

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЦЕНТРА ПИТАНИЯ ОТХОДЯЩЕЙ ЛИНИИ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Грачева¹ Е.И., Табачникова² Т.В., Швецова² Л.В.

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия

tvtab@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть особенности системы электроснабжения нефтегазодобывающего комплекса, разнообразие компоновки электротехнических комплексов добывающих скважин. Разработать универсальную методику определения оптимального значения напряжения в центре питания, т.е. на секциях шин промышленной подстанции. *МЕТОДЫ.* При расчете напряжения в центре питания, обеспечивающего определенную величину напряжения на статоре самого удаленного электродвигателя, использовался метод уравнивания потенциалов в узлах отходящей линии при расчете нагрузок элементов электротехнических комплексов добывающих скважин. Разработка методики расчета оптимальной величины напряжения центра питания проводилась с использованием метода познания, который получил название восхождения от простого к сложному. Поиск оптимальной величины напряжения центра питания необходимо производить численными методами с привлечением того или иного программного продукта, позволяющего использовать поисковые алгоритмы. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье предложена методика расчета оптимального напряжения центра питания отходящей линии нефтегазодобывающего предприятия. Разработанная методика может быть применима под широкий спектр энергетических критериев оптимизации и для любой конфигурации схемы отходящей линии, учитывает технологические особенности процесса механизированной добычи нефти и обеспечивает снижение потребления электроэнергии. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Рассмотренная в статье методика расчета позволяет разработать оптимальный перечень организационно-технических мероприятий по регулированию напряжения в промышленной распределительной электрической сети с целью снижения электропотребления.

Ключевые слова: энергоэффективность; потери напряжения; алгоритм расчета оптимального напряжения; электротехнический комплекс добывающей скважины; электротехнический комплекс отходящей линии.

Для цитирования: Грачева Е.И., Табачникова Т.В., Швецова Л.В. Методика расчета оптимального напряжения центра питания отходящей линии промышленной подстанции нефтегазодобывающего предприятия // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. №5. С.56-70. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-56-70.

THE METHOD OF CALCULATING OPTIMAL VOLTAGE OF POWER SUPPLY CENTER OF OUTGOING LINE OF FIELD SUBSTATION OF OIL AND GAS PRODUCING ENTERPRISE

EI. Gracheva¹, TV. Tabachnikova², LV. Shvetskova²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Russia

tvtab@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To consider the features of power supply system of oil and gas production complex, variety of layout of electrical complexes of producing wells. To develop a universal methodology for determining optimal voltage value in power supply center, that is, on substation power bus. *METHODS.* When calculating voltage in power supply center, which provides a certain amount of voltage on stator of most remote electric motor, method of equalizing

potentials in nodes of outgoing line was used when calculating loads of elements of electrical complexes of producing wells. The development of a methodology for calculating optimal voltage of power supply center was carried out using the method of cognition, which was called ascent from simple to complex. The search for optimal voltage value of power supply center must be carried out by numerical methods with involvement of a software product that allows use of search algorithms. **RESULTS.** The article proposes a method for calculating optimal voltage of power supply center of outgoing line of an oil and gas producing enterprise. The developed technique can be applied under a wide range of energy optimization criteria and for any configuration of outgoing line circuit, takes into account technological features of the process of mechanized oil production and ensures a reduction in electricity consumption. **CONCLUSION.** The calculation method considered in article makes it possible to develop an optimal list of organizational and technical measures for voltage regulation in distribution network in order to reduce power consumption.

Keywords: energy efficiency; voltage losses; algorithm for calculating optimal voltage; electrical engineering complex of producing well; electrical engineering complex of outgoing line.

For citation: Gracheva EI, Tabachnikova TV, Shvetskova LV. Research of current distribution by phases in asynchronous electric motor with a combined winding. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(5):56-70. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-56-70.

Введение

Год от года экономические условия становятся всё более жёсткими. Условия мировой экономики, требования природоохранных организаций, а также государственная политика в соответствии со Стратегией долгосрочного развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г., требуют от нефтегазодобывающих компаний развития направления оптимизации потребления энергетических ресурсов при добыче и транспортировке углеводородного сырья.

Традиционными задачами оптимизации режимов электроэнергетических систем и систем электроснабжения являются: рациональное использование энергетических ресурсов; определение оптимальной стратегии развития энергосистем; распределение нагрузок между источниками электроэнергии (действующих и проектируемых систем электроснабжения); выбор оптимальных конфигураций электрических сетей; выбор оптимального месторасположения, мощности и срока ввода в эксплуатацию новых электростанций, подстанций, ЛЭП; выбор оптимальных маршрутов осмотра энергетических объектов; выбор оптимального состава генерирующего оборудования; выбор наилучших маршрутов транспортировки топлива.

Важно отметить, что при снижении электропотребления должны быть обеспечены допустимые отклонения напряжения на зажимах каждого электроприемника. Эффективное потребление электроэнергии должно рассматриваться при различных сочетаниях уровней напряжения и мощностей конденсаторных батарей. До сих пор задачи взаимосвязи уровня напряжения и выбора степени компенсации реактивной мощности недостаточно проработаны. Ряд научных трудов представляет математическое моделирование оптимальных режимов электростанций при перспективном проектировании электроэнергетических систем, включающее в себя исходную информацию о системе, ее параметры и суммарные мощности.

Одной из отличительных особенностей предприятий нефтегазодобывающей отрасли является их высокая энергоемкость, поэтому важным направлением, требующим развития в области энергосбережения на предприятиях данной отрасли, является оптимизация режимов напряжения и электропотребления. Локальное повышение энергоэффективности на предприятиях нефтедобычи, т.е. на уровне модернизации техники и технологий, а не на уровне управления режимами электротехнического комплекса предприятия, не позволяет получить ожидаемый экономический эффект от внедрения в полном объеме. [1-4]

После принятия закона № 261-ФЗ от 23.10.2009 г. появляются работы, направленные на решение проблем энергоэффективности и энергосбережения путем оптимизации затрат на потребляемую из сети электроэнергию с учетом особенностей технологического процесса [5]. Непосредственно для нефтегазодобывающих предприятий была разработана математическая модель электротехнического комплекса добывающей скважины, оборудованной винтовым насосом с поверхностным приводом, в которой увязываются в

единую систему гидрогеология и гидродинамика месторождения, техника и технология, электроэнергетика, экономика и экология [6].

Весомую роль в определении оптимального уровня напряжения в центре питания играет промысловая нагрузка, важен учёт технологического процесса механизированной добычи нефти. Очевидно, что тип погружного насоса также влияет на величину оптимального напряжения в центре питания отходящей линии. С целью разработки методики расчёта оптимальной величины напряжения центра питания промысловой распределительной электрической сети нефтедобывающего предприятия авторами рассмотрены возможные варианты гипотетических отходящих линий электротехнических комплексов добывающих скважин с различными типами погружных насосов.

Материалы и методы исследования

При расчете напряжения в центре питания, обеспечивающего определенную величину напряжения на статоре самого удаленного электродвигателя, использовался метод уравнивания потенциалов в узлах отходящей линии при расчете нагрузок элементов электротехнических комплексов добывающих скважин [7-9].

На основании проведённых исследований на гипотетических отходящих линиях промысловой распределительной электрической сети авторами разработаны: универсальная методика и алгоритм расчёта оптимального уровня напряжения в центре питания, обеспечивающего оптимум по потерям напряжения, а также программа расчета оптимальной величины напряжения в центре питания, которая может быть адаптирована для отходящих линий промысловой сети с различными компоновками электротехнических комплексов добывающих скважин [10-15].

