

Богачков И.М.¹, Хамитов Р.Н.², Валиев М.К.³

¹ ООО «Газпром проектирование», Тюменский филиал, г. Тюмень

² Омский государственный технический университет

³ ООО «НОВАТЭК Научно-технический центр», г. Тюмень

ПУТИ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В настоящее время большинство газовых месторождений Западной Сибири находится на завершающей стадии разработки. Расчетная электрическая нагрузка одного куста газовых скважин в период нарастающей и постоянной добычи газа составляет 100 кВт. Для продления рентабельной добычи газа на завершающей стадии применяются энергоемкие технологии, например технология распределенного компримирования газа с установкой на кустах газовых скважин мобильных компрессорных установок (МКУ) с электроприводом мощностью 1000 кВт. В результате электрическая нагрузка на газовом месторождении возрастает многократно, что приводит к необходимости строительства новых линий электропередачи. Например, на Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении требуется построить 480 км высоковольтных линий класса напряжения 10 кВ для подключения МКУ. На данный момент проектирование системы электроснабжения газовых месторождений и выбор класса напряжения выполняются как для сетевой организации региона и не учитывается особенность газовых месторождений – многократный рост электрической нагрузки в течение всего жизненного цикла месторождения (в среднем он составляет 60 лет). Таким образом, главной проблемой электроэнергетики газовой промышленности является выбор оптимального класса напряжения системы электроснабжения с учетом всего жизненного цикла месторождения. Цель исследования – выбрать подход для разработки нового способа выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений. Для достижения поставленной цели в работе выполнен анализ существующих способов выбора класса напряжения системы электроснабжения. В результате анализа установлено, что для разработки нового способа выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений наиболее близким является подход с использованием теории планирования эксперимента, с учетом следующих факторов, характерных для газовой промышленности: количество установок комплексной подготовки газа на месторождении; коэффициент прироста электрической нагрузки; коэффициент распределения нагрузки по линии электропередачи; расстояние от источника до потребителя. Для достижения поставленной цели в работе используется экспериментально-теоретический метод (анализ и синтез).

Ключевые слова: класс напряжения, система электроснабжения, линия электропередачи, теория планирования эксперимента, целевая функция, дисконтируемые затраты.

ВВЕДЕНИЕ

Основное требование, предъявляемое к системе электроснабжения потребителей, – обеспечение бесперебойности (надежности) питания и соответствующего качества напряжения.

В связи с этим при разработке системы электроснабжения газовых месторождений, помимо расчета электрических нагрузок и выбора мощности трансформаторов, выполняется выбор класса напряжения системы электроснабжения, к которой относятся питающие и распределительные сети.

Выбор класса напряжения является одним из основных параметров оптимизации системы электроснабжения и определяет технические параметры трансформаторных подстанций, линий электропередачи, а следовательно, размер капиталовложений, эксплуатационных затрат, а также возможность дальнейшего развития месторождения при росте электрических нагрузок [1, 2].

На сегодняшний день способы выбора оптимального класса напряжения для системы электроснабжения газовых месторождений с учетом прогнозируемого роста электрических нагрузок в процессе всего жизненного цикла отсутствуют.

ТЕОРИЯ

Согласно СТО Газпром НТП 1.8-001-2004 [3], при проектировании системы электроснабжения новых газовых месторождений для распределения электроэнергии по площадкам объектов рекомендуется применять класс напряжения 10 кВ. Выбор класса напряжения 6 кВ должен в каждом отдельном случае быть обоснован технико-экономическим расчетом.

На газовых месторождениях в системе электроснабжения для питающих сетей, как правило, используется средний и высокий класс напряжения – 6, 10, 35, 110 кВ, в распределительных сетях – 6 и 10 кВ. Широкое распространение находят схемы электроснабжения с применением глубоких вводов 20–110 кВ. Для питания и распределения электрической энергии промышленных предприятий и населенных пунктов все больше приобретает популярность класс напряжения 20 кВ.

Системы электроснабжения с классом напряжения 20 кВ реализованы в г. Москве (объекты «Москва-Сити» и «Ходынское поле» [4-6]), на объектах ПАО «Новатэк» (Харбейское нефтегазовое месторождение), а также в системе электроснабжения объектов добычи на объектах ПАО «Газпром».

