

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ГАЗОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И КРИТЕРИЯ ДИСКОНТИРОВАННЫХ ЗАТРАТ

Яркина А.А.

Омский государственный технический университет, Омск

Ключевые слова: теория планирования эксперимента, выбор напряжения, распределительная электрическая сеть, одноцепная воздушная линия, газовое месторождение, куст газовых скважин, капитальные вложения, эксплуатационные затраты, дисконтированные затраты, потери электрической энергии.

Аннотация. При проектировании систем электроснабжения газовых месторождений одним из ключевых решений является выбор уровня напряжения питающей и распределительной сети. Указанный параметр во многом определяет экономическую эффективность системы электроснабжения, поскольку влияет на потери электрической энергии, капитальные вложения и эксплуатационные затраты. Обоснованный выбор класса напряжения должен осуществляться с учетом полного жизненного цикла месторождения – от стадии опытно-промышленной разработки до ликвидации, консервации либо перевода объекта в подземное хранилище газа. Цель исследования заключается в разработке математической модели выбора рационального уровня напряжения распределительной электрической сети газового месторождения на основе критерия дисконтированных затрат и методов теории планирования эксперимента. Научная новизна работы состоит в расширении перечня учитываемых факторов и разработке модели, адаптированной к современным условиям проектирования систем электроснабжения газовых месторождений. В основу исследования положена гипотеза о том, что выбор уровня напряжения с учетом полного жизненного цикла месторождения обеспечивает повышение экономической эффективности объекта. В ходе исследования использованы методы теории планирования эксперимента, полный факторный эксперимент, метод расчета дисконтированных затрат и статистические методы обработки данных. По результатам работы разработана математическая модель выбора рационального уровня напряжения, а также модели расчета дисконтированных затрат, построенные с учетом уточненных граничных параметров. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем электроснабжения газовых месторождений и рекомендованы к внедрению в практику проектных организаций при разработке раздела электроснабжения. Апробация предложенных моделей выполнена на примере нового месторождения Восточной Сибири. Результаты подтвердили выдвинутую гипотезу и показали, что выбор рационального напряжения 20 кВ на стадии разработки проектной документации с учетом полного жизненного цикла месторождения позволяет снизить затраты нефтегазовой компании на 169,5 млн рублей.

SELECTION OF THE OPTIMAL VOLTAGE LEVEL FOR A GAS FIELD ELECTRICAL NETWORK BASED ON MATHEMATICAL MODELING AND THE DISCOUNTED COST CRITERION

Yarkina A.A.

Omsk State Technical University, Omsk

Keywords: design of experiments, voltage level selection, electrical distribution network, single-circuit overhead transmission line, gas field, well pad, capital expenditure, operating expenditure, discounted costs, power losses.

Abstract. In the design of power supply systems for gas fields, the selection of the supply and distribution voltage level is a key engineering and economic decision. This parameter has a decisive

influence on the overall cost-effectiveness of the facility. An appropriately selected voltage level reduces power losses, capital expenditure, and operating costs. The choice of voltage level should therefore be made with due regard to the entire field life cycle, from pilot development to abandonment, conservation, or conversion into an underground gas storage facility. The objective of this study is to develop a mathematical model for selecting the rational voltage level of a gas field electrical distribution network based on the discounted cost criterion and design of experiments methods. The scientific novelty of the study lies in expanding the range of factors taken into account and in developing a model adapted to current conditions of gas field power system design. The hypothesis of the study is that selecting the voltage level with consideration of the entire field life cycle improves the economic performance of the facility. The research methods include design of experiments, full factorial design, discounted cost analysis, and statistical methods. The results of the study include a mathematical model for rational voltage level selection and mathematical models for discounted cost estimation developed using design of experiments and refined boundary conditions. The practical application of the results lies in the recommended integration of the proposed mathematical models into the engineering workflow of design organizations engaged in the development of power supply systems for gas fields. The proposed models were validated in the process of selecting the voltage level for the electrical distribution network of a new gas field in Eastern Siberia. The hypothesis was confirmed: selecting a rational voltage level of 20 kV at the design stage, with account taken of the entire field life cycle, made it possible to reduce the company's costs by RUB 169.5 million.

