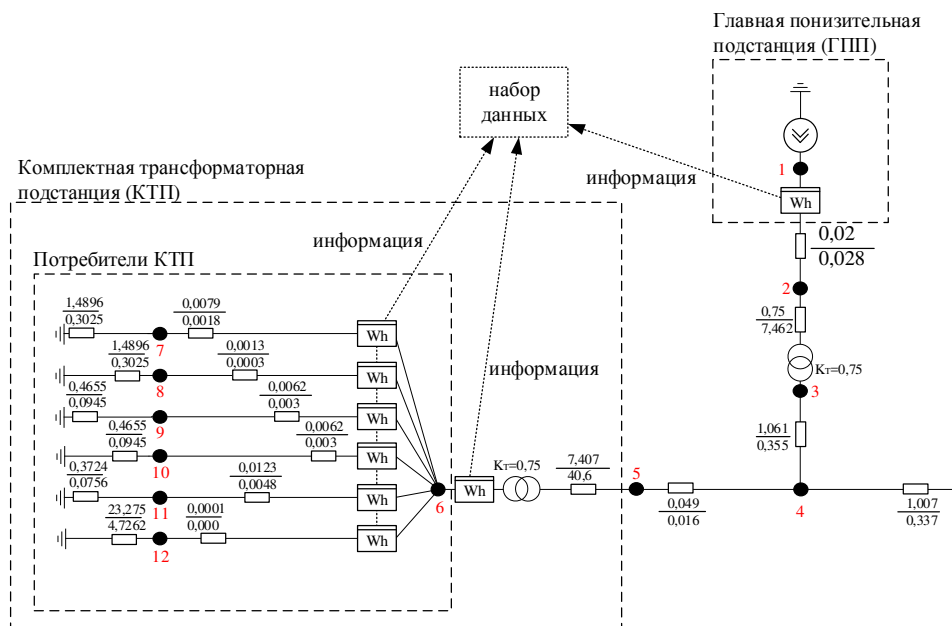


Рис. 1. Фрагмент схемы замещения системы электроснабжения месторождения им. Сухарева (Пермский край) (совместно с системой мониторинга)

Таким образом, большую часть статистических и логистических задач можно успешно выполнить путем обработки данных, полученных с систем мониторинга [4]. Однако одни лишь системы мониторинга не могут дать возможности прогнозировать потребление энергоресурсов, обусловленное изменением параметров энергосистемы [5]. К таким параметрам могут относиться: установленное оборудование; схема, по которой осуществляется питание потребителей электрической энергии; режим работы производственных объектов [6]. Как правило, из-за высокой цены системы мониторинга устанавливаются лишь на ключевых или типовых объектах [6, 7], что не передает полной картины происходящих процессов на производстве. Для решения такой производственной задачи, как прогнозирование, необходимо математическое моделирование потребления и распределения электрической энергии [8]. Матрично-топологический метод расчета в таких условиях является оптимальным выбором для описания фактического потребле-

ния электроэнергии на всем месторождении. Используя способы математического расчета потребления и распределения электрической энергии на предприятии, появляется возможность предусмотреть различные варианты развития событий при вариации параметров системы электроснабжения, а также моделировать ситуации, связанные с заменой оборудования [2, 9].

Наборы данных, так называемые *dataset*, в первую очередь подразумевают под собой структурированную по определенным правилам информацию не только в виде таблиц. При формировании единого *dataset* системы электроснабжения недостаточно объединить собранную информацию с систем мониторинга в единый массив, необходимо задать взаимосвязи между элементами, с которых поставляются *data*-файлы. Однако системы мониторинга не устанавливаются абсолютно на всех элементах сети электроснабжения. Таким образом, *dataset* системы электроснабжения формируются не только путем объединения исходных *data*-файлов и установлением взаимосвязей между объектами, но и дополнением информацией об элементах, не оснащенных системами мониторинга, на основе создания недостающих *data*-файлов путем математического расчета.

Концепция объединения собранной информации в *dataset*.

Системы мониторинга, установленные для снятия параметров электропотребления как на отходящей линии от узла генерации [10], так и для контроля используемых энергоресурсов на производственных объектах, формируют огромный перечень *data*-файлов, которые впоследствии используются для создания *dataset* всей системы электроснабжения [11]. Концепт объединения информации с разных объектов системы электроснабжения в один *dataset* представлен на рис. 1.

Сформированный системой мониторинга набор данных представляет из себя временной ряд записываемых параметров. Поэтому при объединении массивов в один *dataset* необходимо определить конкретный момент времени, для которого впоследствии будет проводиться математическое моделирование.