В работе [7] сделан вывод, что при проектировании новых и реконструкции существующих сетей целесообразно применять класс напряжения 20 кВ в сравнении с 6 и 10 кВ, так как габариты и тип оборудования

для указанных классов напряжения сопоставимы. При этом при переводе класса напряжения участка распределительных сетей с 6(10) на 20 кВ снижаются потери электроэнергии (потери напряжения) при одновременном снижении загрузки линий электропередачи [8].

В работе [9] рассмотрен ряд решений, увеличивающих пропускную способность питающей линии электропередачи центрального пункта сбора нефти Уренгоянского месторождения путем перевода класса напряжения с 6 на 20 кВ.

В статье [10] выполнен технико-экономический анализ вариантов электроснабжения объектов добычи Харбейского нефтегазового месторождения с применением классов напряжения 10, 20 и 35 кВ. По результатам технико-экономического сравнения принят вариант сети с классом напряжения 20 кВ.

В статье [11] отмечается, что существующие системы электроснабжения с классом напряжения 6(10) кВ ставят технический предел использования при росте электрических нагрузок. Использование напряжения 20 кВ в распределительных сетях позволяет не только уменьшить потери в линиях, но и увеличить радиус обслуживания подстанций, кроме того, оно ведет к сокращению числа трансформаций.

Таким образом, выбор класса напряжения питающей и распределительной сети – комплексная задача, требующая учета многих факторов, меняющихся с течением времени.

Вопрос выбора оптимального класса напряжения для промышленных предприятий изучали: проф., д.т.н. Федоров А.А., проф., д.т.н. Мельников Н.А., проф., д.т.н. Константинов Б.А., к.т.н. Солдаткина Л.А., к.т.н. Дехкан А.Р., проф., д.т.н. Черепанов В.В., к.т.н. Суворова И.А. и др.

Однако газовые месторождения существенно отличаются от промышленных предприятий. В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены ситуационные планы и технические параметры Медвежьего нефтегазоконденсатного месторождения и ООО «Тобольск-Нефтехим». Ситуационные планы представлены в одном масштабе.



Рис. 1. Ситуационный план газового месторождения Медвежьего

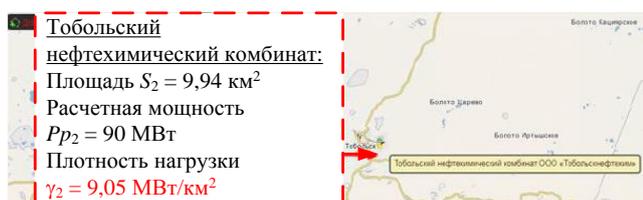


Рис. 2. Ситуационный план промышленного предприятия ООО «Тобольск-Нефтехим»

При сравнении Медвежьего нефтегазоконденсатного месторождения с промышленным предприятием необходимо отметить следующие различия:

1. Площадь газового месторождения в $2,25 \cdot 10^2$ раза больше, чем у промышленного предприятия.
2. Плотность электрической нагрузки в $2,5 \cdot 10^{-4}$ раза меньше, чем у промышленного предприятия.
3. Питающая сеть системы электроснабжения газовых месторождений – «двойная сквозная магистраль с односторонним питанием», а у промышленного предприятия – «радиальная».

По электрической мощности газовые месторождения относятся к малым (месторождение состоит из одной установки комплексной подготовки газа (УКПГ)), средним (месторождение состоит из пяти УКПГ) и большим (месторождение состоит из пятнадцати УКПГ) промышленным предприятиям.

Сравнение схем электроснабжения промышленных предприятий разных классов напряжения показало следующее:

- для предприятий малой мощности при напряжении питающей сети 6, 10 кВ капитальные затраты на электросетевое строительство меньше, но имеют место большие эксплуатационные затраты [12]. При повышении напряжения снижаются потери электроэнергии, появляется возможность увеличения мощности предприятия;
- для предприятий средней мощности при напряжении питающей сети капитальные затраты на электросетевое строительство, как правило, сопоставимы с капитальными затратами для большего класса напряжения (20 кВ), но имеют место большие эксплуатационные затраты [12]. При повышении напряжения потери электроэнергии снижаются так же, как и для малых предприятий, появляется возможность увеличения мощности предприятия и ее передачи на большие расстояния при допустимом уровне потерь;
- для предприятий большой мощности при меньшем значении номинального напряжения капитальные затраты оказываются значительными, имеют место большие эксплуатационные затраты [12]. При переходе на более высокий класс напряжения капитальные и эксплуатационные затраты снижаются.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ

Существующие способы выбора класса напряжения для промышленных предприятий классифицируются на три категории согласно рис. 3.