Введение

В условиях повышения требований к энергоэффективности и снижению затрат на добычу и транспорт природного газа совершенствование систем электроснабжения приобретает особую значимость, поскольку именно они во многом определяют надежность функционирования производственной инфраструктуры и уровень эксплуатационных издержек.

Одним из ключевых параметров проектирования системы электроснабжения [1] газового месторождения является выбор уровня напряжения питающей и распределительной сети. От обоснованности данного решения зависят капитальные вложения в строительство сетевых объектов, потери электрической энергии, эксплуатационные расходы, а также необходимость последующей реконструкции сети. В связи с этим выбор класса напряжения следует рассматривать как важный элемент технико-экономической оптимизации системы электроснабжения.

Освоение газовых месторождений носит поэтапный характер [2], при этом каждой стадии жизненного цикла соответствует определенный состав электроприемников и уровень электрических нагрузок. Наиболее существенные различия характерны для этапов бурения и эксплуатации. Если в период эксплуатации электрическая нагрузка на один куст газовых скважин составляет около 100 кВт, то в период бурения она может достигать 2500 кВт, то есть возрасти в 25 раз. Указанное изменение оказывает существенное влияние на параметры распределительной сети и должно учитываться при ее проектировании.

Актуальность рассматриваемой проблемы возрастает в связи с увеличением протяженности электрических сетей и удаленностью объектов газодобычи, особенно в районах Западной и Восточной Сибири. В этих условиях применение упрощенных подходов, не учитывающих изменение нагрузок на протяжении жизненного цикла месторождения, может приводить к последующей реконструкции системы электроснабжения и увеличению себестоимости газа.

Анализ существующих исследований [3-6] показывает, что применяемые методики выбора рационального напряжения не в полной мере учитывают фактические диапазоны изменения нагрузок в период бурения и возросшую протяженность распределительных сетей. Это обуславливает необходимость разработки универсального подхода, основанного на учете полного жизненного цикла месторождения и экономической оценке вариантов электроснабжения.

Цель исследования состоит в разработке математической модели выбора рационального напряжения распределительной электрической сети газового месторождения на основе критерия дисконтированных затрат и методов теории планирования эксперимента. Научная новизна работы заключается в расширении состава учитываемых факторов и разработке модели, адаптированной к современным условиям проектирования систем электроснабжения газовых месторождений.

Теоретические основы и постановка задачи

Для разработки математических моделей дисконтированных затрат используется теория планирования эксперимента [7] – полный факторный эксперимент (ПФЭ), и поиск рационального напряжения осуществляется по критерию минимума дисконтированных затрат [8] с помощью интерполяционной формулы Лагранжа.

Математические модели имеют вид уравнения регрессии:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4, \quad (1)$$

где b_0 , b_i , b_{ij} – коэффициенты полинома.

Факторы в математических моделях приведены в зашифрованный вид по формуле:

$$x_j = \frac{X_j - x_{j0}}{\Delta x_j}. \quad (2)$$

где X_j – именованное натуральное значение фактора; x_{j0} – именованное значение основного уровня; Δx_j – диапазон варьирования; x_j – кодированное значение фактора $(-1, 0, +1)$; j – номер фактора.

Факторы математической модели

В исследовании используются четыре основных фактора:

x_1 – количество кустов газовых скважин (от 2 до 20);

x_2 – расстояние от источника питания до потребителя электроэнергии (от 0,5 до 40 км);

x_3 – коэффициент прироста электрической нагрузки (от 1 до 25);

x_4 – коэффициент распределения нагрузки по ВЛ (от 0,55 до 1);

Диапазон изменения факторов приведён в таблице 1.