В связи с тем, что изначально наборы данных между собой не связаны ничем, кроме временной отметки, необходимо установить связи между элементами энергосистемы, которые так же связывают и объекты, с которых снимали показания системы мониторинга. Связи устанавливаются путем нумерации узлов начала и конца ветви на схе-

ме замещения. Ветви на схеме замещения также нумеруются и обозначают конкретные участки системы электроснабжения, характеризующиеся активным и индуктивным сопротивлениями объекта. Как видно из схемы замещения, представленной на рис. 1, нумерация начинается с нулевого узла и обозначается знаком заземления; числа, обозначенные через дробь, представляют активное и индуктивное сопротивление ветви, сверху вниз соответственно.

Метод фильтрации данных. В случае, когда необходимо получить результаты расчета в определенном интервале времени, т.е. во временном ряду, массивы данных должны формироваться для каждой временной отметки [12]. Однако в процессе мониторинга отчетные файлы замеров могут быть заполнены частично неверной информацией, как это продемонстрировано на рис. 2. На изображении представлена часть массива данных замеров для погружного электродвигателя, на котором видно, что имеются явно неверные значения замеров, выбивающиеся из общей массы. Для дальнейшего математического моделирования необходимо отфильтровать исходный массив данных. Для этого можно использовать *MS Excel* и фильтровать данные в ручном формате. Кроме того, для этих целей применяют языки программирования с предназначенными для этого библиотеками или любые различные способы, которые позволят автоматизированно выполнять процесс фильтрации.

```

Временная отметка
I, A
U, V
Cosp
14.10.2016 13:49; 407; 0,88; 28; 5,3; 33; 7; 8; 8
00.01.1900 0:00:0:0:0:0:0:0:0:0:0
14.10.2016 13:54; 8; 407; 0,6; 26; 6,1; 32; 8; 8; 8
14.10.2016 17:05; 8; 407; 0,82; 28; 5,3; 22; 8; 8; 8
19.10.2016 14:58; 8; 396; 0,6; 27; 6,7; 24; 8; 9; 9
03.10.2016 17:37; 9; 401; 0,59; 23; 5,9; 33; 9; 9; 8
06.10.2016 15:15; 9; 401; 0,6; 28; 6,3; 23; 9; 9; 8
14.10.2016 13:49; 12; 6; 0,49; 26; 34; 6; 34; 12; 15; 13
16.10.2016 9:43; 13; 406; 0,59; 36; 40; 23; 13; 14; 14
16.10.2016 9:48; 13; 404; 0,58; 35; 40; 23; 13; 14; 14
00.01.1900 0:00:0:0:0:0:0:0:0:0:0
03.10.2016 14:58; 14; 402; 0,62; 35; 37,8; 41; 14; 14; 14
    
```

Рис. 2. Вид неотфильтрованного массива данных

Если представить неотфильтрованный массив данных в виде графика, как это показано на рис. 3, можно выделить линейную зависимость распределения параметров во временном ряду.



Рис. 3. Временной ряд замеров напряжения на отходящей линии с секции шин комплектной трансформаторной подстанции для питания нефтедобывающей скважины

Как видно из рис. 3, имеются значения, которые резко выбиваются из общей массы и являются грубыми ошибками, от которых требуется избавиться [13]. В данном случае значения, выходящие за рамки допустимого отклонения в 5 % от линейной зависимости, исключаются из временного ряда. Результаты такого способа фильтрации данных представлены на рис. 4.

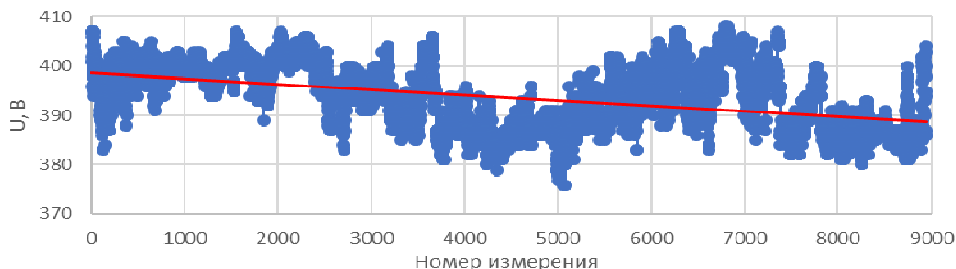


Рис. 4. Временной ряд замеров напряжения на отходящей линии с секции шин комплектной трансформаторной подстанции для питания нефтедобывающей скважины после фильтрации значений

Расчет активного и индуктивного сопротивления ветвей схемы замещения. Помимо установления номерной связи с узлами необходимо рассчитать активное и индуктивное сопротивления каждой ветви в соответствии с режимом работы оборудования и показателями, снятыми с систем мониторинга [14, 15].