Разработка методики расчета оптимальной величины напряжения центра питания проводилась с использованием метода познания, который получил название восхождения от простого к сложному. Асинхронный двигатель описывается системой из пяти нелинейных дифференциальных уравнений, аналитического решения которых принципиально не существует. Для выбора оптимального по какому-либо критерию уровня напряжения питания одного двигателя необходимо пользоваться численными методами расчета [16]. Задача определения оптимальной величины напряжения центра питания отходящей линии на нефтяном промысле не простая задача, поскольку к одной отходящей линии может быть подключено 10 и более скважин, и количество решаемых одновременно уравнений существенно возрастает [17-20]. Поэтому принципиально поиск оптимальной величины напряжения центра питания должен производиться численными методами с привлечением того или иного программного продукта, позволяющего использовать поисковые алгоритмы.

Результаты

Сформулирована универсальная методика определения оптимального напряжения центра питания отходящей линии нефтяного промысла, удовлетворяющая критерию оптимизации по потерям напряжения с учетом особенности технологического процесса механизированной добычи нефти. Данная методика может быть применима под широкий спектр энергетических критериев оптимизации и для любой конфигурации схемы отходящей линии, учитывающая технологические особенности процесса механизированной добычи нефти и обеспечивающая снижение потребления электроэнергии. Разработана программа расчета оптимальной величины напряжения в центре питания, которая может быть адаптирована под любую отходящую линию с электротехническими комплексами добывающих скважин.

Предположим, что отходящая линия нефтяного промысла, например, питающая электротехнический комплекс добывающих скважин (ЭКДС), является неразветвленной и содержит n узлов (рис. 1).

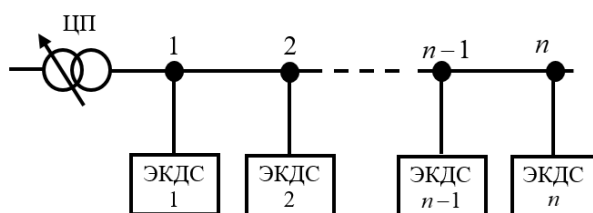


Рис. 1. Неразветвленная отходящая линия электротехнического комплекса добывающих скважин с произвольным числом узлов

Fig. 1. An unbranched outgoing line of an electrical complex of producing wells with an arbitrary number of nodes

Электротехнические комплексы добывающих скважин ЭКДС1 – ЭКДС n могут быть оборудованы как центробежными или винтовыми насосами с погружными электродвигателями (ПЭД), так и штанговыми скважинными насосными установками (ШСНУ), приводимыми в движения асинхронными электродвигателями общепромышленного исполнения.

Исходными данными для расчета являются: количество узлов n в; производительности $Q_1 - Q_n$ насосов при номинальной скорости двигателей; коэффициенты $k_{M1} - k_{Mn}$ или $k_{M2.1} - k_{M2.n}$ в зависимости от типа насоса, применяемого в скважине; параметры Г-образной схемы замещения асинхронных двигателей $R_{2Г1} - R_{2Гn}$, $X_{k1} - X_{kn}$, $X_{m1} - X_{mn}$; скорости идеального холостого хода $\omega_{0,1} - \omega_{0,n}$ и номинальные скорости вращения двигателей $\omega_{ном1} - \omega_{номn}$; номинальные значения моментов двигателей $M_{ном1} - M_{номn}$; моменты трогания $M_{0,1} - M_{0,n}$; минимально допустимые значения фазного напряжения двигателей $U_{1min,1} - U_{1min,n}$; шаг приращения напряжения двигателя самого удаленного узла $\Delta U_{step,n}$; шаг приращения напряжения ΔU двигателей с 1-го до $(n-1)$ -го; максимально допустимое напряжение на статоре самого удаленного двигателя $U_{1max,n}$; коэффициенты полезного действия двигателей $\eta_1 - \eta_n$; коэффициенты передачи $k_{cy1}^{U1} - k_{dyn}^{U1}$; паспортные данные трансформаторов $S_{ном.ТМПН1} - S_{ном.ТМПНn}$; $U_{ном.ТМПН1} - U_{ном.ТМПНn}$; $\Delta P_{xx.ТМПН1} - \Delta P_{xx.ТМПНn}$; $\Delta P_{кз.ТМПН1} - \Delta P_{кз.ТМПНn}$; $\Delta Q_{xx.ТМПН1} - \Delta Q_{xx.ТМПНn}$; $\Delta Q_{кз.ТМПН1} - \Delta Q_{кз.ТМПНn}$; $U_{к.ТМПН1, \%} - U_{к.ТМПНn, \%}$; $k_{ТМПН1} - k_{ТМПНn}$; $S_{ном.nm1} - S_{ном.nmn}$; $U_{ном.nm1} - U_{ном.nmn}$; $\Delta P_{xx.nm1} - \Delta P_{xx.nmn}$; $\Delta Q_{xx.nm1} - \Delta Q_{xx.nmn}$; $\Delta Q_{кз.nm1} - \Delta Q_{кз.nmn}$; $U_{к.nm1, \%} - U_{к.nmn, \%}$; $k_{nm1} - k_{nmn}$; $\Delta P_{кз.nm1} - \Delta P_{кз.nmn}$ активные и индуктивные сопротивления кабельных линий $R_{кл1} - R_{кln}$ и $X_{кл1} - X_{кln}$; активные и индуктивные сопротивления воздушных линий $R_{л1} - R_{лn}$ и $X_{л1} - X_{лn}$; активные и индуктивные сопротивления $R_{цп1} - R_{цп(n-1)}$ и $X_{цп1} - X_{цп(n-1)}$ между узлами нагрузки отходящей линии; реактивные сопротивления конденсаторных батарей, подключенных к статорным обмоткам асинхронных двигателей $X_{кy1} - X_{кyn}$.

Обсуждение результатов

Разработанная методика расчета оптимального напряжения центра питания отходящей линии учитывает разнообразие типов погружных насосов с характерными механическими характеристиками. Методика представляет собой определенную последовательность вычислительных процедур, которую удобно представить в виде алгоритма (рис.2).

Во втором блоке присваивается условный номер шага расчетов $i = -1$. Затем организуется цикл расчетов с вариацией напряжения на самом удаленном двигателе с погружным насосом. В третьем блоке (операторе присвоения) к предыдущему номеру шага расчета прибавляется 1. Поэтому расчет начинается при $i = 0$, и в четвертом операторе рассчитывается приращение фазного напряжения $\Delta U_{1n} = 0$. В следующем блоке находится напряжение на самом удаленном двигателе, подключенном к n -ому узлу отходящей линии $U_{1n} = U_{1min,n} + \Delta U_{1n} = U_{1min,n}$. То есть сначала принимается минимально допустимая величина фазного напряжения на самом удаленном двигателе, например, на 10% меньше номинального значения.

В шестом блоке переменной q , с помощью которой организуется цикл расчетов для каждого узла отходящей линии, присваивается значение $q = 1$. В седьмом блоке к предыдущему значению q прибавляется 1, то есть q становится равной 0. Следующий блок производит сравнение величины q с нулем, и поскольку на первом шаге этого цикла (цикла узлов) так оно и есть, то разработанная методика и алгоритм расчета отправляют нас к блоку 16. И если электродвигатель $(n-q)$ -ого узла является погружным, то мы переходим к блоку 17.

Принципиальным отличием ПЭД с центробежным или винтовым насосом от ШСНУ является наличие повышающего трансформатора типа ТМПН, преобразующего напряжение 0,4 кВ на нестандартное значение, а также длинного кабеля, соединяющего этот

трансформатор с ПЭД. Поэтому в блоках 17 – 27 производится последовательный расчет скорости вращения ПЭД $\omega_{(n-q)}$; фактического скольжения $S_{(n-q)}$; потребления двигателем активной $P_{ПЭД(n-q)}$ и реактивной $Q_{ПЭД(n-q)}$ мощности; потерь мощности $\Delta P_{кл(n-q)}$ и $\Delta Q_{кл(n-q)}$ на соединительном кабеле, активной $P_{ТМПН(n-q)}$, реактивной $Q_{ТМПН(n-q)}$ и полной $S_{ТМПН(n-q)}$ нагрузки на выходе повышающего трансформатора; падения напряжения $\Delta U_{кл(n-q)}$ на соединительном кабеле, напряжения $U_{ТМПН(n-q)}$ на выходе трансформатора ТМПН; коэффициента загрузки $\beta_{ТМПН(n-q)}$, потерь мощности $\Delta P_{ТМПН(n-q)}$, $\Delta Q_{ТМПН(n-q)}$, $\Delta S_{ТМПН(n-q)}$ и падения напряжения $\Delta U_{ТМПН(n-q)}$ на этом трансформаторе.