Табл. 1. Уровни и интервалы изменения факторов

Фактор	Нижний уровень (-)	Нулевой уровень (0)	Верхний уровень (+)	Интервал
x_1 (кустов)	2	11	20	9
x_2 (км)	0,5	20,25	40	19,75
x_3	1	13	25	12
x_4	0,55	0,775	1	0,225

Методика расчета

Поставленная задача решается в следующей последовательности:

1. Строится матрица планирования эксперимента ПФЭ 2^4 (16 опытов) [7].
2. Разрабатываются варианты схем электроснабжения с учётом всех возможных сочетаний факторов для семи стандартных классов напряжений (3, 6, 10, 20, 35, 110, 220 кВ).
3. Рассчитываются дисконтированные затраты для каждого варианта схемы электроснабжения [8].
4. Рассчитываются полиномы для семи математических моделей расчёта дисконтированных затрат $PV_3, PV_6, PV_{10}, PV_{20}, PV_{35}, PV_{110}, PV_{220}$ [7].
5. Формируется таблица сочетания факторов со значением дисконтированных затрат для каждого класса напряжения [7].
6. Определяются минимальные дисконтированные затраты в каждом опыте и соответствующий класс напряжения.
7. По формуле Лагранжа определяется рациональное напряжение.
8. Рассчитываются полиномы для математической модели расчёта рационального напряжения.

Количество опытов определяется по формуле: $N=2^4=16$. 17-й опыт строится для проверки адекватности модели.

Результаты исследования

В работе построено 119 вариантов схем электроснабжения (17 вариантов для каждого из семи классов напряжения). Для 119 вариантов выполнен расчёт дисконтированных затрат в соответствии с методическими рекомендациями «Оценка эффективности инвестиционных проектов» [8].

При расчёте дисконтированных затрат учитывались следующие затраты:

- капитальные вложения на строительство ВЛ и комплектных трансформаторных подстанций (КТП);
- эксплуатационные затраты (потери электроэнергии, амортизационные отчисления, налог на имущество, плата за землю, страховые взносы, капитальный ремонт, оплата труда);
- ставка дисконта – 10%.

Математические модели дисконтированных затрат

Для каждого класса стандартного напряжения рассчитаны полиномы. Например, математическая модель расчёта дисконтированных затрат для класса напряжения 10 кВ имеет вид:

$$PV_{10}=6,85+5,54x_1+5,52x_2+5,85x_3+1,62x_4+4,46x_1x_2+4,99x_1x_3+4,88x_2x_3+1,58x_1x_4+1,61x_2x_4+1,53x_3x_4+4,19x_1x_2x_3+1,58x_1x_2x_4+1,50x_1x_3x_4+1,52x_2x_3x_4+1,49x_1x_2x_3x_4, \text{ млрд. руб.} \quad (3)$$

Математическая модель расчёта дисконтированных затрат для класса напряжения 20 кВ:

$$PV_{20}=3,20+2,34x_1+1,70x_2+2,45x_3+0,44x_4+1,13x_1x_2+2,02x_1x_3+1,35x_2x_3+0,38x_1x_4+0,44x_2x_4+0,43x_3x_4+1,12x_1x_2x_3+0,38x_1x_2x_4+0,38x_1x_3x_4+0,43x_2x_3x_4+0,38x_1x_2x_3x_4, \text{ млрд. руб.} \quad (4)$$

Математическая модель рационального напряжения

После анализа всех вариантов по критерию минимума дисконтированных затрат и применения формулы Лагранжа получена математическая модель рационального нестандартного напряжения для распределительной сети:

$$U_{\text{рац}} = 25,29 + 3,36x_1 + 19,79x_2 + 12,66x_3 + 1,94x_4 + 3,28x_1x_2 + 1,47x_1x_3 + 12,16x_2x_3 + 1,06x_1x_4 + 1,83x_2x_4 + 1,57x_3x_4 + 1,56x_1x_2x_3 + 0,99x_1x_2x_4 + 0,78x_1x_3x_4 + 1,68x_2x_3x_4 + 0,85x_1x_2x_3x_4, \text{ кВ.} \quad (5)$$