Расчет активного и индуктивного сопротивления линии электропередачи осуществляется по выражениям:

$$R = r_0 \cdot L, \quad (1)$$

$$X = x_0 \cdot L \cdot \frac{f_{\text{тек}}}{f_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

где L – длина кабельной линии (КЛ) (или воздушной линии (ВЛ)), км; r_0 и X_0 – погонное активное и индуктивное сопротивления провода, Ом/км; $f_{\text{тек}}$ и $f_{\text{ном}}$ – текущая и номинальная частоты питающей сети соответственно, Гц.

Расчет активного и индуктивного сопротивления силового трансформатора осуществляется по выражениям:

$$R = \frac{dP_{\text{кз}}}{S} \cdot \frac{U_{\text{вн}}^2}{S} \cdot 1000; \quad (3)$$

$$X = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{вн}}^2}{S} \cdot 1000 \right)^2 - R^2}, \quad (4)$$

где $dP_{\text{кз}}$ – мощность короткого замыкания трансформатора, кВт; S – номинальная мощность трансформатора, кВт; $U_{\text{вн}}$ – напряжение трансформатора на высокой стороне, кВ; $U_{\text{кз}} \%$ – напряжение короткого замыкания, %.

Величины сопротивлений могут корректироваться поправочными коэффициентами для учета потерь на элементах. Либо необходимо добавить шунтирующую ветвь в схему замещения элемента, чтобы дифференцировать величину полной энергии на полезную энергию и потери. Для кабельной линии шунтирующее сопротивление (Ом) рассчитывается по формулам:

$$R_{sh} = \frac{10^6 \cdot R_{iz}}{L(10^4 \cdot \pi^2 \cdot C0^2 \cdot R_{iz}^2 + 1)} \cdot K_{rsh}, \quad (5)$$

$$X_{sh} = -\frac{10^8 \cdot R_{iz}^2 \cdot \pi \cdot C0}{L(10^4 \cdot \pi^2 \cdot C0^2 \cdot R_{iz}^2 + 1)} \cdot K_{xsh}, \quad (6)$$

где $C0$ – удельная емкость кабеля (является каталожным параметром), мкФ/км; K_{rsh} – поправочный коэффициент активного сопротивления шунта в соответствии с параметрами режима работы; K_{xsh} – поправочный коэффициент реактивного сопротивления шунта в соответствии

с параметрами режима работы; R_z – удельное сопротивление изоляции кабеля (является каталожным параметром), МОм · км.

Шунтирующие сопротивления трансформатора определяются по выражениям:

$$R_{sh} = \frac{dP_{xx} \cdot 1000}{I_{xx}^2 \cdot 3}; \quad (7)$$

$$X_{sh} = \frac{\sqrt{\left(\left(\frac{I_{xx\%}}{100} \right) \cdot S \right)^2 - dP_{xx} \cdot 1000}}{I_{xx}^2 \cdot 3}, \quad (8)$$

где $I_{xx\%}$ – ток холостого хода трансформатора, паспортная величина, %;

$I_{xx} = \frac{I_{ном} \cdot I_{xx\%}}{100}$ – ток холостого хода трансформатора, А;

$I_{ном} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{вн}}$ – номинальный ток трансформатора, А; dP_{xx} – потери

холостого хода, Вт.

Алгоритм матрично-топологического расчета. Данные, отфильтрованные и объединённые в единый массив со связями между элементами, могут быть использованы для расчета потребления и распределения электрической энергии [15]. Структура сформированных данных обеспечивает эффективный расчет на основе матрично-топологического метода. Суть метода можно описать в виде алгоритма, который представлен на рис. 5.

Рассмотрим алгоритм подробнее:

Блок 1. Получение исходных данных, их фильтрация и объединение в один *dataset*, который впоследствии используется для расчета.

Блок 2. Формирование матрицы инцидентностей, суть которой – отобразить, входит ли ветвь в узел системы или выходит из него. Для этого предварительно в созданном *dataset* требуется установить взаимосвязи между элементами и пронумеровать узлы каждой ветви. Если ветвь входит в узел, соответствующая ячейка матрицы заполняется -1 , а если выходит из узла, то $+1$, все остальные ячейки матрицы остаются пустыми (равными 0).

