

УДК 621.3.078

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ
НАПРЯЖЕНИЯ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДСТАНЦИИ*****А.В. Стариков¹, Т.В. Табачникова², А.А. Казанцев¹, И.А. Косорлуков¹**¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244²Альметьевский государственный нефтяной институт
Россия, 423450, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, 2

E-mail: star58@mail.ru, tvtab@mail.ru, kazantzev@63.ru, kosorlukov@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена повышению энергетической эффективности механизированной добычи за счет выбора оптимального уровня напряжения на промышленной подстанции, обеспечивающего требуемый критерий оптимизации. Рассмотрена неразветвленная отходящая от промышленной подстанции линия, осуществляющая питание произвольного количества электротехнических комплексов добывающих скважин. Показано, что эти комплексы могут содержать как погружные центробежные насосы, так и штанговые скважинные насосные установки, приводимые в действие асинхронными двигателями. Математические модели электротехнических комплексов добывающих скважин являются нелинейными и описываются дифференциальными уравнениями высокого порядка. Поэтому задачу поиска оптимального уровня напряжения промышленной подстанции можно решить только с помощью численных методов. Разработан алгоритм расчета оптимальной величины напряжения, учитывающий технологические особенности механизированной добычи нефти. Он представляет собой поисковый алгоритм, содержащий три внутренних цикла: вариации напряжения на самом удаленном от промышленной подстанции асинхронном двигателе, перебора узлов отходящей линии и уравнивания напряжения в узлах при изменении нагрузки электротехнических комплексов добывающих скважин. Приведены известные аналитические выражения для расчета активной, реактивной и полной нагрузки повышающих и понижающих трансформаторов, применяемых в рассматриваемых электротехнических комплексах, а также потерь мощности на этих элементах и на воздушных и кабельных линиях. Отличительной особенностью представленного алгоритма является расчет скорости погружных и наземных асинхронных двигателей при изменении напряжения питания с учетом механических характеристик центробежных и плунжерных насосов. Приведен пример расчета оптимальной величины напряжения промышленной подстанции, питающей гипотетическую отходящую линию с тремя узлами. Отмечено, что разработанный алгоритм представляет собой отражение методики выбора оптимального напряжения промышленной подстанции. Причем этот алгоритм

* Стариков Александр Владимирович, заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика», д.т.н., профессор.

Табачникова Татьяна Владимировна, заведующий кафедрой «Электро- и теплоэнергетика», к.т.н., доцент.

Казанцев Александр Андреевич, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Косорлуков Игорь Андреевич, докторант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика», к.т.н.

может быть адаптирован под любую отходящую линию, какой бы сложной и разветвленной она ни была.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, регулирование напряжения, погружной насос, погружной электродвигатель, удельное потребление электроэнергии.

Повышение энергетической эффективности механизированной добычи нефти является актуальной задачей, позволяющей минимизировать потребление электрической энергии на кубометр поднятой на поверхность жидкости. Пути решения этой задачи разнообразны и включают в себя энергоэффективный дизайн погружной установки [1, 2], разработку насосов, электродвигателей и трансформаторов с большим коэффициентом полезного действия, компенсацию потребляемой реактивной мощности [3] и другие направления [4, 5].

Целью проводимого исследования является решение задачи выбора оптимального значения напряжения промышленной подстанции (ПС), обеспечивающего минимум энергетических затрат при механизированной добыче нефти.

Рассмотрим отходящую от промышленной ПС линию, питающую электротехнические комплексы добывающих скважин (ЭКДС) (рис. 1).

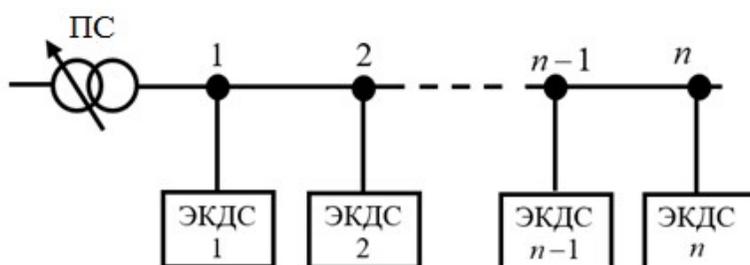


Рис. 1. Неразветвленная отходящая линия электротехнического комплекса добывающих скважин с произвольным числом узлов

Предположим, что отходящая линия нефтяного промысла является неразветвленной и содержит n узлов, к которым подключены ЭКДС, оснащенные погружными центробежными или штанговыми скважинными насосами.

В приводе центробежных насосов в основном применяются погружные электродвигатели (ПЭД), как правило, асинхронные [6]. Штанговые скважинные насосы оснащаются наземными асинхронными двигателями (АД) со стандартным напряжением 0,4 кВ (380 В). В отличие от этого все ПЭД являются высоковольтными с нестандартным номинальным напряжением. Поэтому электротехнический комплекс с погружным центробежным насосом включает в себя повышающий с 0,4 кВ до необходимого напряжения трансформатор, например типа ТМПН. Поскольку напряжение на выходе промышленной ПС, как правило, составляет 6 или 10 кВ, то в составе всех ЭКДС имеются понижающие до 0,4 кВ трансформаторы. Особенность погружных центробежных насосов заключается также в наличии кабеля большой длины, который соединяет ПЭД с повышающим трансформатором. Потери мощности на этом кабеле достигают существенных значений, поэтому перспективной тенденцией в настоящее время является установка на погружной двигатель конденсаторного устройства компенсации реактивной мощности, снижающего величину полного потребляемого тока.

Асинхронные двигатели, приводящие в движение насосы, потребляют как активную, так и реактивную мощность, причем зависимость потребляемой мощности от напряжения питания является существенно нелинейной. Поэтому вариация напряжения на выходе промышленной ПС приводит к изменению скорости вращения электродвигателей, производительности насосов, потребляемой активной и реактивной мощности, потерь в воздушных и кабельных линиях и трансформаторах. Нелинейной также является зависимость реактивной мощности, вырабатываемой конденсаторами, предназначенными для компенсации реактивной мощности. В связи с этим можно предположить, что существует такое напряжение промышленной подстанции, которое доставит минимум какому-либо энергетическому показателю.

Однако следует учитывать, что асинхронный двигатель описывается системой пяти нелинейных дифференциальных уравнений [7–14], аналитического решения которых принципиально не существует. Поэтому даже для выбора оптимального уровня напряжения питания одного двигателя необходимо пользоваться численными методами расчета. Задача определения оптимальной величины напряжения промышленной ПС еще более усложняется тем, что к одной отходящей линии может быть подключено 10 и более скважин и количество решаемых одновременно уравнений существенно возрастает. Поэтому принципиально расчет оптимальной величины напряжения на выходе промышленной подстанции должен производиться численными методами с привлечением того или иного программного продукта.