В зарубежной практике проектирования систем электроснабжения используются следующие эмпирические формулы определения оптимального напряжения [13].



Рис. 3. Способы выбора класса напряжения

Инженером Вейкертом предложено определять нестандартное напряжение (кВ) по выражению

$$U = 3\sqrt{S} + 0,5l, \quad (1)$$

где S – передаваемая мощность, МВ·А; l – расстояние от источника до потребителя, км.

По справочникам шведских инженеров нестандартное напряжение (кВ) определяется выражением

$$U = 17\sqrt{\frac{l}{16} + P}, \quad (2)$$

где P – активная передаваемая мощность, МВт.

В период СССР Залесским А.М. была предложена следующая формула:

$$U = \sqrt{P(0,1 + 0,15\sqrt{l})}. \quad (3)$$

Формулу Залесского А.М. используют для линий электропередачи большой мощности с длинами порядка 1000 км.

Таким образом, анализируя выражения (1)–(3), необходимо отметить их недостатки:

- применение этих формул ограничено определенными значениями передаваемой мощности и длины линии электропередачи;
- они определяют лишь ориентировочное значение номинального напряжения и не учитывают ряд других факторов (например, потери электроэнергии, капитальные вложения – CAPEX, эксплуатационные затраты – OPEX, дисконтируемые затраты), влияющих на класс напряжения, кроме длины и мощности;
- они справедливы только для радиальных схем, но не для магистральных с подключением нагрузки по линии.

Необходимо отметить, что схемы электроснабжения не могут быть одинаковыми при напряжениях 6, 10, 20, 35, 110 кВ, поэтому любые решения по выбору класса напряжения, принятые по эмпирическим формулам, могут дать общую ориентировку, а окончательно выбор оптимального значения напряжения выполняется на основе анализа всей системы электроснабжения.

В связи с этим вопрос выбора оптимального значения напряжения решается комплексно путем технико-экономического сравнения вариантов для схем электроснабжения при различных сочетаниях напряжений. В то же время при равенстве или даже небольших преимуществах низшего из сравниваемых напряжений следует принимать более высокое напряжение как перспективное с точки зрения дальнейшего развития предприятия, промысла и увеличения потребляемой мощности.

Повышение класса напряжения позволяет при одинаковой мощности увеличить радиус линии электропередачи, а при одинаковом расстоянии – и передаваемую мощность, при допустимом уровне потерь, при сопоставимых значениях удельной стоимости капитального строительства электросетевых объектов. Например, в Индии выбор класса напряжения осуществляется с учетом капитальных вложений на строительство высоковольтных линий [14].

Из этих соображений выбор класса напряжения в системах электроснабжения газовых месторождений должен быть экономически обоснован.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Методика нахождения оптимальных напряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий с учетом экономического обоснования основана на использовании интерполяционных формул Ньютона [13]:

$$\begin{aligned} Z(U) = & Z_1 + A_1(U - U_1) + \\ & + B_1(U - U_1)(U - U_2) + \\ & + C_1(U - U_1)(U - U_2)(U - U_3) + \dots + \\ & + N_1(U - U_1)(U - U_2)(U - U_3)\dots(U - U_n) \end{aligned} \quad (4)$$

и Лагранжа [15]:

$$\begin{aligned} Z(U) = & Z_1 \frac{A_1}{B_1} + Z_2 \frac{A_2}{B_2} + Z_n \frac{A_n}{B_n}; \\ A_1 = & (U - U_2)(U - U_3)(U - U_4)\dots(U - U_n); \\ B_1 = & (U_1 - U_2)(U_1 - U_3)(U_1 - U_4)\dots(U_1 - U_n); \\ A_2 = & (U - U_1)(U - U_3)(U - U_4)\dots(U - U_n); \\ B_2 = & (U_2 - U_1)(U_2 - U_3)(U_2 - U_4)\dots(U_2 - U_n); \\ A_n = & (U - U_1)(U - U_2)(U - U_3)\dots(U - U_{n-1}); \\ B_n = & (U_n - U_1)(U_n - U_2)(U_n - U_3)\dots(U_n - U_{n-1}). \end{aligned} \quad (5)$$

где U_i , Z_i – класс напряжения и приведенные затраты, соответствующие этому классу напряжению; $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Функция $Z(U)$ при использовании интерполяционных формул Ньютона и Лагранжа учитывает все существенные факторы, влияющие на выбор оптимального значения напряжения сети.

Основным недостатком интерполяционной методики является значительная трудоемкость расчетов приведенных затрат, в особенности при учете динамики развития газового месторождения.