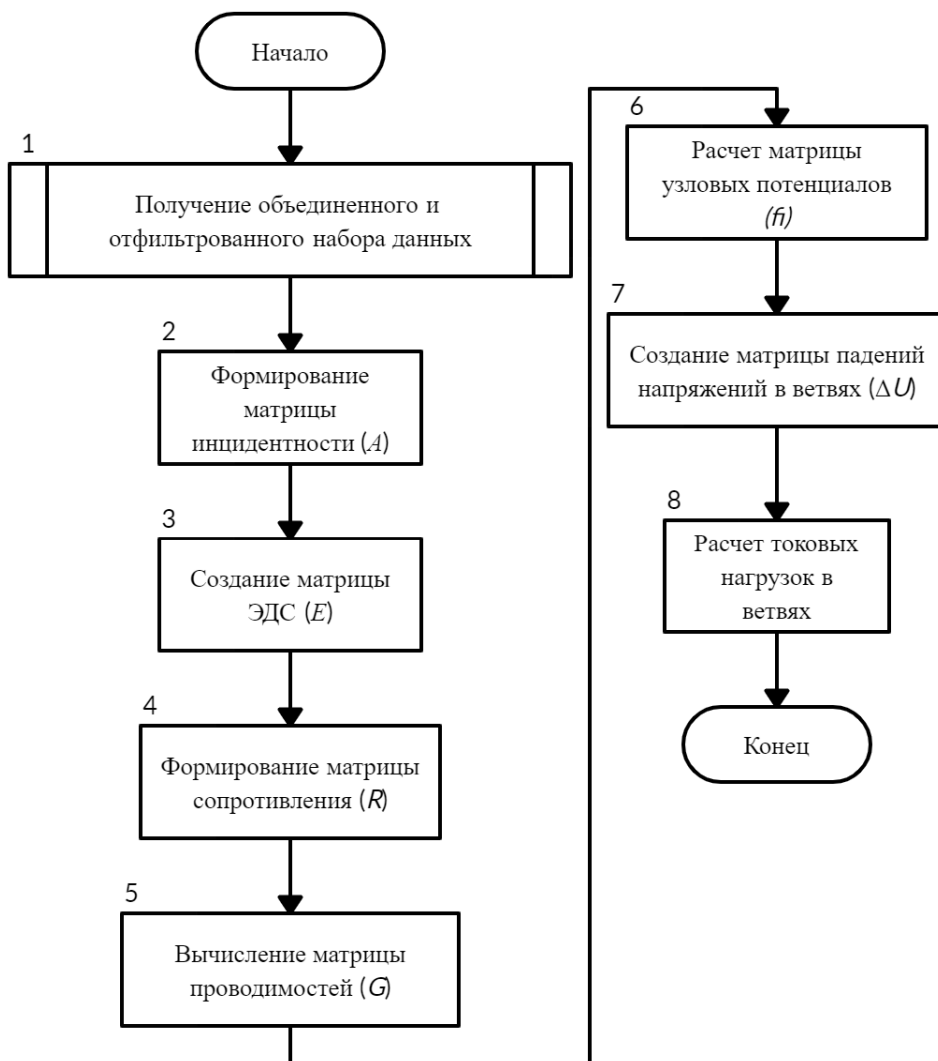


Рис. 5. Последовательность расчета схемы электроснабжения матрично-топологическим методом

Блок 3. Матрица напряжения базисных узлов представляет из себя вектор-столбец. В таком столбце в соответствующей строке прописывается напряжение узла генератора, остальные строки остаются пустыми (равными 0).

Блок 4, 5. Зная параметры сопротивлений всех элементов, формируется диагональная матрица. Позиция элемента в диагонали матрицы зависит от выбранной нумерации и установленных взаимосвязей объектов в *datasets*, как это показано в следующем выражении:

$$Y = \begin{bmatrix} R_1 & X_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_1 & R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_i & X_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_i & R_i \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где i – номер элемента в *datasets*; X – индуктивное сопротивление ветви, Ом; R – активное сопротивление ветви, Ом.

Матрица проводимостей представляет из себя также диагональную матрицу и является обратной матрицы сопротивления:

$$G = Y^{-1}. \quad (10)$$

Блок 6. Вычисление матрицы узловых потенциалов производится в соответствии с уже вышеуказанным выражением. Такая матрица принимает вид вектора-столбца. Уравнение потенциалов узлов выглядит следующим образом:

$$f_i = -(A \cdot G \cdot A^T)^{-1} \cdot A \cdot G \cdot E, \quad (11)$$

где A – матрица инцидентностей; G – матрица проводимостей; E – напряжения базисных узлов.