Для решения поставленной задачи был разработан алгоритм выбора оптимального напряжения промышленной ПС, питающей отходящую линию с ЭКДС (рис. 2). Алгоритм универсален, поскольку он позволяет удовлетворить любому выбранному критерию оптимизации с учетом особенности технологического процесса механизированной добычи нефти. Представленный алгоритм отражает методику расчета оптимального напряжения промышленной ПС, питающей отходящую линию, к которой подключены электротехнические комплексы добывающих скважин.

Исходными данными для расчета являются: количество узлов n ; производительности $Q_1 - Q_n$ насосов при номинальной скорости двигателей; коэффициенты $k_{M1} - k_{Mn}$ или $k_{M2.1} - k_{M2.n}$ механической характеристики 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 $\omega_{01} - \omega_{0n}$ и номинальные скорости $\omega_{ном1} - \omega_{номn}$ вращения двигателей; номинальные значения моментов двигателей $M_{ном1} - M_{номn}$, $M_{ном1} - M_{номn}$; 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 $\Delta U_{1step.n}$; 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 двигателей по отношению к изменению напряжения статора $k_{\partial y 1}^{U1} - k_{\partial y n}^{U1}$; паспортные данные повышающих и понижающих трансформаторов $S_{ном.ТМПН1} - S_{ном.ТМПНn}$; $U_{ном.ТМПН1} - U_{ном.ТМПНn}$; $\Delta P_{xx.ТМПН1} - \Delta P_{xx.ТМПНn}$; $\Delta P_{кз.ТМПН1} - \Delta P_{кз.ТМПНn}$; $\Delta Q_{xx.ТМПН1} - \Delta Q_{xx.ТМПНn}$; $\Delta Q_{кз.ТМПН1} - \Delta Q_{кз.ТМПНn}$; $k_{ТМПН1} - k_{ТМПНn}$; $S_{ном.nm1} -$

$S_{ном.лпн}$; $U_{ном.лп1} - U_{ном.лпн}$; $\Delta P_{ном.лп1} - \Delta P_{ном.лпн}$; $\Delta P_{кз.лп1} - \Delta P_{кз.лпн}$; $\Delta Q_{хх.лп1} - \Delta Q_{хх.лпн}$; $\Delta Q_{кз.лп1} - \Delta Q_{кз.лпн}$; $U_{к.лп1, \%} - U_{к.лпн, \%}$; $k_{лп1} - k_{лпн}$; активные и индуктивные сопротивления кабельных линий $R_{кз1} - R_{кзн}$, $X_{кз1} - X_{кзн}$; активные и индуктивные сопротивления воздушных линий $R_{л1} - R_{лн}$, $X_{л1} - X_{лн}$; активные и индуктивные сопротивления $R_{лс-1}$, $R_{1-2} - R_{(n-1)-n}$, $X_{лс-1}$, $X_{1-2} - X_{(n-1)-n}$ между узлами отходящей линии; реактивные сопротивления конденсаторных батарей, подключенных к статорным обмоткам асинхронных двигателей $X_{кз1} - X_{кзп}$.

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 $\Delta U_{1n} = 0$ и находится напряжение на самом удаленном двигателе, подключенном к n -ому узлу отходящей линии:

$$U_{1n} = U_{1\min.n} + \Delta U_{1n} = U_{1\min.n}. \quad (1)$$

То есть на первом шаге расчетов 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 12. Если электродвигатель $(n - q)$ -го узла является погружным, то мы переходим к блоку 13.

Поэтому в блоке 13 производится последовательный расчет скорости вращения ПЭД [15]

$$\omega_{(n-q)} = \frac{-M_{ном(n-q)} \sqrt{M_{ном(n-q)}^2 + 4k_{M(n-q)} \left(\omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1} \Delta U_{1(n-q)} \right) \times \left[M_{ном(n-q)} \omega_{0(n-q)} - \left(\omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1} \Delta U_{1(n-q)} \right) M_{0(n-q)} \right]}}{2k_{M(n-q)} \left(\omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1} \Delta U_{1(n-q)} \right)}; \quad (2)$$

фактического скольжения ротора

$$s_{(n-q)} = \frac{\omega_{0(n-q)} - \omega_{(n-q)}}{\omega_{0(n-q)}}; \quad (3)$$

потребляемой этим двигателем активной

$$P_{ПЭД(n-q)} = \frac{k_{M(n-q)} \omega_{(n-q)}^3 + M_{0(n-q)} \omega_{(n-q)}}{\eta_{(n-q)}} \quad (4)$$

и реактивной [16] мощности

$$Q_{ПЭД(n-q)} = 3U_{1(n-q)}^2 \left[\frac{s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}}{R_{2\Gamma(n-q)}^2 + s_{(n-q)}^2 X_{k(n-q)}^2} + \frac{U_{1(n-q)}^v}{X_{m(n-q)}} - \frac{1}{X_{кз(n-q)}} \right]; \quad (5)$$