Многочисленные расчеты, проведенные по этим формулам для определения класса напряжения в системах электроснабжения различных промышленных предприятиях, показывают, что даже при выполнении расчета без учета роста электрических нагрузок требуется выполнение расчета большого числа технико-экономических показателей систем электроснабжения по каждому классу напряжения.

Существует способ выбора класса напряжения по построенным математическим моделям прогноза электропотребления с учетом стоимости электроэнергии, который описан в работе [16].

Иранскими инженерами [17] предложен выбор оптимального класса напряжения с использованием генетического алгоритма с учетом стоимости потерь электроэнергии. Главный недостаток этого способа в том, что он применим только к промышленным предприятиям и не учитывает специфику газовых месторождений.

МЕТОДЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ОБЪЕДИНЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Большую перспективу при решении задач оптимизации сложных систем электроснабжения открывает применение объединенной математической теории, включающей, например, теорию подобия, теорию моделирования и теорию эксперимента [18]. Любая математическая модель связана с формализацией изучаемого объекта и представляет собой в большей или меньшей степени его идеализацию.

В работе [19] рассмотрено нахождение оптимальных напряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий на основе использования приемов, разработанных в математической теории планирования эксперимента:

$$U_{\text{опт}} = 21,5 + 9,90x_1 + 8,20x_2 + 3,70x_3 + 1,58x_4 + 6,60x_1x_2 + 2,30x_1x_3 + 0,98x_1x_4 + 2,0x_2x_3 + 0,89x_2x_4, \quad (6)$$

где x_1 – мощность предприятия ($S_{\text{п}}$, кВт А); x_2 – расстояние от источника до потребителя (l , км); x_3 – стоимость 1 кВт·год потерь электроэнергии (C_0 , руб./кВт·год); x_4 – число часов работы предприятия в год ($T_{\text{р}}$, ч).

Полученное выражение представляет собой полиномную зависимость оптимального класса напряжения от существенно влияющих факторов. Эту математическую зависимость (адекватную модель) можно рассматривать как инструмент исследования системы электроснабжения.

В работе [20] рассмотрен вопрос выбора класса напряжения в системах внутризаводского электроснабжения, рациональное построение которых закладывает фундамент нормального функционирования предприятия. Выбор величины напряжения тесно связан с выбором схемы внутризаводского электроснабжения. Поэтому в работе [20] были получены математические модели для наиболее характерных схем распределения электрической энергии.

Модель радиальной одноступенчатой схемы имеет вид:

$$U_{\text{опт}} = 7,59 + 0,74x_1 + 1,21x_2 + 0,27x_3 - 1,18x_4 + 0,61x_1x_2 + 0,22x_2x_3 + 0,20x_2x_4. \quad (7)$$

Модель для магистральной схемы следующая:

$$U_{\text{опт}} = 8,07 + 0,92x_1 + 1,45x_2 + 0,37x_3 - 1,33x_4 - 0,14x_5 + 0,67x_1x_2 + 0,20x_1x_3 + 0,24x_2x_3 + 0,29x_2x_4 + 0,26x_1x_2x_4, \quad (8)$$

где x_1 – суммарная нагрузка предприятия ($S_{\text{сум}}$, кВА); x_2 – средняя длина линии ($L_{\text{ср}}$, км); x_3 – стоимость 1 кВт·год потерь электроэнергии (γ , руб./кВт·год); x_4 – отношение нагрузки потребителей 6 кВ ко всей нагрузке предприятия (β , %); x_5 – отношение числа часов работы предприятия в году $T_{\text{г}}$ к числу часов использования максимума нагрузки $T_{\text{м}}$ (α).

Методике определения рационального напряжения в цеховых сетях до 1000 В посвящена работа [21].

Модель внутрицехового электроснабжения пред-

ставляется как сложная кибернетическая система, внутреннее строение которой неизвестно, но имеется возможность наблюдать входы и выходы этой системы [21]. Входы системы – это факторы, выходом системы является величина рационального напряжения $U_{\text{р}}$, определенная по минимуму приведенных затрат. В работе получены математические модели величины рационального напряжения для наиболее характерных схем распределения электроэнергии в цехе.