Блок 7. Зная потенциалы каждого узла системы электроснабжения, определяются падения напряжений в ветвях. Определение величины падения напряжения происходит путем вычисления разности потенциала узла начала ветви и потенциала узла конца ветви.

Блок 8. Расчет токовых нагрузок производится умножением соответствующих значений проводимостей ветвей и падений напряжения в этих ветвях.

После завершения расчета исходная база данных дополняется расчетными значениями токовых нагрузок во всех ветвях системы электроснабжения. Однако обработка столь обширного массива данных невозможна в ручном режиме. Поэтому для реализации такого способа расчета требуется использовать специализированные программные продукты, которые способны производить вычисления с матрицами большой размерности [8, 15, 16].

Апробация предложенного метода расчета. В рамках данной работы расчет был проведен в программном обеспечении *Mathcad*. Такой

выбор обусловлен возможностью программного продукта автоматически заполнять матрицы любой размерности, используя блоки «Программирование». Реализация алгоритма в выбранном программном продукте представлена на рис. 6.

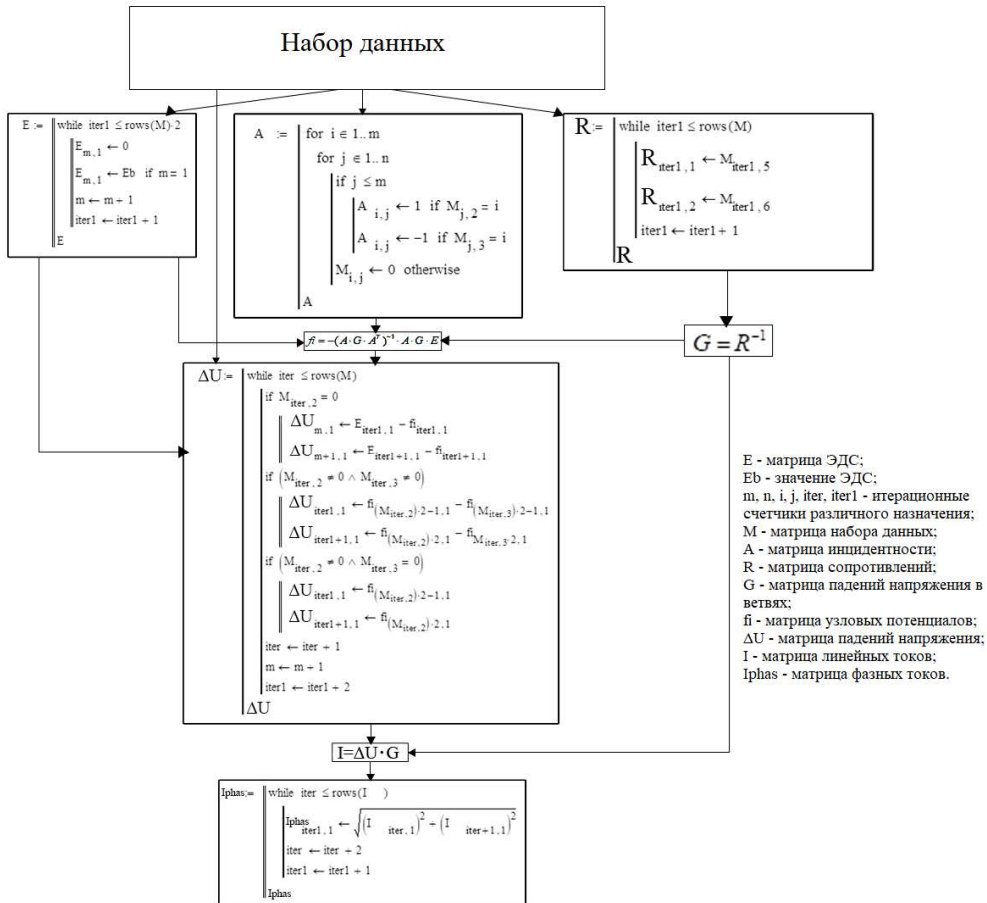


Рис. 6. Блоки расчета матрично-топологическим методом в программном обеспечении *Mathcad*

На рисунке наглядно видно, в какие блоки и для чего поступает информация из сформированного *dataset*.

Основным недостатком использования данного программного продукта является процесс расчета матрицы проводимостей. При реализации такого способа расчета в других программных продуктах следует учитывать возможности расчета матриц высокой размерности либо добавлять алгоритмы расчета таких матриц [16, 17]. Расчет был проведен на приме-

ре месторождения имени Сухарева предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». В связи со спецификой предприятия основными потребителями электрической энергии являются погружные электродвигатели, что обуславливает индуктивный характер сети [2, 3]. Результаты расчета представлены в табл. 1. Из таблицы видно, к какому формату приводится весь набор данных и какими параметрами он дополняется после расчета.