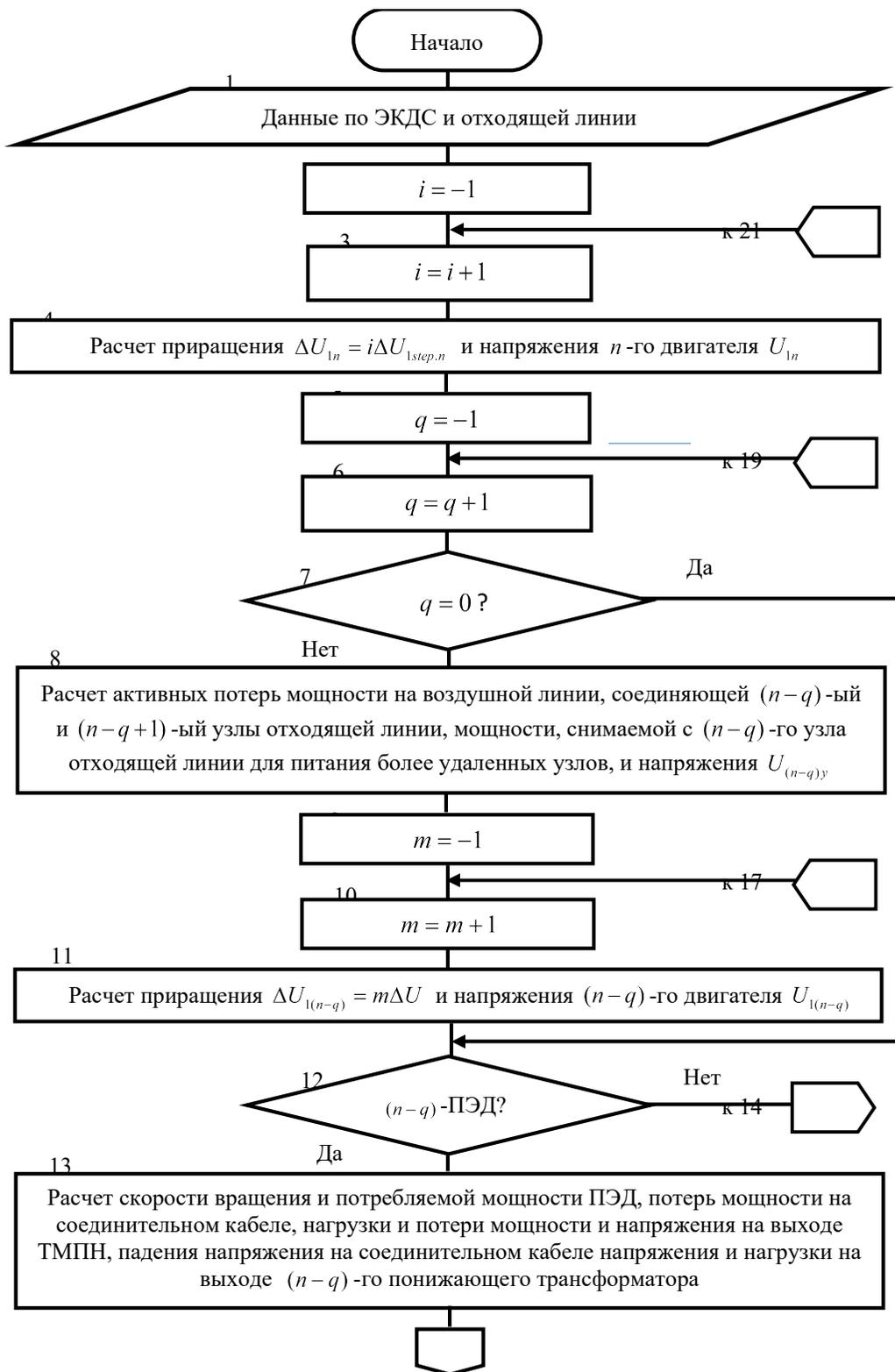


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной ПС, питающей отходящую линию с ЭКДС (начало)

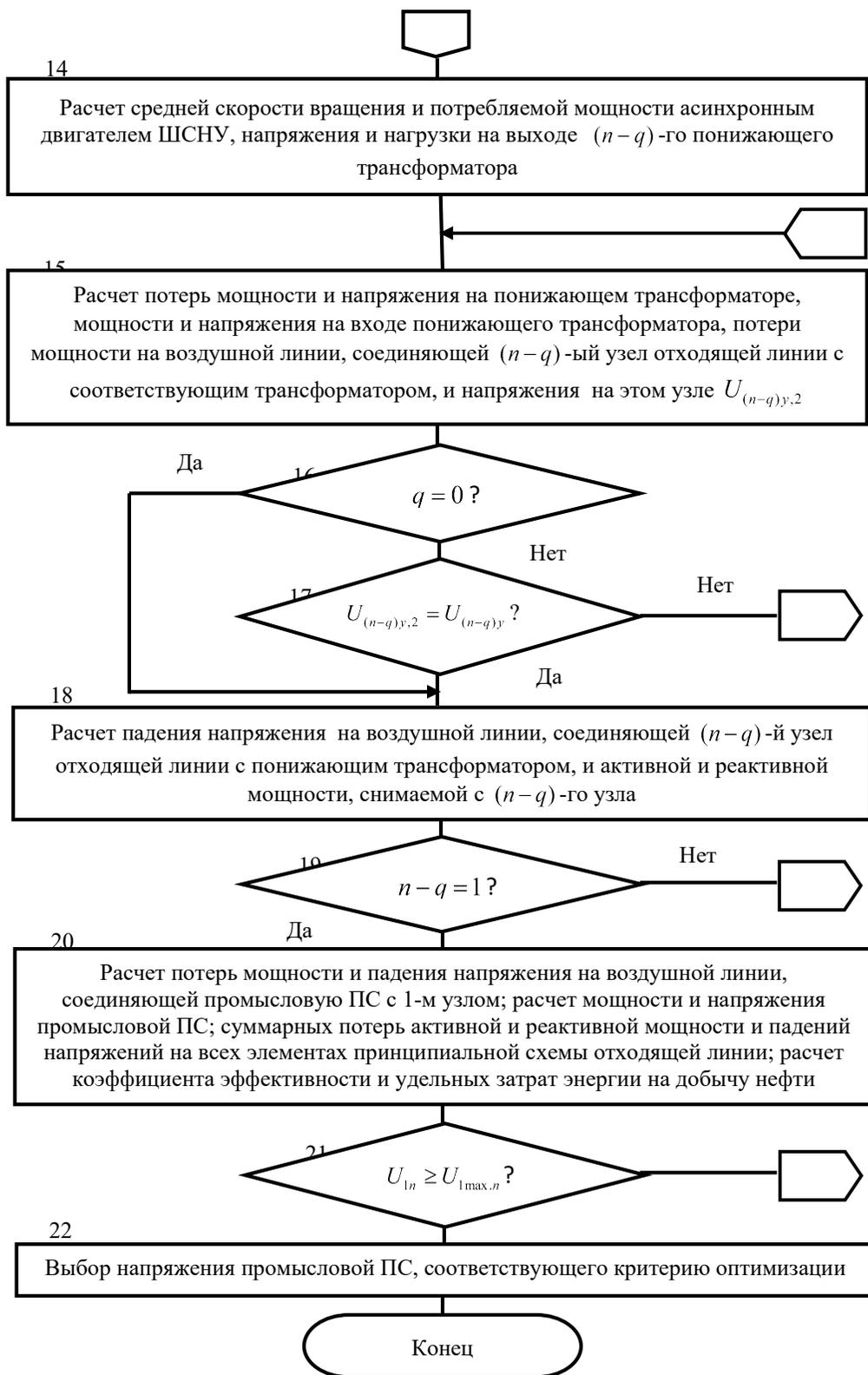


Рис. 2. Алгоритм расчета оптимального напряжения промышленной ПС, питающей отходящую линию с ЭКДС (окончание)