Для радиальной схемы

$$U_{\text{опт}} = 665 + 37x_1 + 64x_2 + 28x_3 - 10,6x_1x_2 + 16,9x_1x_3 - 20,7x_1x_2x_3. \quad (9)$$

Для магистральной схемы

$$U_{\text{опт}} = 520 + 29x_1 + 43x_2 + 27x_3 - 20x_4 - 5,9x_1x_2 + 6,8x_2x_3x_4, \quad (10)$$

где $x_1 = F$ – длина линии, км; $x_2 = P_{\text{у}}$ – установленная мощность, кВт; $x_3 = P_{\text{ср}}$ – расчетная мощность, кВт; $x_4 = \gamma$ – стоимость 1 кВт·год потерь электроэнергии руб./кВт·год).

Методам выбора оптимального класса напряжения для систем электроснабжения промышленных предприятий с использованием объединенной математической теории посвящены работы проф., д.т.н. Федорова А.А. и проф., д.т.н. Мельникова Н.А., однако они рассматривали эту задачу с точки зрения оптимизации системы электроснабжения путем минимизации приведенных затрат промышленных предприятий.

Эти методы не применимы к системе электроснабжения газовых месторождений по следующим причинам:

- в настоящее время для выполнения технико-экономических расчетов используют дисконтируемые затраты, которые позволяют учитывать капитальные вложения и изменение стоимости электроэнергии, амортизационных отчислений по годам с учетом инфляции;

- газовые месторождения отличаются от промышленных предприятий протяженными линиями электропередачи (площадь на два порядка больше у газовых месторождений по сравнению с промышленными предприятиями) с небольшими электрическими нагрузками (плотность электрической нагрузки у газовых месторождений на четыре порядка меньше, чем у промышленных предприятий), которые кратно растут в процессе жизненного цикла месторождения [22].

В работе [23] разработана методика выбора номинального напряжения сети с использованием линеаризации дисконтируемых затрат на элементы системы электроснабжения.

Недостатком данного способа являются необходимость построения для каждой схемы электроснабжения математической модели дисконтируемых затрат для классов напряжения 10, 20 и 35 кВ и последующий выбор оптимального класса напряжения по минимальным дисконтируемым затратам.

Таким образом, на основании результатов анализа существующих методик определения оптимального класса напряжения выявлено, что методики выбора оптимального класса напряжения для системы

электроснабжения, учитывающей особенности газовых месторождений, не существует.

Расчеты, связанные с выбором оптимального значения напряжения, должны выполняться с учетом обеспечения минимума дисконтируемых затрат, включающих в себя капиталовложения и эксплуатационные расходы по объектам электросетевого строительства.

Разработку новой методики выбора оптимального класса напряжения необходимо выполнять с использованием теории планирования эксперимента и интерполяционной теории Лагранжа при учете следующих факторов:

- количество УКПП на месторождении (от одного до пятнадцати УКПП);
- коэффициент прироста электрической нагрузки (от 1 до 10 раз);
- коэффициент распределения нагрузки по линии электропередачи (равномерное распределение – 0,55 о.е. или в конце линии – 1 о.е.);
- расстояние от источника до потребителя (от 0,5 до 150 км).

В общем случае для выбора оптимального класса напряжения предварительно следует определить нестандартное напряжение при минимальных дисконтируемых затратах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время для питания и распределения электрической энергии промышленных предприятий широкое распространение находит класс напряжения 20 кВ, так как по объемам и удельным капитальным затратам данный класс напряжения сопоставим с 6 и 10 кВ при возможности передачи большей мощности и увеличения расстояния между источником и потребителями.

2. Существующие методы по выбору класса напряжения разделяются на три категории: эмпирический, аналитический и подход с применением теории планирования эксперимента.

3. Существующие способы расчета класса напряжения учитывают в основном два фактора – мощность нагрузки в конце линии и длину линии электропередачи.

Существующие и используемые для расчетов целевые функции определения класса напряжения системы внутреннего электроснабжения основаны на расчете минимума приведенных затрат без учета инфляции и перспективного увеличения электрической нагрузки потребителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров А.А. Научные основы расчета и выбора важнейших параметров системы электроснабжения промышленных предприятий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Федоров Алексей Александрович; Московский энергетический институт. М.: МЭИ, 1972. 52 с.
2. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 408 с.
3. СТО Газпром НТП 1.8-001-2004. Нормы технологического проектирования объектов газодобывающих предприятий и станций подземного хранения газа ООО «ВНИПИГаздобыча». М., 2004. 105 с.
4. Перспективы применения напряжения 20 кВ в Москве. URL: <http://ieport.ru/stat/35822-nashe-setevoe-zavtra.html>.
5. Буре И.Г., Гусев А.В. Повышение напряжения до 20-25