Таблица 1

Результаты расчета потребления и распределения электрической энергии на месторождении им. Сухарева предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

№ ветви	№ узла начала ветви	№ узла конца ветви	Наименование/маркировка/ границы объекта	R, Ом	X, Ом	U, В	I, А
1	0	1	Главная понизительная подстанция (ГПП) Нартовка	0,00	0,00	6300	165,92
2	1	2	КЛ от секции шин ГПП Нартовка до опоры	0,02	0,03	6294,20	165,92
3	2	3	Трансформатор КТП 2305 4000/6/20 кВ	0,08	0,67	20980,68	49,78
4	2	0	Шунт трансформатора КТП 2305	3001,073	136860,66	20534,03	0,15
5	3	4	ВЛ от опоры 2А до опоры 71	1,06	0,35	20478,49	49,63
342	165	184	КЛ до потребителя КТП-2312	0,02	0,00	390,42	21,82
343	184	0	Потребитель КТП-2312	17,52	3,56	390,42	21,82
344	165	185	КЛ до потребителя КТП-2312	0,02	0,00	390,30	27,91
345	185	0	Потребитель КТП-2312	13,69	2,78	390,30	27,91

Сравнивая результаты расчета с показателями замеров токов в ветвях, которые соответствуют погружным электродвигателям (ПЭД) (табл. 2), наглядно видно, что максимальное отклонение расчетов не превышает 5 % [18], а представленная методика может использоваться для расчета потребления и распределения электрической энергии.

Таблица 2

Сравнение результатов расчета с замерами на ПЭД

№ ветви	Наименование/ маркировка/ границы объекта	Замер I, А	Расчет I, А	Отклонение, %
233	ПЭД скважины 115	18,9	18,608	1,545
245	ПЭД скважины 119	17,3	17,017	1,636
251	ПЭД скважины 120	21,0	20,625	1,786
239	ПЭД скважины 318	19,2	19,646	2,323

Выводы. Представленный способ расчета решает ряд производственных задач, связанных с подбором электротехнического оборудования, с принятием управленческих решений, с прогнозированием возможных последствий в связи с изменением схемы электроснабжения, с формированием балансовых заявок [2, 3, 9, 15].

Результатом данной работы является описание возможного варианта использования матрично-топологического метода в совокупности с *data*-массивами, собранными системой мониторинга. Такой способ расчета потребления и распределения электрической энергии может стать средством для моделирования различных режимов работы оборудования, подспорьем в алгоритме поддержки принятия решений на производстве, подборе оборудования. Также математическую модель, основанную на матрично-топологическом методе, можно использовать как средство проверки адекватности модели краткосрочного прогнозирования [19].

В дальнейшем планируется составить единый алгоритм обработки *datasets*, прогнозирования и расчета возможных вариантов без использования сторонних программных продуктов и доработать алгоритм расчета матриц высокой размерности, чтобы адаптировать алгоритм под системы электроснабжения любой размерности.

Разработанное методическое обеспечение используется в лабораторных практикумах и научно-исследовательской работе в рамках новой сетевой магистерской программы «Концептуальное проектирование и инжиниринг повышения энергоэффективности» подготовки специалистов, научных работников и административного персонала для предприятий энергетической, распределительной и смежных отраслей [20].

Библиографический список

1. Fursanov M.I., Zolotoy A.A., Makarevich V.V. Calculation of technological consumption (loss) of electricity in modern 0,38–10 kV electrical distribution networks // *Energetic*. – 2018. – № 5. – P. 408–422.

2. Experience in Developing a Physical Model of Submersible Electrical Equipment for Simulator Systems: Research and Training Tasks on the Agenda of a Key Employer / A.B. Petrochenkov, A.V. Romodin, S.V. Mishurinskikh, V.V. Seleznev, V.A. Shamaev // *Proceedings of 2018 XVII Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Re-*

gion (PTES). – Saint Petersburg. – 2018. – P. 114–117. DOI: 10.1109/PTES.2018.8604169. WOS:000458979100033

3. Development of the oil well electrotechnical complex model in LabVIEW: Application work package / A. Petrochenkov, A. Romodin, S. Mishurinskikh, P. Speshilov // Proceedings of 8th International Conference on Applied Innovation in IT. – Vol. 8. – Iss. 1. – Koethen; Germany, 2020. – P. 101–105. DOI: 10.25673/32767. WOS: 000563361500015

4. Prescriptive analytics: Literature review and research challenges / K. Lepenoti, A. Bosdekis, D. Apostolu, G. Mentas // International Journal of Information Management. – 2020. – No. 50. – P. 57–70.