потерь активной и реактивной мощности на соединительном кабеле [16]

$$\Delta P_{\kappa\lambda(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2) R_{\kappa\lambda(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}, \quad (6)$$

$$\Delta Q_{\kappa\lambda(n-q)} = \frac{(P_{ПЭД(n-q)}^2 + Q_{ПЭД(n-q)}^2) X_{\kappa\lambda(n-q)}}{3U_{1(n-q)}^2}. \quad (7)$$

В блоке 13 также рассчитывается активная, реактивная и полная нагрузка, снимаемая с выхода повышающего трансформатора

$$P_{ТМПН(n-q)} = P_{ПЭД(n-q)} + \Delta P_{\kappa\lambda(n-q)}, \quad (8)$$

$$Q_{ТМПН(n-q)} = Q_{ПЭД(n-q)} + \Delta Q_{\kappa\lambda(n-q)}, \quad (9)$$

$$S_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{P_{ТМПН(n-q)}^2 + Q_{ТМПН(n-q)}^2}; \quad (10)$$

напряжение $U_{ТМПН(n-q)}$ на выходе ТМПН

$$U_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{\left(\sqrt{3}U_{1(n-q)} + \frac{P_{ПЭД(n-q)}R_{\kappa\lambda(n-q)} + Q_{ПЭД(n-q)}X_{\kappa\lambda(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2 + \left(\frac{P_{ПЭД(n-q)}X_{\kappa\lambda(n-q)} - Q_{ПЭД(n-q)}R_{\kappa\lambda(n-q)}}{\sqrt{3}U_{1(n-q)}} \right)^2}; \quad (11)$$

падение напряжения на соединительном кабеле

$$\Delta U_{\kappa\lambda(n-q)} = U_{ТМПН(n-q)} - \sqrt{3}U_{1(n-q)}; \quad (12)$$

коэффициент загрузки, потери мощности и падение напряжения на этом трансформаторе

$$\beta_{ТМПН(n-q)} = \frac{S_{ТМПН(n-q)}}{10^3 S_{ном.ТМПН(n-q)}}, \quad (13)$$

$$\Delta P_{ТМПН(n-q)} = 10^3 \left(\Delta P_{xx.ТМПН(n-q)} + \beta_{ТМПН(n-q)}^2 \Delta P_{кз.ТМПН(n-q)} \right), \quad (14)$$

$$\Delta Q_{ТМПН(n-q)} = 10^3 \left(\Delta Q_{xx.ТМПН(n-q)} + \beta_{ТМПН(n-q)}^2 \Delta Q_{кз.ТМПН(n-q)} \right), \quad (15)$$

$$\Delta S_{ТМПН(n-q)} = \sqrt{\Delta P_{ТМПН(n-q)}^2 + \Delta Q_{ТМПН(n-q)}^2}, \quad (16)$$

$$\Delta U_{ТМПН(n-q)} = \frac{R_{ТМПН(n-q)}P_{ТМПН(n-q)} + X_{ТМПН(n-q)}Q_{ТМПН(n-q)}}{k_{ТМПН(n-q)}^2 U_{ТМПН(n-q)}}, \quad (17)$$

где

$$R_{ТМПН(n-q)} = \frac{10^3 \Delta P_{кз.ТМПН(n-q)} U_{ном.ТМПН(n-q)}^2}{S_{ном.ТМПН(n-q)}^2};$$

$$X_{ТМПН(n-q)} = 10U_{к.ТМПН(n-q),\%} \frac{U_{ном.ТМПН(n-q)}^2}{S_{ном.ТМПН(n-q)}}.$$

Затем расчет переходит в блок 15, в котором определяется напряжение

$$U_{2nm(n-q)} = \frac{U_{ТМПН(n-q)}}{k_{ТМПН(n-q)}} + \Delta U_{ТМПН(n-q)} \quad (18)$$

на выходе $(n - q)$ -го понижающего трансформатора, обеспечивающего требуемое напряжение $U_{1n} = U_{1\min.n} + \Delta U_{1n} = U_{1\min.n}$ на статоре ПЭД, и активная, реактивная и полная нагрузка понижающего трансформатора

$$P_{2nm(n-q)} = P_{ТМПН(n-q)} + \Delta P_{ТМПН(n-q)}, \quad (19)$$

$$Q_{2nm(n-q)} = Q_{ТМПН(n-q)} + \Delta Q_{ТМПН(n-q)}, \quad (20)$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{2nm(n-q)}^2 + Q_{2nm(n-q)}^2}. \quad (21)$$

Если асинхронный двигатель самого удаленного насоса принадлежит ШСНУ, то расчет происходит по другой ветви представленного алгоритма и из блока 12 мы переходим в блок 14, где определяется средняя скорость $\omega_{(n-q)}$ двигателя за период качания

$$\omega_{(n-q)} = \frac{M_{ном(n-q)}\omega_{0(n-q)} - M_{0(n-q)}(\omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1}\Delta U_{1(n-q)})}{M_{ном(n-q)} + k_{M2(n-q)}(\omega_{0(n-q)} - \omega_{ном(n-q)} - k_{\partial y(n-q)}^{U_1}\Delta U_{1(n-q)})}. \quad (22)$$

Затем в блоке 14 происходит последовательное вычисление среднего скольжения $S_{(n-q)}$, потребления двигателем ШСНУ активной $P_{АД(n-q)}$ и реактивной $Q_{АД(n-q)}$ мощности по формулам с точностью до обозначения, повторяющим выражения (3) – (5). Далее в этом же блоке происходит расчет напряжения и нагрузки понижающего трансформатора

$$U_{2nm(n-q)} = \sqrt{3}U_{1(n-q)}, \quad (23)$$

$$P_{2nm(n-q)} = P_{АД(n-q)}, \quad (24)$$

$$Q_{2nm(n-q)} = Q_{АД(n-q)}, \quad (25)$$

$$S_{2nm(n-q)} = \sqrt{P_{АД(n-q)}^2 + Q_{АД(n-q)}^2}. \quad (26)$$

Из блоков 13 и 14 алгоритм приводит нас в блок 15, в котором по формулам с точностью до обозначения, повторяющим выражения (13) – (16), 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 понижающем трансформаторе. В блоке 15 также определяются активная, реактивная и полная мощность на входе понижающего трансформатора и падение напряжения на нем:

$$P_{1nm(n-q)} = P_{2nm(n-q)} + \Delta P_{nm(n-q)}, \quad (27)$$

$$Q_{1nm(n-q)} = Q_{2nm(n-q)} + \Delta Q_{nm(n-q)}, \quad (28)$$

$$S_{1nm(n-q)} = \sqrt{P_{1nm(n-q)}^2 + Q_{1nm(n-q)}^2}, \quad (29)$$

$$\Delta U_{nm(n-q)} = \frac{R_{nm(n-q)}P_{nm(n-q)} + X_{nm(n-q)}Q_{nm(n-q)}}{k_{nm(n-q)}^2 U_{nm(n-q)}}, \quad (30)$$

$$\text{где } R_{nm(n-q)} = \frac{10^3 \Delta P_{кз.нм(n-q)} U_{ном.нм(n-q)}^2}{S_{нм(n-q)}^2}; \quad X_{nm(n-q)} = 10U_{к.нм(n-q),\%} \frac{U_{ном.нм(n-q)}^2}{S_{ном.нм(n-q)}}.$$