- кВ и качество электроэнергии в распределительных сетях // МЭИ Электро. 2005. №5. С. 30-32.
6. Буре И.Г., Хевсуриани И.М. Предпосылки повышения напряжения в распределительных сетях промышленных предприятий до 20 кВ // Электрооборудование, электроснабжение, электросбережение: материалы науч.-тех. конф., 24-28 мая 2004 г. Ижевск: ИГТУ, 2004. С. 30-34.
7. Исследование режимов электрических сетей при переводе на напряжение 20 кВ, международная научно-практическая конференция / В.А. Агеев, К.А. Душутин, Е.Н. Еремеев, Г.Н. Семенов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материалы Международной научно-практической конференции: Саранск, 2019. С. 226-230.
8. Оптимизация режимов электрических сетей по напряжению и коэффициентам трансформации регулируемых трансформаторов с применением генетического алгоритма / В.А. Агеев, Д.С. Репьев, П.А. Волгушев, А.И. Бурнаев, Д.В. Пяткин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: материалы Международной научно-практической конференции: Саранск, 2019. С. 139-146.
9. Питающие линии 6 кВ нефтегазоконденсатных месторождений. Увеличение пропускной способности / А.А. Володько, Д.Г. Лапаев, И.М. Богачков, П.А. Овчинников // Новости электротехники. 2015. №1(91). URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/91/08.php>.
10. Богачков И.М., Новикова М.В. 20 кВ – Оптимальное решение для электроснабжения нефтегазовых месторождений // Проблемы развития газовой промышленности: сборник тезисов докладов XX науч.-практич. конф. молодых ученых и специалистов / ООО «Газпром проектирование»; гл. ред. д-р техн. наук В.Н. Маслов. Тюмень, 2018. С. 123-126.
11. Необходимость применения напряжения 20 кВ в распределительных сетях предприятий и городов / А.А. Фёдоров, В.В. Каменева, А.И. Чернущский, Стебунова Е.Д., Сидоров С.Т. // Электричество. 1980. №8. С. 58-59.
12. Мельников, Н.А. Электрические сети и системы. М.: Энергия, 1975. 464 с.
13. Федоров А.А. Теоретические основы электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1976. 271 с.
14. Different voltage selection criteria and insulation design of a transmission line for HF, EHV & UHV system / Akhlaque A.K., Ahmad F.M. / International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER), vol. 2, issue 2, 2012, pp. 73-79.
15. Федоров А.А. Выбор рациональных напряжений для системы электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 1959. №9. С. 7-10.
16. Устюгов Н.В. Оптимизация класса напряжения предприятия с учетом прогноза электропотребления // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ. 2020. Т. 2. С. 23-26.
17. Technical and economic evaluation of voltage level in transmission network expansion planning using GA/ S. Jalilzadeh, A. Kazemi, H. Shayeghi, M. Madavi / Energy Conversion and Management, 49, 2008. Pp. 1119-1125.
18. Веников В.А. Моделирование энергетических систем // Электричество. №1. 1971. С. 5-16.
19. Киреева Э.А. Исследования, выбор и оптимизация основных параметров системы электроснабжения промышленных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Киреева Эльвира Александровна; Московский энергетический институт. М.: МЭИ, 1971. 28 с.
20. Карпов В.М. Методика выбора рациональных напряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий на основе планирования эксперимента: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Карпов Валерий Михайлович; Московский энергетический институт. М.: МЭИ, 1976. 19 с.

21. Мерзликин А.И. Исследование и выбор уровня рационального напряжения в цеховых электрических сетях до 1000 В: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Мерзликин Александр Иванович; Московский энергетический институт. М.: МЭИ, 1978. 20 с.
22. Применение мобильных компрессорных установок на завершающей стадии разработки газовых залежей / В.З. Минликаев, Д.В. Дикамов, О.В. Арно, А.В. Меркулов, С.А. Кирсанов, А.В. Красовский, С.Ю. Свенский, А.В. Кононов // Газовая промышленность. №1(717). 2015. С. 15-17.
23. Черепанов В.В., Суворова И.А. Линеаризация затрат на элементы системы электроснабжения при выборе номинального напряжения электрической сети // Научно-методологические проблемы и новые технологии образования. №6(48). 2012. С. 53-55.