5. Gajowniczek K., Zabkowski T. Simulations Study on clustering advances to short-term electricity forecasting // Hindawi complexity. – 2018. – P. 1–21.

6. Probabilistic Peak Load Estimation in Smart Cities Using Smart Meter Data / M. Sun, Y. Wang, G. Strac, C. Kang // IEEE Transactions on Industrial electronics. – 2019. – № 2. – P. 1608–1618.

7. Wang Y., Kang C. Probabilistic Peak Load Assessment in Smart Cities Using Smart Meter Data // Transactions on Industrial electronics. – 2019. – P. 160–168.

8. Kwasinski A. Quantitative model and metrics of electrical grids' resilience evaluated at a power distribution level // Energies. – 2016. – Vol. 9. – № 2. – P. 1–27. DOI: 10.3390/en9020093

9. Петроченков А.Б. О подходах к оценке технического состояния электротехнических комплексов и систем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 12. – С. 16–21.

10. High-voltage unit for automated monitoring of electrical energy quality in underground networks of coal mines / A.V. Lyakhomskiy, L.A. Plashchansky, S.N. Reshetnyak, M.Y. Reshetnyak // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2019. – Vol. 7. – P. 207–213. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-207-213

11. Short-Circuit Calculation in Distribution Networks with Distributed Induction Generators / Niancheng Zhou, Fan Ye, Qianggang Wang, Xiaoxuan Lou, Yuxiang Zhang // Energies. – 2016. – Vol. 9(4). – P. 1–21. DOI: 10.3390/en9040277

12. Shailendra Singh, Abdulsalam Yassine. Big Data Mining of Energy Time Series for Behavioral Analytics and Energy Consumption Fore-

casting / Department of Software Engineering at Lakehead University. – Thunder Bay, ON, P7B 5E1, Canada, 2018.

13. Sumathi S., Sivanandam S.N. Introduction to Data Mining and its Applications / Department of Electrical and Electronics Engineering PSG College of Technology. – Springer, 2006. – P. 231–241.

14. Szendy K. Korszerű Hálózatszámítási Módszerek. – Budapest: Akad. Kiado, 1967.

15. Alu Abur. Power System State Estimation. Theory and Implementation. – New York, 2004.

16. Milano F. Power System Modelling and Scripting. – Berlin, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-13669-6

17. Bagajewicz M. A review of techniques for instrumentation design and upgrade in process plants // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2002. – Vol. 80(1). – P. 3–16.

18. Taylor J.R. An Introduction to Error Analysis. – University Science Book Mill Valley, California, 1982. – 272 p.

19. Планирование процесса эксплуатации электротехнического оборудования с использованием теории марковских процессов / А.Б. Петроченков, С.В. Бочкарев, А.В. Ромодин, Д.К. Елтышев // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 20–24.

20. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises: Research, technologies and personnel / A. Lyakhomskii, E. Perfilieva, A. Petrochenkov, S. Bochkarev // IEEE Conference Publications. Proceedings of 2015 IV Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations). – 2015. – P. 44–47. DOI: 10.1109/IVForum.2015.7388249

References

1. Fursanov M.I., Zolotoy A.A., Makarevich V.V. Calculation of technological consumption (loss) of electricity in modern 0,38-10 kV electrical distribution networks. *Energetic*, 2018, no. 5, pp. 408-422.

2. Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Mishurinskikh S.V., Seleznev V.V., Shamaev V.A. Experience in Developing a Physical Model of Submersible Electrical Equipment for Simulator Systems: Research and Training Tasks on the Agenda of a Key Employer. *Proceedings of 2018 XVII Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic*

Complex of the Region (PTES). – Saint Petersburg, 2018, pp. 114-117. DOI: 10.1109/PTES.2018.8604169. WOS:000458979100033

3. Petrochenkov A., Romodin A., Mishurinskikh S., Speshilov P. Development of the oil well electrotechnical complex model in LabVIEW: Application work package. *Proceedings of 8th International Conference on Applied Innovation in IT*, vol. 8, iss. 1, Koethen; Germany, 2020, pp. 101-105. DOI: 10.25673/32767. WOS: 000563361500015

4. Lepenoti K., Bosdekis A., Apostolu D., Mentas G. Prescriptive analytics: Literature review and research challenges. *International Journal of Information Management*, 2020, no. 50, pp. 57-70.