Пример расчета для Тымпучиканского НГКМ

Описание объекта

Используя полученные математические модели, проанализирована одна ВЛ «ВЛ «КГС №254-07»» распределительной электрической сети Тымпучиканского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), расположенного в Восточной Сибири. К ВЛ «КГС №254-07» – подключены 5 кустов газовых скважин (КГС №107, КГС №2542, КГС №254-01, КГС №254-07, КГС №206-13).

Трансформаторная мощность КТП на всех кустах газовых скважин принята 160 кВА. В проектной документации для распределительной сети изначально принят класс напряжения 10 кВ.

Расчет рационального напряжения для ВЛ «КГС №254-07»

Приведем детальный расчет выбора рационального напряжения для ВЛ «КГС №254-07».

Шаг 1: Определение исходных данных

Значения факторов ВЛ «КГС №254-07»:

- количество кустов газовых скважин: $X_1 = 5$;
- длина ВЛ: $X_2 = 28,85$ км;
- коэффициент прироста нагрузки: $X_3 = 1,6$ (с учетом мощности КТП 100 кВА в модели);
- коэффициент распределения нагрузки по линии: $X_4 = 0,55$ (КГС равномерно распределены по ВЛ);

Шаг 2: Кодирование факторов

Переводим натуральные значения в кодированный вид по формуле (2).

Для x_1 :

$$x_1 = \frac{5-11}{9} = \frac{-6}{9} = -0,667.$$

Для x_2 :

$$x_2 = \frac{28,85-20,25}{19,75} = \frac{8,6}{19,75} = 0,435.$$

Для x_3 :

$$x_3 = \frac{1,6-13}{12} = \frac{-11,4}{12} = -0,950.$$

Для x_4 :

$$x_4 = \frac{0,55-0,775}{0,225} = \frac{-0,225}{0,225} = -1.$$

Шаг 3: Расчет рационального нестандартного напряжения

Подставляем кодированные значения факторов в математическую модель рационального напряжения (5):

$$\begin{aligned}
U_{\text{рац}} = & 25,29 + 3,36 \cdot (-0,667) + 19,79 \cdot 0,435 + 12,66 \cdot (-0,950) + 1,94 \cdot (-1) + \\
& + 3,28 \cdot (-0,667) \cdot 0,435 + 1,47 \cdot (-0,667) \cdot (-0,950) + 12,16 \cdot 0,435 \cdot (-0,950) + \\
& + 1,06 \cdot (-0,667) \cdot (-1) + 1,83 \cdot 0,435 \cdot (-1) + 1,57 \cdot (-0,950) \cdot (-1) + \\
& + 1,56 \cdot (-0,667) \cdot 0,435 \cdot (-0,950) + 0,99 \cdot (-0,667) \cdot 0,435 \cdot (-1) + \\
& + 0,78 \cdot (-0,667) \cdot (-0,950) \cdot (-1) + 1,68 \cdot 0,435 \cdot (-0,950) \cdot (-1) + \\
& + 0,85 \cdot (-0,667) \cdot 0,435 \cdot (-0,950) \cdot (-1).
\end{aligned}$$