Поступила в редакцию 12 октября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

THE CHOICE OF THE OPTIMAL VOLTAGE CLASS OF GAS FIELD ELECTRICITY SUPPLY SYSTEM

Ivan M. Bogachkov

Chief Specialist, Electrical Department, LLC "Gazprom Engineering", Tyumen Branch, Tyumen, Russia. E-mail: Bogim83@mail.ru.

Rustam N. Khamitov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. E-mail: apple_27@mail.ru.

Mustafa K. Valiev

Ph.D. (Engineering), Chief Specialist for Electrical Solutions, Department of Design and Project Examination, LLC "NOVATEK Scientific and technical center", Tyumen, Russia. E-mail: mustafa.veliev@novatek.ru

Currently, most of the gas fields in Western Siberia are at the final stage of their development. The estimated electrical load of one gas well cluster during the period of growth and constant gas production is 100 kW. To extend the cost-effective gas production at the final stage, a number of energy-intensive technologies have been implemented, such as the one of distributed gas compression with the installation of mobile compressor units with electric drive of 1000 kW at gas wellheads. As a result, there is a multiple increase in the electrical load that leads to the necessity to build new overhead transmission lines. For example, to implement the MCU at the Yamburgskoe field, it is necessary to build an overhead transmission line of 10 kV with a length of 480 km. At the moment, engineering of electricity supply system for gas fields and the choice of the voltage class are performed similarly to the ones for the regional network organization and do not take into account the peculiarity of gas fields, that is a multiple increase in the electric load during the entire life cycle of the field (on average, it is about 60 years). Thus, the main problem of the gas industry electro energetics is the choice of the optimal voltage class electricity supply system, taking into account the entire life cycle of the field.

The goal of the study is to select an approach for developing a new method for choosing the optimal voltage class for the gas field electricity supply system. To achieve this goal, the paper analyzes the existing methods for choosing the voltage class of electricity supply system. The analysis found that for the development of a new method of choosing the optimal voltage class of a gas field electricity supply system the closest one is the approach that uses the theory of experiment planning, taking into account the following factors specific to the gas industry: the number of installations of gas complex preparation at the field; the coefficient of electric load increase; the coefficient of load distribution on transmission lines; the distance from the electricity source to the consumer. To achieve this goal, we used the experimental and theoretical method (analysis and synthesis).

Keywords: voltage class, external electricity supply system, power overhead transmission line, experiment planning theory, objective function, discounted costs.

REFERENCES

1. Fedorov A.A. *Nauchnie osnovy rascheta i vybora*

vazhneishikh parametrov sistemy elektrosnabzhenia promyshlennykh predpriyati [Scientific bases of calculation and selection of the most important parameters of electricity supply system of industrial enterprises]. Doctor's thesis, Moscow, 1972, 52 p.

2. Fedorov A.A., Kameneva V.V. *Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyati* [Fundamentals of electricity supply of industrial enterprises], Moscow: Ergoatomizdat, 1984. (In Russian)
3. Gazprom Standards NTP 1.8-001-2004. Norms of technological engineering of objects of gas - producing enterprises and underground gas storage stations of LLC VNIPIgazdobycha. M., 2004. (In Russian)
4. Prospects of application voltage of 20 kV in Moscow. Available at: <http://ieport.ru/stat/35822-nashe-setevoe-zavtra.html>. (In Russian)
5. Bure I.G., Gusev A.V. *Povyshenie napriazhenia do 20-25 kV i kachestvo elektroenergii v raspredelitelnykh setiakh* [Increasing the voltage to 20-25 kV and the quality of electricity in distribution networks], in MEI Elektro, 2005, no.5, pp. 30-32.
6. Bure I.G., Khevsuriani I.G. Prerequisites for increasing voltage in distribution networks of industrial enterprises up to 20 kV. *Tezisy dokl. nauch.-tekh. konf. "Elektrooborudovanie, elektrosnabzhenie, elektrosberezhenie"* [Scientific Conference Abstracts: Electrical equipment, power supply, power saving], Izhevsk, 2004, pp. 30-34. (In Russian)
7. Ageev V.A., Dushutin K.A., Ereemeev E.N., Semenov G.N. Research of electric network modes when switching to 20 kV voltage. *Nauch.-pract. konf. "Energo effektivnie i resursosberegajushhie tekhnologii i sistemy"* [Research and practice conference: Energy-efficient and resource-saving technologies and systems], 2019, pp. 226-230. (In Russian)
8. Ageev V.A., Repyev D.S., Volgushev P.A., Burnaev A.I., Pyatkin D.V. Optimization of electric network modes by voltage and transformation coefficients of regulated transformers using a genetic algorithm. *Nauch.-pract. konf. "Energo effektivnie i resursosberegajushhie tekhnologii i sistemy"* [Research and practice conference: Energy-efficient and resource-saving technologies and systems], Saransk, 2019, pp. 139-146. (In Russian)