5. Gajowniczek K., Zabkowski T. Simulations Study on clustering advances to short-term electricity forecasting. *Hindawi complexity*, 2018, pp. 1-21.

6. Sun M., Wang Y., Strac G., Kang C. Probabilistic Peak Load Estimation in Smart Cities Using Smart Meter Data. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 2019, no. 2, pp. 1608-1618.

7. Wang Y., Kang C. Probabilistic Peak Load Assessment in Smart Cities Using Smart Meter Data. *Transactions on Industrial electronics*, 2019, pp. 160-168.

8. Kwasinski A. Quantitative model and metrics of electrical grids' resilience evaluated at a power distribution level. *Energies*, 2016, vol. 9, no. 2, pp. 1-27. DOI: 10.3390/en9020093

9. Petrochenkov A.B. O podkhodakh k otsenke tekhnicheskogo sostoianiia elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem [On products for the assessment of the technical condition of electrical complexes and systems]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 2012, no. 12, pp. 16-21.

10. Lyakhomskiy A.V., Plashchansky L.A., Reshetnyak S.N., Reshetnyak M.Y. High-voltage unit for automated monitoring of electrical energy quality in underground networks of coal mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2019, vol. 7, pp. 207-213. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-207-213

11. Niancheng Zhou, Fan Ye, Qianggang Wang, Xiaoxuan Lou, Yuxiang Zhang. Short-Circuit Calculation in Distribution Networks with Distributed Induction Generators. *Energies*, 2016, vol. 9(4), pp. 1-21. DOI: 10.3390/en9040277

12. Shailendra Singh, Abdulsalam Yassine. Big Data Mining of Energy Time Series for Behavioral Analytics and Energy Consumption Forecasting. Department of Software Engineering at Lakehead University. Thunder Bay, ON, P7B 5E1, Canada, 2018.

13. Sumathi S., Sivanandam S.N. Introduction to Data Mining and its Applications. Department of Electrical and Electronics Engineering PSG College of Technology. Springer, 2006, pp. 231-241.

14. Szendy K. Korszerű Hálózatszámítási Módszerek. Budapest: Akad. Kiado, 1967.

15. Alu Abur. Power System State Estimation. Theory and Implementation. New York, 2004.

16. Milano F. Power System Modelling and Scripting. Berlin, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-13669-6

17. Bagajewicz M. A review of techniques for instrumentation design and upgrade in process plants. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2002, vol. 80(1), pp. 3-16.

18. Taylor J. R. An Introduction to Error Analysis. University Science Book Mill Valley, California, 1982, 272 p.

19. Petrochenkov A.B., Bochkarev S.V., Romodin A.V., Eltyshev D.K. Planirovanie protsessa ekspluatatsii elektrotekhnicheskogo oborudovaniia s ispol'zovaniem teorii markovskikh protsessov [Planning the process of operation of electrical equipment using the theory of Markov processes]. *Elektrotehnika*, 2011, no. 11, pp. 20-24.

20. Lyakhomskii A., Perfilieva E., Petrochenkov A., Bochkarev S. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises: Research, technologies and personnel. *IEEE Conference Publications. Proceedings of 2015 IV Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations)*, 2015, pp. 44-47. DOI: 10.1109/IVForum.2015.7388249

Сведения об авторах

Семенов Александр Сергеевич (Пермь, Россия) – инженер кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: zav@msa.pstu.ru).

Лейсле Александр Генрихович (Пермь, Россия) – директор ООО «Трансресурс» (614031, Пермь, ул. Костычева, 13, e-mail: leysle@mail.ru).

Петроченков Антон Борисович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pab@msa.pstu.ru).

Ромодин Александр Вячеславович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», директор научно-образовательного центра энергосбережения Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: romodin@msa.pstu.ru).

About the authors

Semenov Alexander Sergeevich (Perm, Russian Federation) is an Engineer of the Department of Microprocessor Automation Tools Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: zav@msa.pstu.ru).

Leysle Alexander Genrikhovich (Perm, Russian Federation) is a Director of LLC "Transresurs" (614031, Perm, 13, Kostycheva str., e-mail: leysle@mail.ru).

Petrochenkov Anton Borisovich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Microprocessor Automation Tools National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: pab@msa.pstu.ru).

Romodín Alexander Vyacheslavovich (Perm, Russian Federation) is a Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Microprocessor Automation Tools, Director of the Scientific and Educational Center for Energy Saving Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: romodin@msa.pstu.ru).

Получено 17.08.2020