Далее в блоке 15 находится напряжение $U_{1nm(n-q)}$ на входе понижающего трансформатора

$$U_{1nm(n-q)} = U_{2nm(n-q)} k_{nm(n-q)} + \Delta U_{nm(n-q)}, \quad (31)$$

потери активной $\Delta P_{л(n-q)}$ и реактивной $\Delta Q_{л(n-q)}$ мощности на воздушной линии, соединяющей $(n-q)$ -й узел отходящей линии с соответствующим трансформатором, и напряжение $U_{(n-q)y,2}$ на этом узле:

$$\Delta P_{л(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 R_{л(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}, \quad (32)$$

$$\Delta Q_{л(n-q)} = \frac{S_{1nm(n-q)}^2 X_{л(n-q)}}{U_{1nm(n-q)}^2}, \quad (33)$$

$$U_{(n-q)y,2} = \sqrt{\left(U_{1mn(n-q)} + \frac{P_{1mn(n-q)} R_{л(n-q)} + Q_{1mn(n-q)} X_{л(n-q)}}{U_{1mn(n-q)}} \right)^2 + \left(\frac{P_{1mn(n-q)} X_{л(n-q)} - Q_{1mn(n-q)} R_{л(n-q)}}{U_{1mn(n-q)}} \right)^2}. \quad (34)$$

Если идет первый шаг цикла узлов, то есть $q = 0$, то в алгоритме расчета происходит переход в блок 18, где производится расчет падения напряжения $\Delta U_{л(n-q)}$ на воздушной линии, соединяющей $(n-q)$ -й узел отходящей линии с понижающим трансформатором:

$$\Delta U_{л(n-q)} = U_{(n-q),2} - U_{1mn(n-q)}. \quad (35)$$

Затем в блоке 18 находится активная и реактивная мощность, снимаемая с $(n-q)$ -го узла:

$$P_{(n-q)} = P_{(n-q+1)} + P_{1nm(n-q)} + \Delta P_{л(n-q)}, \quad (36)$$

$$Q_{(n-q)} = Q_{(n-q+1)} + Q_{1nm(n-q)} + \Delta Q_{л(n-q)}, \quad (37)$$

и поскольку на первом шаге цикла узлов $(n-q) \neq 1$, то в алгоритме расчета оптимального напряжения промышленовой ПС происходит переход в блок 6, где начинается новый шаг в цикле узлов. В этом случае $q \neq 0$, поэтому в блоке 8 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 $(n-q)$ -й и $(n-q+1)$ -й узлы отходящей линии:

$$\Delta P_{л(n-q),(n-q+1)} = \frac{(P_{(n-q+1)}^2 + Q_{(n-q+1)}^2) R_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}^2}, \quad (38)$$

$$\Delta Q_{л(n-q),(n-q+1)} = \frac{(P_{(n-q+1)}^2 + Q_{(n-q+1)}^2) X_{л(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}^2}. \quad (39)$$

Далее в блоке 8 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, и напряжение $U_{(n-q)y}$ на узле с номером $(n-q)$:

$$P_{(n-q),(n-q+1)} = P_{(n-q+1)} + \Delta P_{л(n-q),(n-q+1)}, \quad (40)$$

$$Q_{(n-q),(n-q+1)} = Q_{(n-q+1)} + \Delta Q_{л(n-q),(n-q+1)}, \quad (41)$$

$$U_{(n-q)y} = \sqrt{\left(U_{(n-q+1)} + \frac{P_{(n-q+1)} R_{l(n-q),(n-q+1)} + Q_{(n-q+1)} X_{l(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}} \right)^2 + \left(\frac{P_{(n-q+1)} X_{l(n-q),(n-q+1)} - Q_{(n-q+1)} R_{l(n-q),(n-q+1)}}{U_{(n-q+1)}} \right)^2}. \quad (42)$$

Затем алгоритм расчета переходит в блок 9, где переменной m присваивается начальное значение $m = -1$, после чего в блоке 10 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 блоке 11 рассчитывается в зависимости от величин m и ΔU значение фазного напряжения на статоре $(n - q)$ -го асинхронного двигателя:

$$U_{1(n-q)} = U_{\min.(n-q)} + m\Delta U. \quad (43)$$

Далее вычислительные процедуры переходят в блок 12 и повторяются те же самые расчеты, которые были при $q = 0$. Единственная отличительная особенность вычислений при $q \neq 0$ заключается в том, что после блока 16 происходит переход в блок 17, где сравниваются значения $U_{(n-q)y,2}$ с $U_{(n-q)y}$. Если они не совпадают, то опять происходит переход в блок 10 и повторяются все расчеты, пока $U_{(n-q)y,2}$ 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 18 и 19, и затем циклы узлов и подбора напряжения на статоре $(n - q)$ -го асинхронного двигателя повторяются до тех пор, пока в блоке 19 не зафиксируется значение $(n - q) = 1$, подтверждающее, что расчеты по всем узлам отходящей линии завершены.

После этого алгоритм приводит нас в блок 20, где происходит последовательный расчет активных $\Delta P_{ПС}$ и реактивных $\Delta Q_{ПС}$ потерь мощности на воздушной линии, соединяющей промышленную ПС питания с 1-м узлом отходящей линии, активной $P_{ПС}$, реактивной $Q_{ПС}$ и полной $S_{ПС}$ мощности и напряжения $U_{ПС}$ промышленной ПС:

$$\Delta P_{ПС} = \frac{(P_1^2 + Q_1^2) R_{ПС-1}}{U_{1y}^2}, \quad (44)$$

$$\Delta Q_{ПС} = \frac{(P_1^2 + Q_1^2) X_{ПС-1}}{U_{1y}^2}, \quad (45)$$

$$P_{ПС} = P_1 + \Delta P_{ПС}, \quad (46)$$

$$Q_{ПС} = Q_1 + \Delta Q_{ПС}, \quad (47)$$

$$S_{ПС} = \sqrt{P_{ПС}^2 + Q_{ПС}^2}, \quad (48)$$

$$U_{ПС} = \sqrt{\left(U_{1y} + \frac{P_1 R_{ПС-1} + Q_{ПС} X_{ПС-1}}{U_{1y}} \right)^2 + \left(\frac{P_1 X_{ПС-1} - Q_1 R_{ПС-1}}{U_{1y}} \right)^2}. \quad (49)$$

Затем в блоке 20 вычисляются падение напряжения

$$\Delta U_{ПС-1} = U_{ПС} - U_{(n-q)y,2} \quad (50)$$

на воздушной линии, соединяющей центр питания с первым узлом, суммарные потери активной ΔP и реактивной ΔQ мощности; сумма падений напряжений ΔU на всех элементах принципиальной схемы отходящей линии. Минимизация этих потерь может выступать в качестве одного из критериев оптимизации.