Затем расчет переходит в блок 33, в котором определяется напряжение $U_{2nm(n-q)}$ на выходе понижающего трансформатора, обеспечивающего требуемое напряжение $U_{1n} = U_{1min.n} + \Delta U_{1n} = U_{1min.n}$ на статоре ПЭД. В блоке 34 определяется активная $P_{2nm(n-q)}$, реактивная $Q_{2nm(n-q)}$ и полная $S_{2nm(n-q)}$ нагрузка понижающего трансформатора.

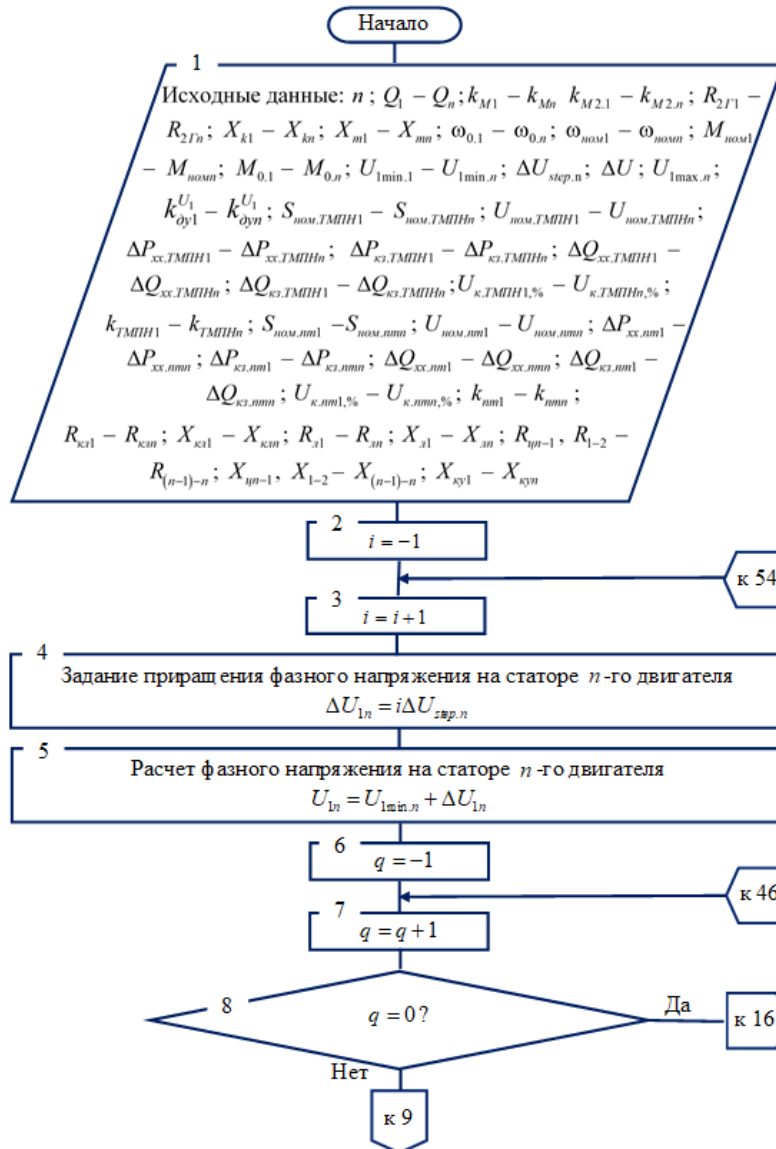


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения в центре питания электротехнического комплекса отходящей линии (начало)

Fig. 2. Algorithm for calculating the optimal voltage in the power supply center of the electrical complex of the outgoing line (beginning)

Если асинхронный двигатель самого удаленного насоса принадлежит ШСНУ, то расчет происходит по другой ветви представленного алгоритма, и из блока 16 мы переходим в блок 28, где определяется средняя скорость $\omega_{(n-q)}$ двигателя за период качания. Затем в блоках 29 – 32 происходит последовательное вычисление среднего скольжения $S_{(n-q)}$, потребления двигателем ШСНУ активной $P_{АД(n-q)}$ и реактивной $Q_{АД(n-q)}$ мощности и напряжения $U_{2nm(n-q)}$ нагрузки $P_{2nm(n-q)}$, $Q_{2nm(n-q)}$ и $S_{2nm(n-q)}$ понижающего трансформатора.

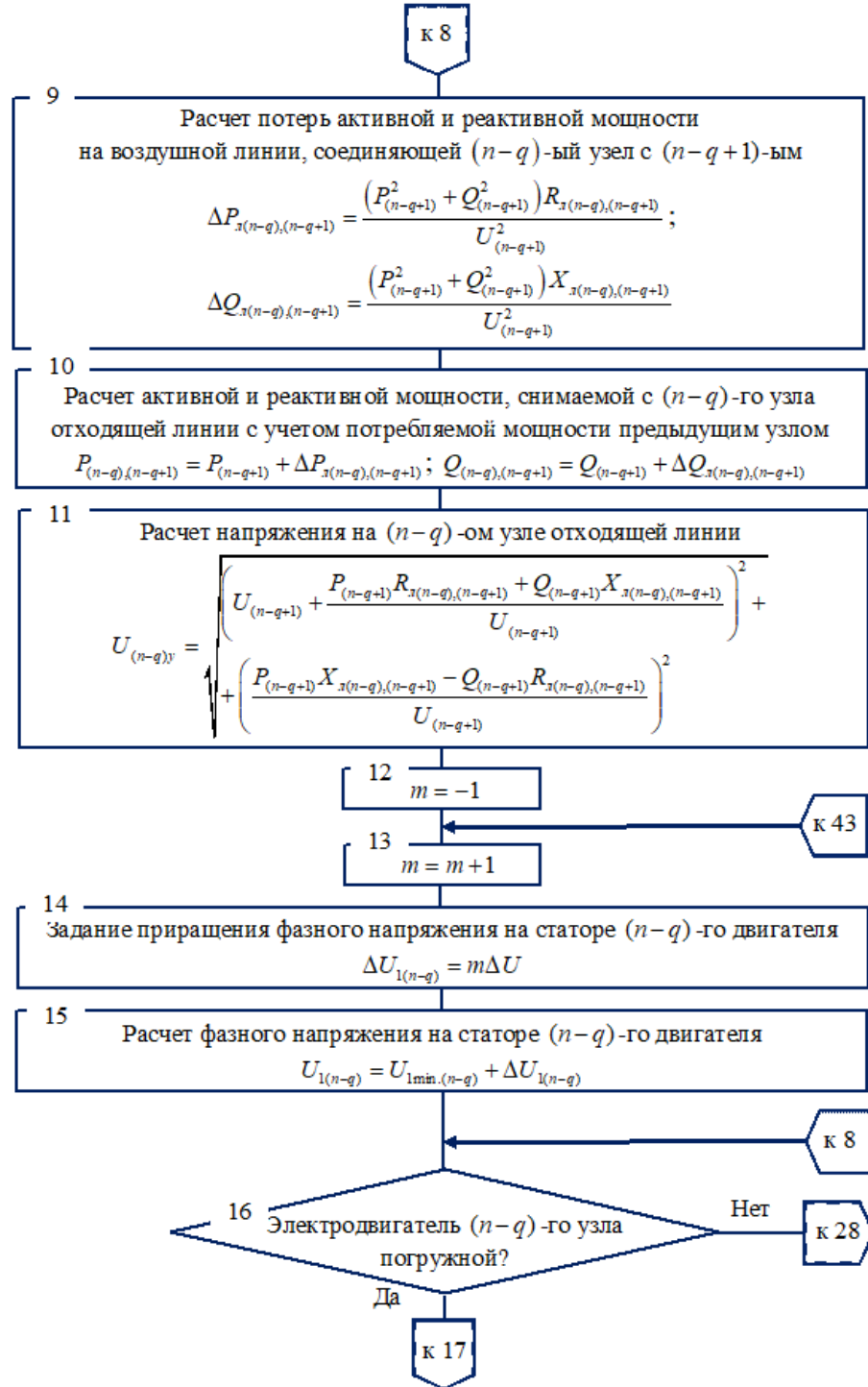


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения в центре питания электротехнического комплекса отходящей линии (продолжение рис.1)