Вычисляем каждый член:

$$\begin{aligned}
b_0 &= 25,29; \\
b_1 x_1 &= 3,36 \cdot (-0,667) = -2,241; \\
b_2 x_2 &= 19,79 \cdot 0,435 = 8,609; \\
b_3 x_3 &= 12,66 \cdot (-0,950) = -12,027; \\
b_4 x_4 &= 1,94 \cdot (-1) = -1,940; \\
b_{12} x_1 x_2 &= 3,28 \cdot (-0,290) = -0,951; \\
b_{13} x_1 x_3 &= 1,47 \cdot 0,634 = 0,932; \\
b_{23} x_2 x_3 &= 12,16 \cdot (-0,413) = -5,022; \\
b_{14} x_1 x_4 &= 1,06 \cdot 0,667 = 0,707; \\
b_{24} x_2 x_4 &= 1,83 \cdot (-0,435) = -0,796; \\
b_{34} x_3 x_4 &= 1,57 \cdot 0,950 = 1,492; \\
b_{123} x_1 x_2 x_3 &= 1,56 \cdot 0,276 = 0,430; \\
b_{124} x_1 x_2 x_4 &= 0,99 \cdot 0,290 = 0,287; \\
b_{134} x_1 x_3 x_4 &= 0,78 \cdot (-0,634) = -0,495; \\
b_{234} x_2 x_3 x_4 &= 1,68 \cdot 0,413 = 0,694; \\
b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4 &= 0,85 \cdot (-0,276) = -0,235.
\end{aligned}$$

Суммируя все члены:

$$\begin{aligned}
U_{\text{рац}} = & 25,29 - 2,24 + 8,61 - 12,03 - 1,94 - 0,95 + 0,93 - 5,02 + 0,71 - 0,80 + \\
& + 1,49 + 0,43 + 0,29 - 0,50 + 0,69 - 0,24 = 14,73 \text{ кВ}.
\end{aligned}$$

Результат: Рациональное нестандартное напряжение для ВЛ «КГС №254-07» составляет **14,73 кВ**.

Шаг 4: Выбор стандартного класса напряжения

По линейке стандартных напряжений определяем:

- ближайшее меньшее напряжение: 10 кВ;
- ближайшее большее напряжение: 20 кВ.

Шаг 5: Расчет дисконтированных затрат для стандартных напряжений

Используем те же кодированные значения факторов для расчета $PV_{10}(3)$ и $PV_{20}(4)$.

Для напряжения 10 кВ:

Подставляем значения в модель $PV_{10}(3)$ и получаем:

$$PV_{10} = 906,57 \text{ млн. руб.}$$

Для напряжения 20 кВ:

Подставляем значения в модель $PV_{20}(4)$ и получаем:

$$PV_{20} = 737,025 \text{ млн. руб.}$$

Шаг 6: Выбор оптимального класса напряжения

Сравниваем дисконтированные затраты: $PV_{10} = 906,57 \text{ млн. руб.};$
 $PV_{20} = 737,025 \text{ млн. руб.}$

Экономия: $\Delta PV = 906,57 - 737,025 = 169,545 \text{ млн. руб.}$

Поскольку дисконтированные затраты меньше у класса напряжения 20 кВ на 169,545 млн. руб., то для распределительной электрической сети следует принять класс напряжения **20 кВ**.

Экономический эффект: Выбор напряжения 20 кВ вместо 10 кВ снижает дисконтированные затраты на **18,7%**.

Сравнение с существующими моделями

Оценка рационального напряжения по ранее существующей математической модели [9-14] показала следующее, что для ВЛ «КГС №254-07»: расчёт невозможен, так как длина ВЛ 28,85 км не находится в диапазоне изменения фактора (до 20 км).

Полученная в настоящей работе математическая модель позволяет выполнить расчёты для всех линий без ограничений и даёт более точные результаты.

Практическое применение и экономический эффект

Полученные математические модели апробированы при выборе класса напряжения распределительной сети нового месторождения Восточной Сибири. Выбранное рациональное напряжение 20 кВ на этапе разработки проектной документации с учетом всего жизненного цикла месторождения позволило сэкономить **169,545 млн. руб.** затрат нефтегазовой компании.

Основные источники экономии:

- снижение потерь электроэнергии при передаче;
- уменьшение капитальных вложений на строительство линий электропередачи (меньшее сечение проводов при более высоком напряжении);
- снижение эксплуатационных затрат (амортизация, обслуживание, налоги);
- отсутствие необходимости реконструкции сети при переходе между стадиями разработки месторождения.