Однако следует заметить, что вариация напряжения на асинхронных двигателях погружных насосов в соответствии с формулами (2) и (22) приводит к изменению производительности этих насосов и суммарного дебита Q всех скважин, подключенных к рассматриваемой отходящей линии. Суммарный дебит может быть подсчитан по формуле

$$Q = \sum_{k=1}^n \frac{Q_k \omega_k}{\omega_{номk}} \quad (51)$$

Отсюда можно ввести в рассмотрение коэффициент эффективности $k_{эф}$ и удельные затраты энергии E_1 и E_2 , которые также рассчитываются в блоке 20 по формулам

$$k_{эф} = \frac{Q}{P_{ПС}}, \quad (52)$$

$$E_1 = \frac{24P_{ПС}}{Q}, \quad (53)$$

$$E_2 = \frac{24S_{ПС}}{Q}. \quad (54)$$

Далее алгоритм переходит в блок 21, где 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 выполняются все описанные выше расчеты для другого напряжения на статоре самого удаленного двигателя.

После перебора всех возможных значений $U_{1,n}$ с шагом $\Delta U_{1step,n}$ вычислительные процедуры заканчиваются и в блоке 22 происходит выбор оптимального значения напряжения промышленной подстанции, соответствующего требуемому критерию оптимизации.

Отличительная особенность разработанной методики и алгоритма расчета оптимальной величины напряжения промышленной ПС заключается в том, что она учитывает технологические аспекты механизированной добычи нефти, а именно нагрузочные характеристики погружных насосов разных типов.

Процесс вычисления оптимального уровня напряжения легко автоматизируется, поскольку представленный выше алгоритм может быть реализован, например, в программе MathCAD.

Для примера приведем результаты расчета оптимальной величины напряжения на промышленной подстанции для гипотетической отходящей линии нефтяного промысла с количеством узлов $n = 3$. К первому и третьему узлам подключены ЭКДС с центробежными насосами и ПЭД, ко второму – ШСНУ. Рассматриваемые ЭКДС имеют следующие необходимые для расчета параметры:

$$Q_1 = 130 \text{ м}^3/\text{сутки}, \quad Q_2 = 5,8 \text{ м}^3/\text{сутки}, \quad Q_3 = 87 \text{ м}^3/\text{сутки};$$

$$k_{M1} = 1,328 \cdot 10^{-3} \text{ Нмс}^2/\text{рад}, \quad k_{M2,2} = 0,6264 \text{ Нмс}/\text{рад}, \quad k_{M3} = 1,401 \cdot 10^{-3} \text{ Нмс}^2/\text{рад};$$

$$R_{2r1} = R_{2r3} = 1,868 \text{ Ом}, \quad R_{2r2} = 0,075 \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned}
X_{k1} &= X_{k3} = 6,884 \text{ Ом}, X_{k2} = 0,887 \text{ Ом}; \\
X_{m1} &= X_{m3} = 68,414 \text{ Ом}, X_{m2} = 7,646 \text{ Ом}; \\
\omega_{01} &= \omega_{03} = 314,16 \text{ рад/с}, \omega_{02} = 78,54 \text{ рад/с}; \\
\omega_{ном1} &= \omega_{ном3} = 296,88 \text{ рад/с}, \omega_{ном2} = 76,97 \text{ рад/с}; \\
M_{ном1} &= M_{ном3} = 151,58 \text{ Нм}, M_{ном2} = 480,71 \text{ Нм}; \\
M_{0.1} &= M_{0.3} = 8,83 \text{ Нм}, M_{0.2} = 24,04 \text{ Нм}; \\
U_{1\text{min}.1} &= U_{1\text{min}.3} = 727,46 \text{ В}, U_{1\text{min}.2} = 207,85 \text{ В}; \\
\Delta U_{1\text{step}.3} &= 20,207 \text{ В}, \Delta U = 0,01 \text{ В}; U_{1\text{max}.3} = 889,12 \text{ В}; \\
\eta_1 &= \eta_3 = 0,81, \eta_2 = 0,92; \\
k_{\text{дв}1}^{U1} &= k_{\text{дв}3}^{U1} = 0,0511 \text{ рад/Вс}, k_{\text{дв}2}^{U1} = 0,0039 \text{ рад/Вс}; \\
S_{ном.ТМПН1} &= S_{ном.ТМПН3} = 100 \text{ кВА}; \\
U_{ном.ТМПН1} &= U_{ном.ТМПН3} = 0,4 \text{ кВ}; \\
\Delta P_{\text{хх.ТМПН1}} &= \Delta P_{\text{хх.ТМПН3}} = 0,31 \text{ кВт}; \Delta P_{\text{кз.ТМПН1}} = \Delta P_{\text{кз.ТМПН3}} = 2,4 \text{ кВт}; \\
\Delta Q_{\text{хх.ТМПН1}} &= \Delta Q_{\text{хх.ТМПН3}} = 2,2 \text{ кВАр}; \Delta Q_{\text{кз.ТМПН1}} = \Delta Q_{\text{кз.ТМПН3}} = 5,5 \text{ кВАр}; \\
U_{\text{к.ТМПН1},\%} &= U_{\text{к.ТМПН3},\%} = 5,5\%; \\
k_{\text{ТМПН1}} &= k_{\text{ТМПН3}} = 3,65; \\
S_{ном.нм1} &= S_{ном.нм2} = S_{ном.нм3} = 63 \text{ кВА}; \\
U_{ном.нм1} &= U_{ном.нм2} = U_{ном.нм3} = 0,4 \text{ кВ}; \\
\Delta P_{ном.нм1} &= \Delta P_{ном.нм2} = \Delta P_{ном.нм3} = 0,22 \text{ кВт}; \\
\Delta P_{\text{кз.нм1}} &= \Delta P_{\text{кз.нм2}} = \Delta P_{\text{кз.нм3}} = 1,28 \text{ кВт}; \\
\Delta Q_{\text{хх.нм1}} &= \Delta Q_{\text{хх.нм2}} = \Delta Q_{\text{хх.нм3}} = 1,512 \text{ кВАр}; \\
\Delta Q_{\text{кз.нм1}} &= \Delta Q_{\text{кз.нм2}} = \Delta Q_{\text{кз.нм3}} = 2,835 \text{ кВАр}; \\
U_{\text{к.нм1},\%} &= U_{\text{к.нм2},\%} = U_{\text{к.нм3},\%} = 4,5\%; \\
k_{\text{нм1}} &= k_{\text{нм2}} = k_{\text{нм3}} = 15; \\
R_{\text{кл1}} &= 0,994 \text{ Ом}, R_{\text{кл3}} = 1,191 \text{ Ом}; \\
X_{\text{кл1}} &= 0,166 \text{ Ом}, X_{\text{кл3}} = 0,199 \text{ Ом}; \\
R_{\text{л1}} &= 0,248 \text{ Ом}, R_{\text{л2}} = 0,207 \text{ Ом}, R_{\text{л3}} = 0,207 \text{ Ом}; \\
X_{\text{л1}} &= 0,206 \text{ Ом}, X_{\text{л2}} = 0,172 \text{ Ом}, X_{\text{л3}} = 0,172 \text{ Ом}; \\
R_{\text{ПС-1}} &= 1,024 \text{ Ом}, R_{1-2} = 0,449 \text{ Ом}, R_{2-3} = 0,299 \text{ Ом}; \\
X_{\text{ПС-1}} &= 0,828 \text{ Ом}, X_{1-2} = 0,372 \text{ Ом}, X_{2-3} = 0,248 \text{ Ом}.
\end{aligned}$$