Fig. 2. Algorithm for calculating the optimal voltage in the power supply center of the electrical complex of the outgoing line (continuation of fig. 1)

Далее независимо от типа насоса в блоках 35 и 36 производится расчет коэффициента загрузки $\beta_{nm(n-q)}$ и потерь мощности $\Delta P_{nm(n-q)}$, $\Delta Q_{nm(n-q)}$, $\Delta S_{nm(n-q)}$ на этом трансформаторе. В блоках 37 и 38 определяется активная $P_{1nm(n-q)}$, реактивная $Q_{1nm(n-q)}$ и полная $S_{1nm(n-q)}$ мощность на входе понижающего трансформатора, а также падение напряжения на нем $\Delta U_{nm(n-q)}$. В блоке 39 производится расчет напряжения $U_{1nm(n-q)}$ на входе понижающего трансформатора, в блоке 40 – потери активной $\Delta P_{л(n-q)}$ и реактивной $\Delta Q_{л(n-q)}$ мощности на воздушной линии, соединяющей $(n-q)$ -ый узел отходящей линии с соответствующим трансформатором, а в блоке 41 – напряжение $U_{(n-q)у,2}$ на этом узле.

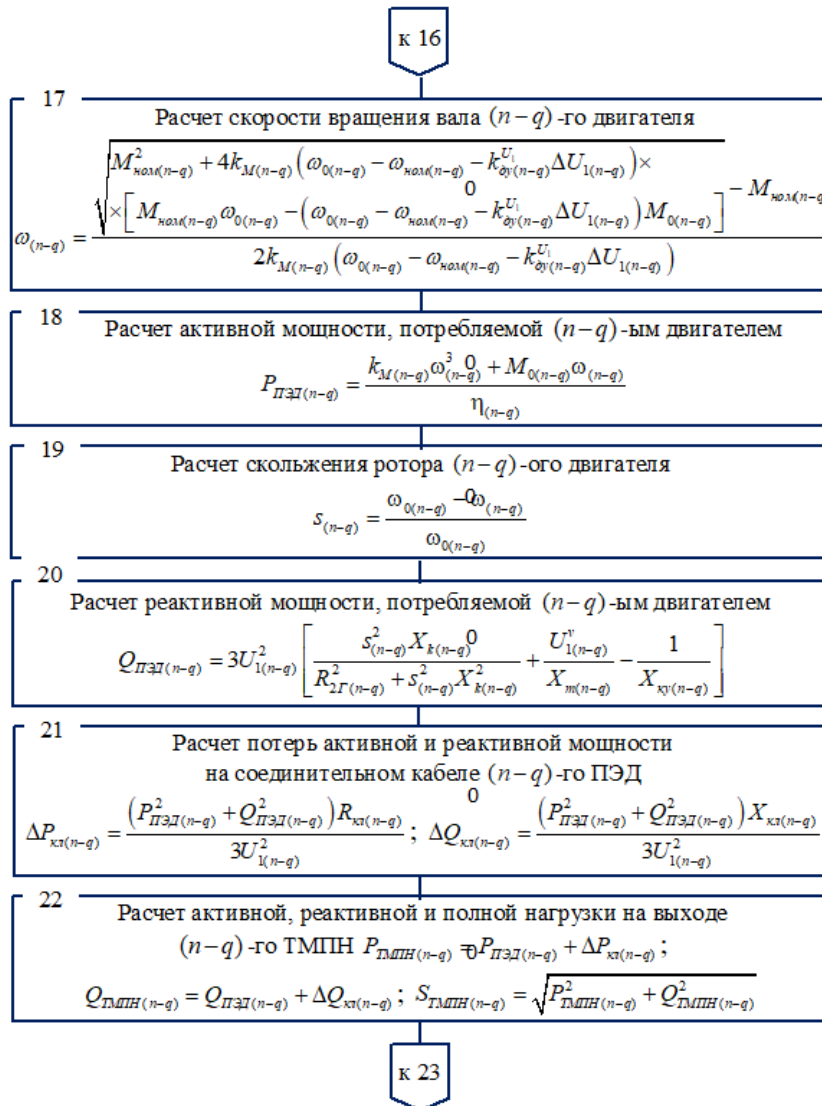


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения в центре питания электротехнического комплекса отходящей линии (продолжение 2).

Fig. 2. Algorithm for calculating the optimal voltage in the power supply center of the electrical complex of the outgoing line (continued 2).

Если идет первый шаг цикла узлов, то есть $q=0$, то в алгоритме расчета происходит переход в блок 44, где осуществляется расчет падения напряжения $\Delta U_{л(n-q)}$ на воздушной линии, соединяющей $(n-q)$ -ый узел отходящей линии с понижающим трансформатором.

Затем в блоке 45 находится активная $P_{(n-q)}$ и реактивная $Q_{(n-q)}$ мощность, снимаемая с $(n-q)$ -ого узла. И поскольку на первом шаге цикла узлов $(n-q) \neq 1$, то в алгоритме расчета оптимального напряжения в центре питания происходит переход в блок 7, где начинается новый шаг в цикле узлов. В этом случае $q \neq 0$, поэтому в блоке 9 вычисляются активные $\Delta P_{л(n-q),(n-q+1)}$ и реактивные $\Delta Q_{л(n-q),(n-q+1)}$ потери мощности на воздушной линии, соединяющей $(n-q)$ -ый и $((n-q)+1)$ -ый узлы отходящей линии.