Заключение

1. Разработаны восемь математических моделей, в том числе семь моделей расчета дисконтированных затрат для уровней напряжения 3, 6, 10, 20, 35, 110 и 220 кВ и одна модель выбора рационального напряжения распределительной сети газовых месторождений.

2. Расширен диапазон изменения исследуемых факторов, включая число кустов газовых скважин – с 16 до 20, протяженность воздушных линий – с 20 до 40 км и коэффициент прироста нагрузки – с 10 до 25.

3. Обеспечен учет особенностей электрических нагрузок периода бурения, достигающих 2500 кВт на куст, а также увеличенной протяженности электрических сетей – до 40 км.

4. Выполнена апробация разработанных моделей на Тымпучиканском нефтегазоконденсатном месторождении, подтвердившая гипотезу о повышении экономической эффективности при выборе уровня напряжения с учетом полного жизненного цикла месторождения.

5. Установлено, что практическое применение разработанных моделей позволяет снизить дисконтированные затраты на 169,545 млн руб., или на 18,7%.

Список литературы

1. Вяхирев Р.И., Коротаев Ю.П., Кабанов Н.И. Теория и опыт добычи газа. – М.: Недра, 1998. – 479 с.
2. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: учебник для вузов по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства». – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
3. Norouzi H, Golchoob Firoozjaee M, Rezaei M. Investigation of distribution system modification using operation voltage unification in order to decrease interruptions in dust climate // Heliyon. 2024, vol. 10(17), p. 37335. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e37335.
4. Fatma Avli Firis Determining the optimum medium voltage level by analysis of different voltage levels // World Journal of Environmental Research. 2020, no. 10, pp. 37-49.
5. Узбеков М.О., Ньматжонов А.А.У. Выбор напряжения по известной длине линии и передаваемой мощности // Современные инновации. – 2019. – №2(30). – С. 30-34.
6. Богачков И.М. Поддержка принятия решения при выборе рационального напряжения системы электроснабжения газового месторождения с учётом его жизненного цикла: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Омск: ОмГТУ, 2021. – 20 с.
7. Богачков И.М. Математические модели расчета оптимального напряжения системы внешнего электроснабжения газовых месторождений полученные с применением теории планирования эксперимента // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – №1(50). – С. 4-9.
8. Bogachkov I.M. The Study of the Power Supply System of the Existing Gas Fields in Western Siberia using the Theory of Experimental Planning // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021, vol. 1118, p. 012030. DOI: 10.1088/1757-899X/1118/1/012030.
9. Богачков И.М. Оптимизация системы внешнего электроснабжения путем выбора прогрессивного класса напряжения с учетом всего жизненного цикла газового месторождения // Известия Транссиба. – 2020. – №2(42). – С. 114-130.
10. Bogachkov I.M. Designing power supply systems with account to the entire life cycle of the gas field as exemplified by the existing fields in Western Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 720, no. 1, p. 012096.
11. Богачков И.М. Хамитов Р.Н. Коэффициент распределения нагрузки по линии электропередачи, как фактор выбора класса напряжения // Динамика систем, механизмов и машин: материалы XIV Международной IEEE научно-технической конференции, 10-12 ноября 2020 г., Омск. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020. – Т. 8, №3. – С. 30-36.
12. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976.
13. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (вторая редакция) (утв. Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике от 21.06.1999 № ВК 477) URL: consultant.ru/law/podborki/ocenka_jeffektivnosti_investicionnyh_proektov/
14. Богачков И.М., Хамитов Р.Н. Алгоритм выбора класса напряжения для системы электроснабжения газового месторождения // Вестник Ивановского энергетического университета. – 2021. – Вып. 2. – С. 32-39.

Сведения об авторе:

Яркина Анна Александровна – соискатель.