9. Volodko A.A., Lapaev D.G., Bogachkov I.M., Ovchinnikov P.A. 6 kV feeding lines of oil and gas condensate fields. Increase in throughput. *Novosti elektrotehniki*, 2015, no. 3(91). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/91/08.php>. (In Russian)
10. Bogachkov I.M., Novikova M.V. 20 kv optimal solution for power supply of oil and gas fields, *Tez.dokl. XX mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Problemy razvitiya gazovoi promyshlennosti"* [Development issues of gas production industry: collection of scientific conference abstracts XX research and practice conference of young scientists and specialists], Gazprom Proektirovanie LLC; under the editorship of D.Sc. Maslov, V. N. Tyumen, 2018, pp. 123-126. (In Russian)
11. Fedorov A.A., Kameneva V.V., Chernusky A.I., Stebunova E.D., Sidorov S.T. The need to use 20 kV voltage in distribution networks of enterprises and cities. *Elektrichestvo* [Electric power], 1980, no. 8, pp. 58-59. (In Russian)
12. Melnikov N.A. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electrical network and the system], Moscow: Energy, 1975. (In Russian)
13. Fedorov A.A. *Teoreticheskie osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyati* [Theoretical bases of power supply of industrial enterprises], Moscow: Energy, 1976. (In Russian)
14. Different voltage selection criteria and insulation design of a transmission line for HF, EHV & UHV system / Akhlaque A.K., Ahmad F.M. / *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research (IJATER)*, vol. 2, Issue 2, 2012, pp. 73–79.
15. Fedorov A.A. Selection of rational voltages for the power supply system of industrial enterprises. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 1959, no. 9, pp. 7-10. (In Russian)
16. Ustyugov N.V. Optimization of the voltage class of an enterprise considering the forecast of power consumption. *Matematicheskie metody v tekhnike i tehnologiakh* [Mathematical methods in engineering and technology]. MMTT, 2020, vol. 2, pp. 23-26. (In Russian)
17. Technical and economic evaluation of voltage level in transmission network expansion planning using GA / S. Jalilzadeh, A. Kazemi, H. Shayeghi, M. Madavi / *Energy Conversion and Management* 49, 2008, pp. 1119–1125.
18. Venikov V.A. Modeling of energy systems. *Elektrichestvo* [Electric power], 1971, no 1. (In Russian)
19. Kireeva E.A. *Issledovaniya, vybor i optimizatsiya osnovnykh parametrov sistemy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyati*. Kand.Diss. [Research, selection and optimization of the main parameters of electricity supply system for industrial enterprises. Ph. D. Diss.]. Moscow, 1971.
20. Karpov V.M. *Metodika vybora ratsionalnykh napryazheniy v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyati na osnove planirovaniya eksperimenta*. Kand.Diss. [Method of selecting rational voltages in power supply systems of industrial enterprises based on experiment planning. Ph. D. Diss.]. Moscow, 1976.
21. Merzlikin A.I. *Issledovanie i vybor urovnya ratsionalnogo napryazheniya v tsekhovykh elektricheskikh setiakh do 1000 V*. Kand.Diss. [Research and selection of the rational voltage level in electrical networks up to 1000 V. Ph.D.Diss.]. Moscow, 1978.
22. Minlikaev V.Z., Dikamov D.V., Arno O.V. Application of mobile compressor units at the final stage of development of gas fields. *Gazovaya promyshlennost* [Natural gas industry]. 2015, no. 1(717), 2015, pp. 15-17. (In Russian)
23. Cherepanov V.V., Suvorova I.A. [Linearization of costs for elements of electricity supply system while choosing the nominal voltage of the electric network. *Nauchno-metodologicheskie problemy i novye tekhnologii obrazovaniya* [Scientific and methodological issues and new technology in education]. 2012, no. 6(48), pp. 53-55. (In Russian)

Богачков И.М., Хамитов Р.Н., Валиев М.К. Пути выбора оптимального класса напряжения системы электроснабжения газовых месторождений // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 4(49). С. 35-41. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-35-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-35-41)

Bogachkov I.M., Khamitov R.N., Valiev M.K. The Choice of the Optimal Voltage Class of Gas Field Electricity Supply System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 35-41. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-35-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-35-41)