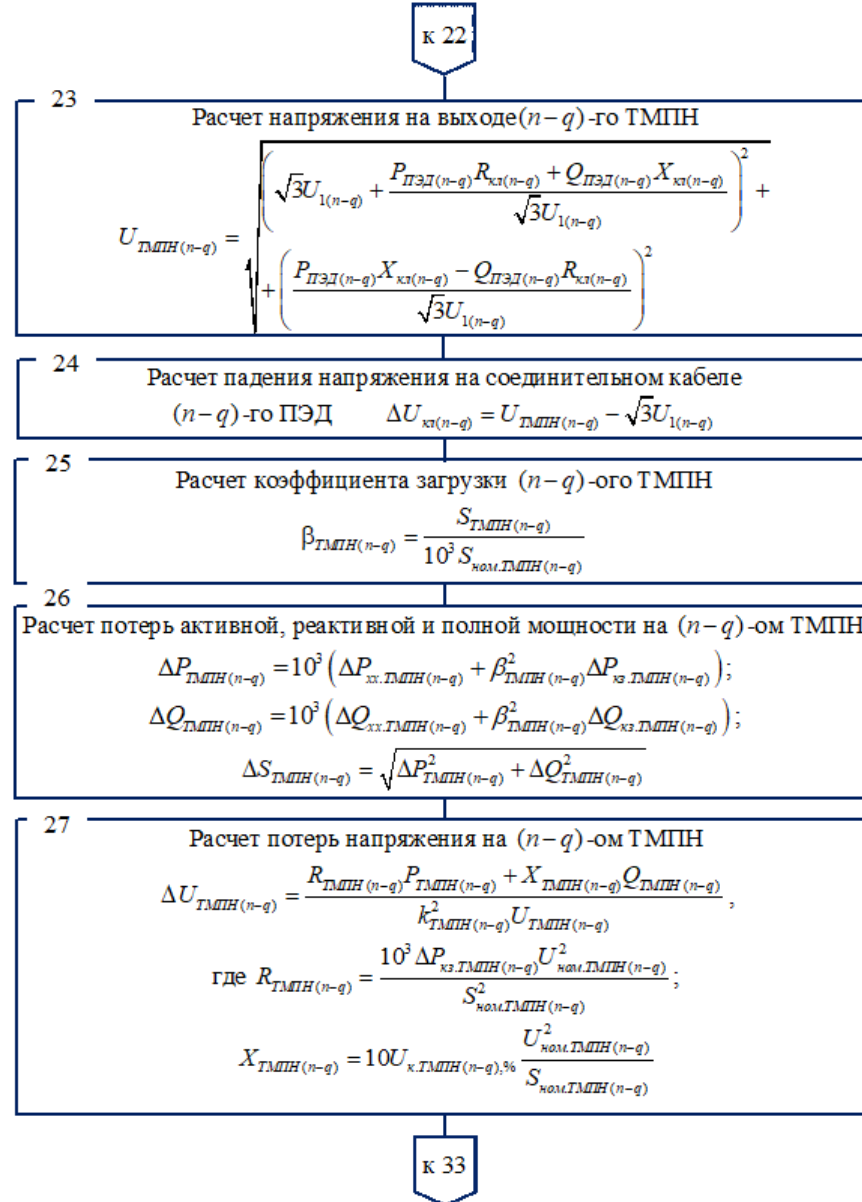


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения в центре питания электротехнического комплекса отходящей линии (продолжение 3)

Fig. 2. Algorithm for calculating the optimal voltage in the power supply center of the electrical complex of the outgoing line (continued 3)

В блоке 10 определяются значения активной $P_{(n-q),(n-q+1)}$ и реактивной $Q_{(n-q),(n-q+1)}$ мощности, снимаемой с $(n-q)$ -го узла отходящей линии для питания более удаленных узлов, а в блоке 11 – напряжение $U_{(n-q)у}$ на узле с номером $(n-q)$.

Затем алгоритм расчета переходит в блок 12, где переменной m присваивается начальное значение $m = -1$, после чего в блоке 13 к этому значению прибавляется 1 и начинается цикл подбора напряжения на статоре $(n-q)$ -го асинхронного двигателя,

которое должно быть при напряжении $U_{(n-q)y}$. Поэтому в блоках 14 и 15 рассчитывается в зависимости от величин m и ΔU значение фазного напряжения на статоре $(n-q)$ -го асинхронного двигателя.

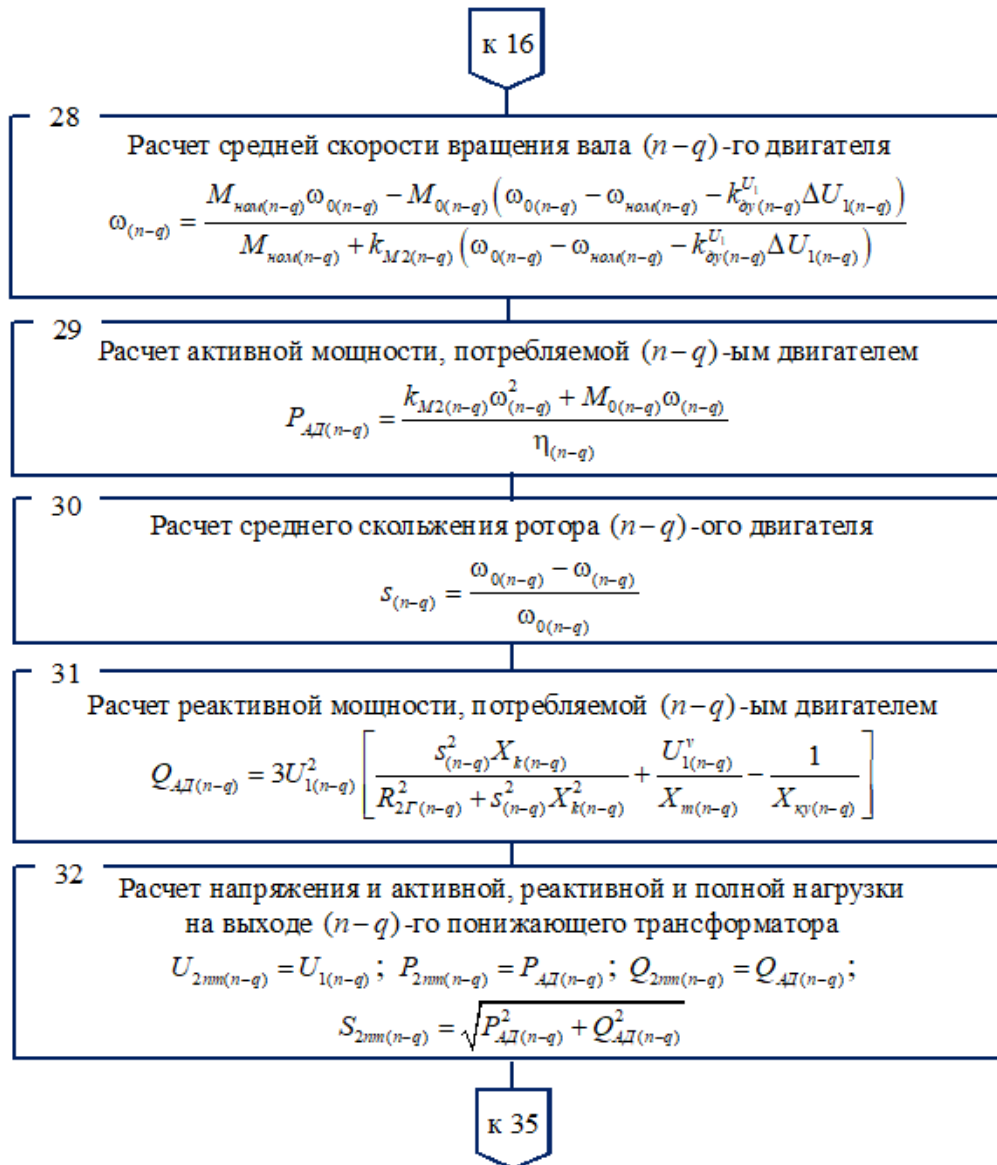


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения в центре питания электротехнического комплекса отходящей линии (продолжение 4)

Fig. 2. Algorithm for calculating the optimal voltage in the power supply center of the electrical complex of the outgoing line (continued 4)

Далее вычислительные процедуры переходят в блок 16 и повторяются те же самые расчеты, которые производятся при $q=0$. Единственная отличительная особенность вычислений при $q \neq 0$ заключается в том, что после блока 42 происходит переход в блок 43, где сравниваются значения $U_{(n-q)y,2}$ с $U_{(n-q)y}$. Если они не совпадают, то опять происходит переход в блок 13 и повторяются все расчеты, пока значения $U_{(n-q)y,2}$ и $U_{(n-q)y}$ не совпадут с некоторой незначительной погрешностью.

При совпадении $U_{(n-q)y,2}$ с $U_{(n-q)y}$ вычислительные процедуры переходят в блоки 44 – 46, и затем циклы узлов и подбора напряжения на статоре $(n-q)$ -го асинхронного двигателя повторяются до тех пор, пока в блоке 46 не зафиксируется значение $(n-q)=1$, подтверждающее, что расчеты по всем узлам отходящей линии завершены.