Предположим, что погружные асинхронные двигатели оснащены индивидуальными конденсаторными устройствами для компенсации реактивной мощности с реактивными сопротивлениями $X_{\text{кв}1} = X_{\text{кв}3} = 70,771 \text{ Ом}$.

В соответствии с разработанной методикой и алгоритмом произведены расчеты по формулам (1) – (54), результаты которых приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Зависимость потребляемой мощности от промышленной подстанции и суммарных потерь мощности в трансформаторах и кабельных и воздушных линиях от уровня напряжения

$U_{пс}$, В	ΔU_3 , %	ΔP , кВт	ΔQ , кВАр	$P_{пс}$, кВт	$Q_{пс}$, кВАр
5385	-10	8,163	16,762	108,192	55,136
5664	-5	7,925	16,838	109,402	55,893
5804	-2,5	7,823	16,883	110,041	56,161
5944	0	7,731	16,933	110,771	56,365
6089	2,5	7,982	17,443	111,714	68,077
6230	5	7,915	17,52	112,424	68,777
6512	10	7,809	17,693	113,905	70,119

Таблица 2

Зависимость суточной добычи нефти, коэффициента эффективности и удельных затрат электроэнергии от уровня напряжения промышленной подстанции

$U_{пс}$, В	Q , м ³ /сут	$k_{эф} = \frac{Q}{P_{пс}}$, м ³ /сут·кВт	$E_1 = \frac{24P_{пс}}{Q}$, кВт·час/м ³	$S_{пс}$, кВА	$E_2 = \frac{24S_{пс}}{Q}$, кВА·час/м ³
5385	222,194	2,054	11,686	121,431	13,116
5664	223,359	2,042	11,755	122,853	13,201
5804	223,95	2,035	11,793	123,544	13,24
5944	224,546	2,028	11,832	124,224	13,277
6089	225,148	2,015	11,908	130,822	13,945
6230	225,758	2,008	11,952	131,793	14,011
6512	226,994	1,993	12,043	133,757	14,142

Анализ полученных данных позволяет сделать выбор оптимальной величины напряжения промышленной ПС. Если в качестве критерия оптимизации взять минимум активных потерь в трансформаторах и воздушных и кабельных линиях, то оптимальным будет напряжение 5944 В. Если же требуется обеспечить минимум потребления активной, полной мощности и удельного потребления электрической энергии, то оптимальным будет напряжение на промышленной ПС, равное $U_{пс} = 5385$ В.

Приведенный пример расчета соответствует простейшему виду отходящей линии, приведенному на рис. 1. Однако разработанный алгоритм легко адаптируется и под разветвленную отходящую линию, когда к одному узлу подключено несколько ЭКДС. Он также может быть применен и для расчета оптимального напряжения промышленной подстанции, питающей несколько отходящих линий.

Для реализации требуемого оптимального напряжения на промышленных подстанциях должны применяться трансформаторы, позволяющие производить регулировку под нагрузкой. При этом следует учитывать дискретность регулирования напряжения как по уровню, так и по времени.

Выводы

1. Разработанная методика и алгоритм расчета оптимального уровня напряжения на промышленной ПС являются универсальными с позиции обеспечения оптимума по любому возможному энергетическому критерию оптимизации.

2. Алгоритм расчета может быть адаптирован под любую отходящую линию с электротехническими комплексами добывающих скважин, какой бы сложной и разветвленной она ни была.

3. Для повышения энергетической эффективности механизированной добычи нефти необходимо использовать промысловые подстанции с трансформаторами, обеспечивающими регулирование напряжения под нагрузкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тарасов В.П.* Энергосберегающий дизайн УЭЦН // Инженерная практика. – 2010. – № 3. – С. 26–32.
2. *Мартюшев Д.Н.* Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН // Инженерная практика. – 2011. – № 6. – С. 72–77.
3. *Табачникова Т.В.* Индивидуальная компенсация реактивной мощности электротехнического комплекса добывающей скважины с электроцентробежным насосом / Т.В. Табачникова, Р.И. Гарифуллин, Э.Д. Нурбосынов, А.В. Махт // Промышленная энергетика. – 2015. – № 2. – С. 44–47.
4. *Ивановский В.Н.* Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // Инженерная практика. – 2011. – № 6. – С. 18–26.
5. *Афанасьев Н.В.* Совершенствование режима напряжения и электропотребления в условиях предприятий нефтедобычи / Н.В. Афанасьев, И.А. Чернявская, Д.Н. Нурбосынов // Нефть Татарстана. – 1999. – № (1–2). – С. 64–67.
6. Погружное оборудование и комплексный сервис // Технический каталог. – № 3. – М.: ГК «Римера», 2014. – 203 с.
7. *Анучин А.С.* Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
8. *Михайлов О.П.* Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
9. *Соколовский Г.Г.* Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: Академия, 2006. – 265 с.
10. *Стариков А.В.* Линеаризованная математическая модель асинхронного электродвигателя как объекта системы частотного управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2002. – № 16. – С. 175–180.
11. *Галицков С.Я., Галицков К.С., Масляницын А.П.* Динамика асинхронного двигателя: Учеб. пособие. – Самара: СамГАСА, 2004. – 104 с.
12. *Кузнецов В.А., Мигачев А.В., Стариков А.В., Титов А.Р.* Особенности математической модели асинхронного электродвигателя аппаратов воздушного охлаждения масла // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2011. – № 3 (31). – С. 171–179.
13. *Яруллин Р.Б., Линенко А.В.* К вопросу динамической характеристики асинхронного двигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2013. – № 2. Т. 9. – С. 42–46.
14. *Стариков А.В., Лисин С.Л., Табачникова Т.В., Косорлуков И.А., Беляева О.С.* Линеаризованная математическая модель погружного асинхронного двигателя // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 4 (64). – С. 155–167.
15. *Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I.* 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/
16. *Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В.* Основы управления режимами энергосистем по частоте и активной мощности, по напряжению и реактивной мощности: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. – 96 с.