После этого в блоках 47 – 53 происходит последовательный расчет активных $\Delta P_{\text{цп}}$ и реактивных $\Delta Q_{\text{цп}}$ потерь мощности на воздушной линии, соединяющей центр питания с 1-ым узлом отходящей линии; активной $P_{\text{цп}}$, реактивной $Q_{\text{цп}}$ и полной $S_{\text{цп}}$ мощностей, потребляемых из центра питания; напряжения $U_{\text{цп}}$ в центре питания; падения напряжения на воздушной линии, соединяющей центр питания с n -ым узлом, суммарные потери активной и реактивной мощности; сумма всех падений напряжений на всех элементах принципиальной схемы отходящей линии; суммарный дебит Q всех скважин, подключенных к рассматриваемой отходящей линии; коэффициент эффективности $k_{\text{эф}}$ и удельные затраты энергии E_1 и E_2 .

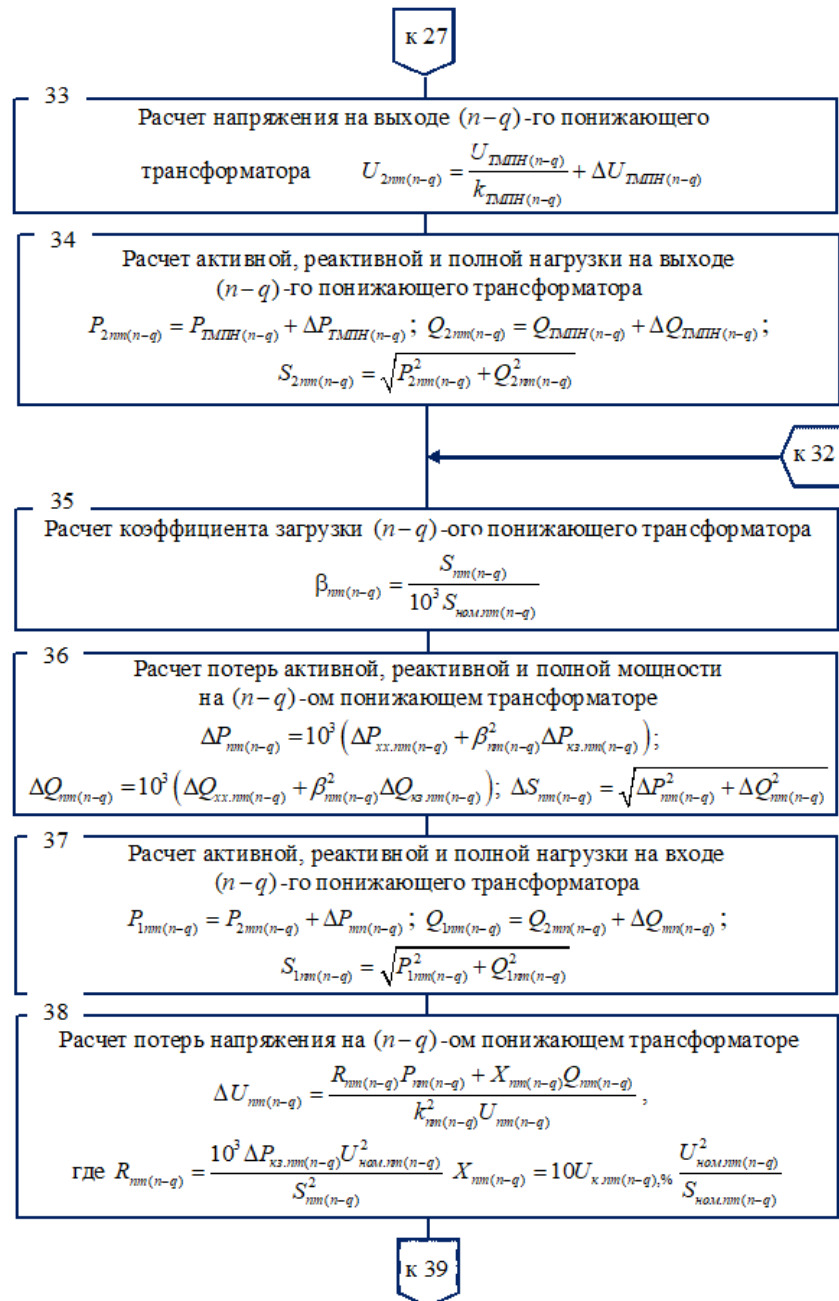


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения в центре питания электротехнического комплекса отходящей линии (продолжение 5)

Fig. 2. Algorithm for calculating the optimal voltage in the power supply center of the electrical complex of the outgoing line (continued 5)

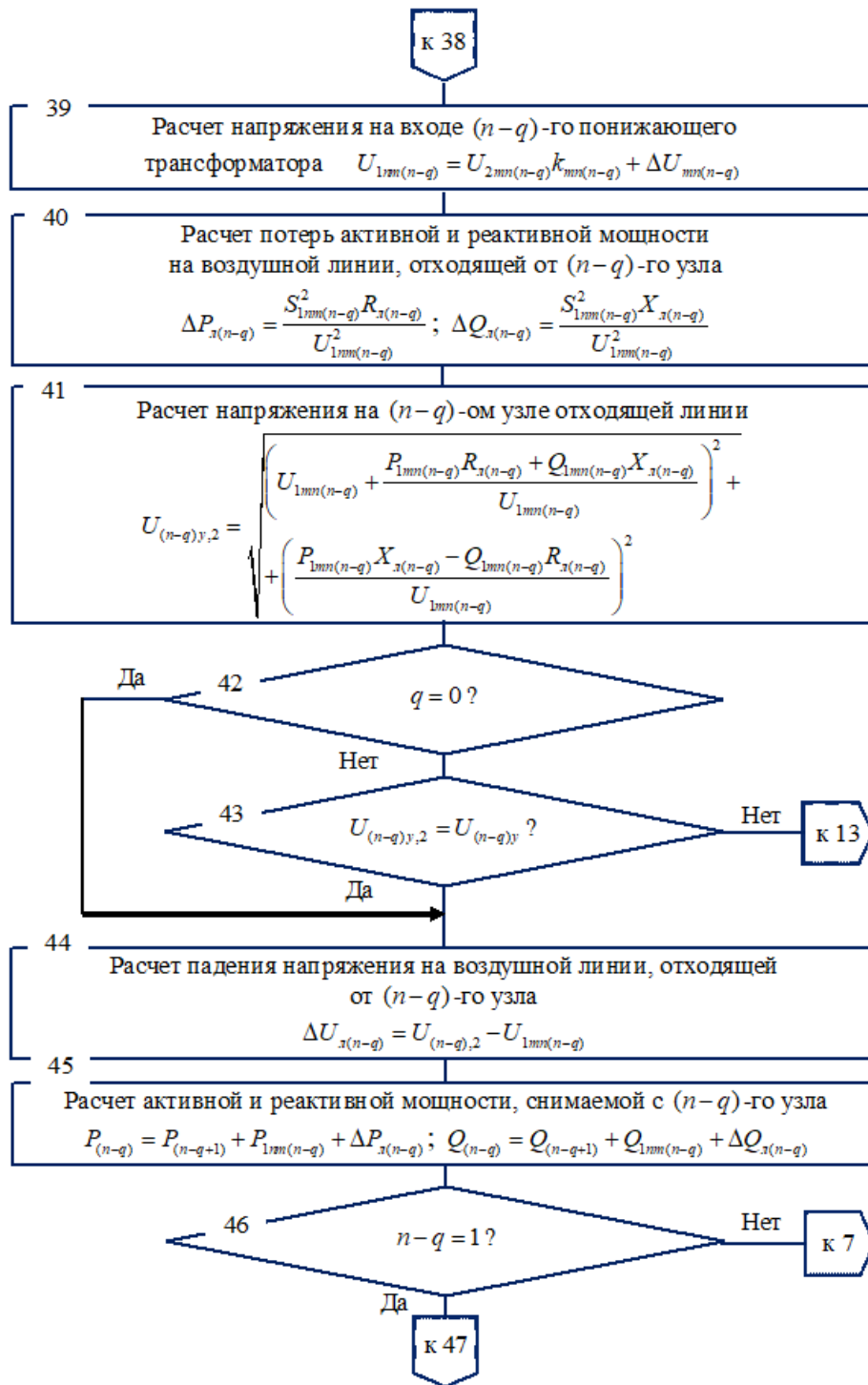


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения в центре питания электротехнического комплекса отходящей линии (продолжение 6)

Fig. 2. Algorithm for calculating the optimal voltage in the power supply center of the electrical complex of the outgoing line (continued 6)

Далее в блоке 54 сравнивается напряжение на самом удаленном двигателе с максимально допустимым значением $U_{1,max,n}$. Если оно не достигнуто, то происходит переход в третий блок и производятся все описанные выше расчеты для другого значения напряжения на статоре самого удаленного двигателя с номером n .

После перебора всех значений U_{1n} заданного диапазона с шагом $\Delta U_{step,n}$ вычислительные процедуры заканчиваются, и в блоке 55 происходит выбор оптимального значения напряжения в центре питания соответствующего требуемому критерию оптимизации.

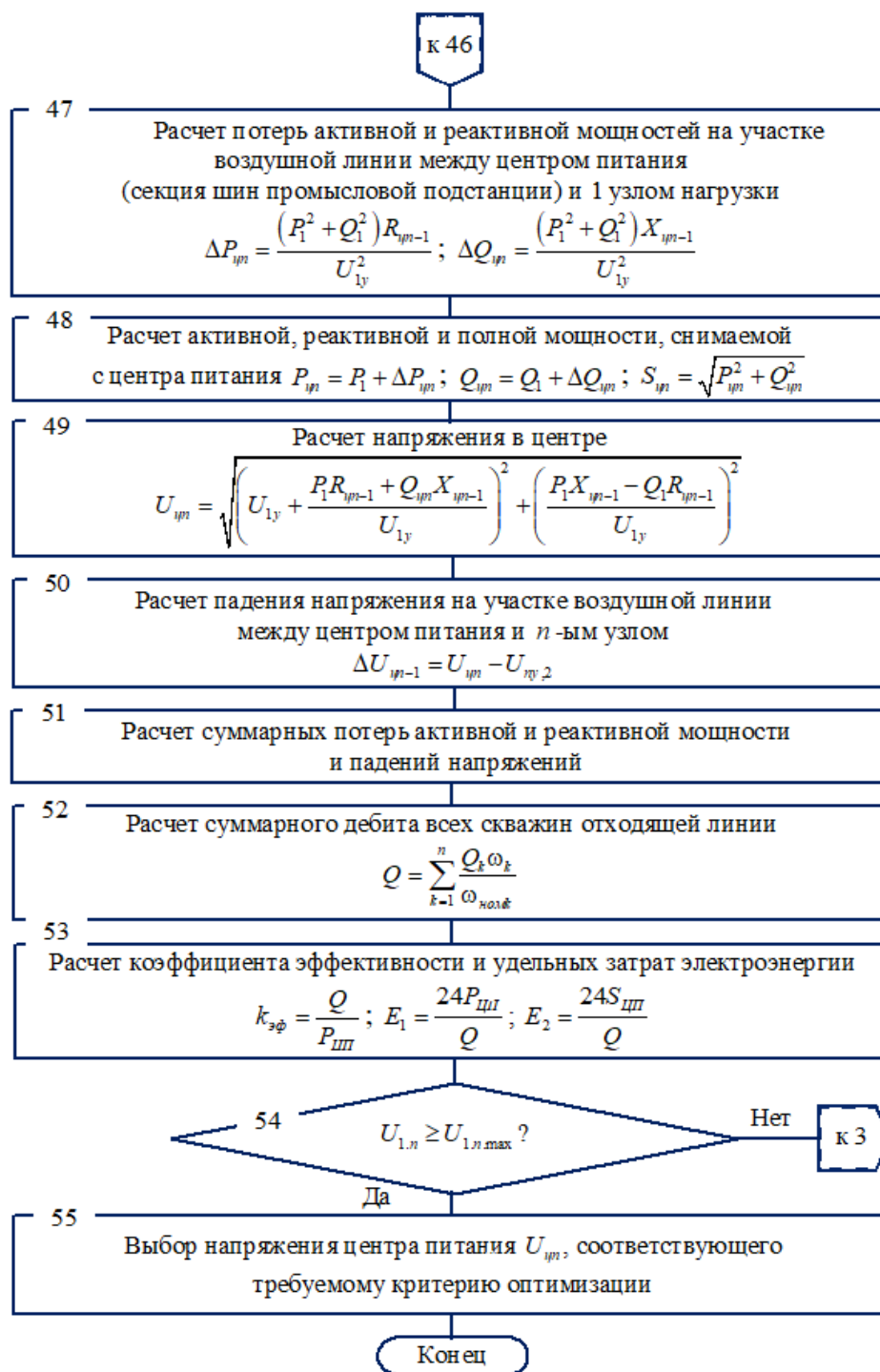


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения в центре питания электротехнического комплекса отходящей линии (конец)

Fig. 2. Algorithm for calculating the optimal voltage in the power supply center of the electrical complex of the outgoing line (Final)

Заключение

В статье приведена разработанная универсальная методика расчета оптимальной величины напряжения в центре питания промышленной распределительной электрической сети. Разработан алгоритм метода расчёта оптимальных значений напряжения в центре питания промышленной распределительной электрической сети.

Разработана программа расчета оптимальной величины напряжения в центре питания, которая может быть адаптирована под любую отходящую линию с электротехническими комплексами добывающих скважин.

При расчете напряжения в центре питания, обеспечивающего определенную

величину напряжения на статоре самого удаленного электродвигателя, был использован метод уравнивания потенциалов в узлах отходящей линии при расчете нагрузок элементов электротехнических комплексов добывающих скважин.

Данная методика может быть применима под широкий спектр энергетических критериев оптимизации и для любой конфигурации схемы отходящей линии, учитывающая технологические особенности процесса механизированной добычи нефти и обеспечивающая снижение потребления электроэнергии.