Статья поступила в редакцию 2 августа 2021 г.

ALGORITHM FOR CALCULATING THE OPTIMAL VALUE OF THE FIELD SUBSTATION VOLTAGE*

A.V. Starikov¹, T.V. Tabachnikova², A.A. Kazantsev¹, I.A. Kosorlukov¹

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

²Almetyevsk State Oil Institute
2, Lenin's st., Almetyevsk, Tatarstan, 423450, Russian Federation

E-mail: star58@mail.ru, tvtab@mail.ru, kazantzev@63.ru, kosorlukov@gmail.com

Abstract. *The article is devoted to improving the energy efficiency of mechanized mining by selecting the optimal voltage level at the field substation, which provides the required optimization criterion. An unbranched line extending from the field substation, which supplies an arbitrary number of electrical complexes of producing wells, is considered. It is shown that these complexes can contain both submersible centrifugal pumps and rod borehole pumping units driven by asynchronous motors. Mathematical models of electrical complexes of producing wells are nonlinear and are described by high-order differential equations. Therefore, the problem of finding the optimal voltage level of a field substation can only be solved using numerical methods. An algorithm for calculating the optimal voltage value is developed, taking into account the technological features of mechanized oil production. It is a search algorithm that contains three internal cycles: voltage variations at the asynchronous motor farthest from the field substation, sorting out the nodes of the outgoing line, and equalizing the voltage at the nodes when the load of the electrical complexes of the producing wells changes. Well-known analytical expressions are given for calculating the active, reactive and full load of step-up and step-down transformers used in the considered electrical complexes, as well as power losses on these elements and on air and cable lines. A distinctive feature of the presented algorithm is the calculation of the speed of submersible and ground asynchronous motors when the supply voltage changes, taking into account the mechanical characteristics of centrifugal and plunger pumps. An example of calculating the optimal voltage value of a field substation feeding a hypothetical outgoing line with three nodes is given. It is noted that the developed algorithm is a reflection of the method of choosing the optimal voltage of the field substation. Moreover, this algorithm can be adapted to any outgoing line, no matter how complex and branched it is.*

Keywords: *energy efficiency, voltage regulation, submersible pump, submersible electric motor, specific power consumption.*

REFERENCES

1. *Tarasov V.P.* Energy-saving design of ESP // Engineering practice. 2010. No. 3. P. 26–32.
2. *Martyushev D.N.* An integrated approach to energy efficiency in oil production ESP // Engineering practice. 2011. No. 6. P. 72–77.
3. *Tabachnikova T.V.* Individual compensation of reactive power of the electrical complex of a production well with an electric centrifugal pump / T.V. Tabachnikova, R.I. Garifullin, E. D. Nurbosynov, A.V. Macht // Monthly production and technical journal "Industrial Energy". 2015. No. 2. P. 44–47.

* *Alexander V. Starikov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*
Tatyana V. Tabachnikova (Ph. D. (Techn.)), Associate Professor.
Alexander A. Kazantsev, Senior Lecturer.
Igor A. Kosorlukov (Ph. D. (Techn.)), Doctoral Student.

4. *Ivanovsky V.N.* Oil production energy: main directions of energy consumption optimization // Engineering practice. 2011. No. 6. P. 18–26.
5. *Afanasyev N.V., Chernyavskaya I.A., Nurbosynov D.N.* Improvement of the voltage regime and power consumption in the conditions of oil production enterprises // Oil of Tatarstan. 1999. No. (1–2). P. 64–67.
6. Submersible equipment and integrated service // Technical catalog No. 3. Moscow: Rimera Group of Companies, 2014. 203 p.
7. *Anuchin A.S.* Electric drive control systems. M.: Publishing house MEI, 2015. 373 p.
8. *Mikhailov O.P.* Automated electric drive of machine tools and industrial robots. M.: Mashinostroenie, 1990. 304 p.
9. *Sokolovsky G.G.* AC electric drives with frequency regulation. M.: Academy, 2006. 265 p.
10. *Starikov A.V.* Linearized mathematical model of an asynchronous electric motor as an object of a frequency control system // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Physics and Mathematics", 2002, Issue 16. Pp. 175–180.
11. *Galitskov S.Ya., Galitskov K.S., Maslyanitsyn A.P.* Dynamics of an induction motor: a tutorial. Samara: SamGASA, 2004. 104 p.
12. *Kuznetsov V.A., Migachev A.V., Starikov A.V., Titov A.R.* Features of the mathematical model of an asynchronous electric motor for oil air coolers // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences", 2011, No. 3 (31). S. 171–179.
13. *Yarullin R.B., Lilenko A.V.* On the question of the dynamic characteristics of an asynchronous motor // Electrical and information complexes and systems. 2013. No. 2, v. 9. P. 42–46.
14. *Starikov A.V., Lisin S.L., Tabachnikova T.V., Kosorlukov I.A., Belyaeva O.S.* Linearized mathematical model of a submersible induction motor // Bulletin of the Samara State Technical University. Series "Technical Sciences", 2019. No. 4 (64). P. 155–167.
15. *Starikov A., Tabachnikova T., Kosorlukov I.* 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/
16. *Weinstein R.A., Kolomiets N.V., Shestakov V.V.* Fundamentals of control of modes of power systems by frequency and active power, by voltage and reactive power: textbook. Tomsk: Publishing house of the Tomsk Polytechnic University, 2010. 96 p.