Литература

1. Пучкина Л.Д. Направление повышения эффективности предприятий нефтегазовой отрасли (ВИНК) // Труды VIII международной научно-практической конференции «современные тенденции и инновации в науке и производстве». 03-04 апреля 2019. С. 294.1-294.7.
2. Ustinov D.A., Konovalov Yu.V., Plotnikov I.G. Certification of electrical loads of oil and gas companies // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Science and education: SPbGPU Publishing house. St. Petersburg. 2012. № 1. pp. 81-84.
3. Воробьев А.Е., Хоноре Т., Воробьев К.А. Цифровизация нефтяной промышленности: «интеллектуальный» нефтепромысел // Вестник Евразийской науки. 2018. №3(10). С.1-16.
4. Устинов Д.А., Коновалов Ю.В., Плотников И.Г. Паспортизация электрических нагрузок нефтегазодобывающих предприятий // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование: Изд-во СПбГПУ. Санкт-Петербург. 2012. № 1. С. 81-84.
5. Федотов, А.И., Вагапов Г.В. Оптимизация затрат на электроэнергию для производств с продолжительным режимом работы // Промышленная энергетика. 2010. №10. С.2-6.
6. Nurbosynov D.N., Tabachnikova T.V., Shvetskova L.V., et al. Simulation Model for the Electrical Engineering Complex of a Producing Well with a Screw Pump Unit. 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP).
7. Belyaev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., et al. Methods for optimization of Power-System operation modes // Russian Electrical Engineering. 2013. №2. pp.74-80.
8. Shafikov I.N., Gizatullin FA., Khakimyanov M.I., et al. Analysis of losses in the cable line of well submersible electric motor // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. 4 p.
9. Shafikov I.N., Khakimyanov M.I., Khusainov F.F. Monitoring of sucker-rod pump units as a result of the analysis wattmeter cards // Journal of Physics: Conference Series, 2017. V. 803. N. 1. 6 p.
10. Табачникова Т.В. Разработка структуры адаптивной системы управления энергетическими параметрами в распределительной электрической сети // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. Ангарск: Издательство АГТУ. 2016. С.227-232.
11. Tabachnikova T.V., Starikov A.V., Kosorlukov I.A. Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon).
12. Табачникова Т.В., Нурбосынов Д.Н., Швецова Л.В. Оптимизация электромагнитного момента процесса пуска и самозапуска электропривода добывающей скважины при добыче вязкой и высоковязкой нефти // «Промышленная энергетика». 2015. №10. С.-25-29.
13. Tabachnikova T.V., Makht A.D., Nurbosynov E.D. Analytical studies of transformers operating modes in supply and distribution electric network of a field substation. International Scientific Electric Power Conference – 2019. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 643 (2019) 012090.
14. Табачникова Т.В. Разработка имитационной модели группового пуска электроприводов электротехнического комплекса добывающей скважины // «Промышленная энергетика». 2018. №2. С. 2-6.
15. Табачникова Т.В., Нурбосынов Д.Н., Иванов Ф.А., и др. Разработка имитационной модели распределительной электрической сети промысловых подстанций, закольцованных реклоузером // «Промышленная энергетика». 2018. №5. С. 9-14.
16. Стариков А.В., Лисин С.Л., Табачникова Т.В., и др. Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя // Вестник Самарского

государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2019. № 4 (64). С. 155-167.

17. Жидков Е.О., Катышева Е.Г. Применение инструментов интеллектуального месторождения для управления рисками и оптимизации затрат при бурении нефтяных скважин // Кластеризация цифровой экономики: глобальные вызовы. 2020. С.98-111.

18. Быкова В.Н., Ким Е., Гаджиалиев М.Р. и др. Применение цифрового двойника в нефтегазовой отрасли // Актуальные проблемы нефти и газа. 2020. №1 (28). С.1-11.

19. Wanasinghe TR., Wroblewski L., Petersen BK. et al. Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges // IEEE Access. 2020. V. 8. pp. 104175-104197

20. LaGrange E. Developing a digital twin: The roadmap for oil and gas optimization // SPE Offshore Europe Conference and Exhibition, 3-6 Sept. 2019, Aberdeen, UK, 2019.

Авторы публикации

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский энергетический университет, г. Казань.

Табачникова Татьяна Владимировна – канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Электро- и теплоэнергетика», Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск.

Швецова Людмила Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электро- и теплоэнергетика», Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск.

References

1. Puchkina LD. *Direction of increasing the efficiency of oil and gas industry enterprises (VINK)*. Proceedings of VIII International Scientific and practical conference "modern trends and innovations in science and production". 03-04 april 2019. P. 294.1-294.7.

2. Ustinov DA, Konovalov YuV, Plotnikov IG. Certification of electrical loads of oil and gas companies. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. Science and education: SPbGPU Publishing house. St. Petersburg. 2012;1:81-84.

3. Vorobyev AE, Honor T, Vorobyev KA. Digitalization of oil industry: «intellectual» oilfield. *Bulletin of Eurasian Science*. 2018;3(10):1-16.

4. Ustinov DA, Konovalov YuV, Plotnikov IG. Certification of electrical loads of oil and gas producing enterprises. *Scientific and Technical Bulletin of SPbPU*. Science and Education: Publishing House of SPbGPU. - St. Petersburg. 2012;1:81-84.

5. Fedotov AI, Vagapov GV. Optimization of electricity costs for production facilities with long-term operation. *Industrial energy*. 2010;10:2-6.

6. Nurbosynov DN, Tabachnikova TV, Shvetskova LV, et al. *Simulation Model for the Electrical Engineering Complex of a Producing Well with a Screw Pump Unit*. 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976627. Electronic ISBN: 978-1-7281-6700-8. Print on Demand(PoD).

7. Belyaev NA, Korovkin NV, Frolov O.V, Chudnyi VS. Methods for optimization of Power-System operation modes. *Russian Electrical Engineering*. 2013;2:74-80.

8. Shafikov IN, Gizatullin FA., Khakimyanov MI. *Analysis of losses in the cable line of well submersible electric motor*. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. 4 p.

9. Shafikov IN, Khakimyanov MI, Sem-isynov RA, et al. Monitoring of sucker-rod pump units as a result of the analysis wattmeter cards. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017;801:6.

10. Tabachnikova TV. Development of structure of an adaptive control system for energy parameters in a distribution electrical network. Collection of scientific papers of Angarsk State Technical University. Angarsk: Publishing house of AGTU. 2016. pp. 227-232.

11. Tabachnikova TV, Starikov AV, Kosorlukov IA. Calculation of the Rotation Speed of a Submersible Induction Motor for the Tasks of Determining the Optimal Value of the Supply Voltage. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). doi: 10.1109/FarEastCon50210. 2020.9271308.

12. Tabachnikova TV, Nurbosynov DN, Shvetskova LV. Optimization of the electromagnetic

moment of process of starting and self-starting electric drive of producing well during extraction of viscous and high-viscosity oil. *Industrial power engineering*. 2015;10:25-29.

13. Tabachnikova TV, Makht AD, Nurbosynov ED. *Analytical studies of transformers operating modes in supply and distribution electric network of a field substation*. International Scientific Electric Power Conference. 2019. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 643 (2019) 012090. doi:10.1088/1757-899X/643/1/012090.

14. Tabachnikova T.V. Development of a simulation model of group start-up of electric drives of an electrotechnical complex of a producing well. *Industrial power engineering*. 2018;2:2-6

15. Tabachnikova TV, Nurbosynov DN, Ivanov FA, et al. Development of a simulation model of distribution electrical network of electrical substations of oil production enterprises connected by a recloser. *Industrial power engineering*. 2018;5:9-14.

16. Starikov AV, Lisin SL, Tabachnikova TV, et al. Linearized mathematical model of a submersible asynchronous motor. *Bulletin of Samara State Technical University*. Series "Technical Sciences. 2019;4 (64):155-167.

17. Zhidkov EO, Katysheva EG. Instrumental use of an intelligent field for purpose of risk management and cost optimization when drilling oil wells. *Clusterization of digital economy: global challenges*. 2020. pp .98-111.

18. Bykova VN, Kim E, Gadzhialiev M.R. et al. Application of digital double in oil and gas industry. *Actual problems of oil and gas*. 2020;1(28):1-11.

19. Wanasinghe TR, Wroblewski L, Petersen BK. et al. *Digital twin for the oil and gas industry: Overview, research trends, opportunities, and challenges*. IEEE Access. 2020;8:104175-104197. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998723.

20. LaGrange E. *Developing a digital twin: The roadmap for oil and gas optimization*. SPE Offshore Europe Conference and Exhibition, 3-6 Sept. 2019, Aberdeen, UK, 2019. doi:10.2118/195790-MS.

Authors of the publication

Gracheva Elena Ivanovna – Kazan State Energy University, Kazan.

Tabachnikova Tatiana Vladimirovna – Almeteyevsk State Petroleum Institute, Almeteyevsk.

Shvetskova Lyudmila Viktorovna – Almeteyevsk State Petroleum Institute, Almeteyevsk.

Получено **06.10.2021г.**

Отредактировано **13.10.2021г.**

Принято **14.10.2021г.**