УДК 621.313.333:622.692.4

Кошелев М.А.,
студент
магистрант кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов»
Тюменский индустриальный университет
Россия, г. Тюмень

МЕТОДИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЧРП НА ОБЪЕКТАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

Аннотация: *Предложена методика многокритериальной оценки проектов частотно-регулируемого электропривода на объектах магистральных нефтепроводов. Методика объединяет обязательную проверку технологической допустимости, расчет энергетической и инвестиционной эффективности, оценку надежности, управляемости и экологических результатов. Для агрегирования разнородных показателей применены нормирование, весовые коэффициенты и анализ иерархий. Определены правила исключения недопустимых вариантов и проверки устойчивости рейтинга. Представлен алгоритм подготовки решения для выбора количества и размещения ЧРП.*

Ключевые слова: *частотно-регулируемый привод, магистральный нефтепровод, многокритериальная оценка, анализ иерархий, энергоэффективность, надежность, инвестиционный анализ.*

Annotation: *A multi-criteria methodology is proposed for evaluating variable-frequency drive projects at main oil pipeline facilities. It combines mandatory technological feasibility checks with energy and investment calculations and the assessment of reliability, controllability and environmental effects. Normalization, weighting and the analytic hierarchy process are used to aggregate*

heterogeneous indicators. Rules for rejecting infeasible alternatives and testing ranking robustness are defined. An algorithm is presented for selecting the number and location of variable-frequency drives.

Key words: *variable-frequency drive, main oil pipeline, multi-criteria assessment, analytic hierarchy process, energy efficiency, reliability, investment analysis.*

ВВЕДЕНИЕ

Выбор варианта частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) для магистрального нефтепровода представляет многокритериальную задачу. Альтернативы различаются числом регулируемых агрегатов, местом установки, схемой резервирования, диапазоном частот и способом интеграции в автоматизированную систему управления. Минимальное энергопотребление не гарантирует наилучшего решения: вариант может иметь высокий CAPEX, недостаточную готовность, недопустимые гармонические искажения либо не обеспечивать давление и кавитационный запас во всех режимах.

Отраслевой подход к оценке ЧРП предусматривает гидравлический расчет режимов, определение расхода электроэнергии, перепадов давления и цикличности нагружения [6, 7]. Вместе с тем итоговое инвестиционное решение требует прозрачного объединения количественных и качественных характеристик. Цель работы – сформировать воспроизводимую методику, которая отделяет обязательные ограничения от критериев предпочтительности и позволяет ранжировать технически допустимые варианты.

Предлагаемая методика предназначена для предпроектной и проектной стадий, а также для формирования программы модернизации нескольких НПС. Ее применение не заменяет гидравлическое моделирование, расчеты промышленной безопасности и экспертизу проекта, а структурирует исходные данные и правила принятия решения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть сформировано множество альтернатив $A = \{A_1, A_2, \ldots, A_m\}$. В него включают базовый вариант без ЧРП, установку одного регулируемого агрегата на выбранной НПС, несколько индивидуальных приводов, групповой преобразователь и комбинированные схемы. Для исключения систематической ошибки все варианты должны обеспечивать одинаковую транспортную работу, график поставки и нормативный уровень резервирования.

Оценку проводят в два контура. Первый контур – фильтр допустимости: вариант исключается, если нарушает хотя бы одно обязательное ограничение. Второй контур – многокритериальное ранжирование оставшихся решений. Такое разделение принципиально: высокий интегральный балл не может компенсировать превышение разрешенного давления, выход насоса из рабочей зоны или отрицательный NPV при установленном инвестором требовании окупаемости.

Таблица 1.

Обязательные ограничения вариантов ЧРП

Группа	***Проверяемое условие***	***Результат нарушения***
Гидравлика	*$P_{min} \le P \le P_{max}$; допустимый расход; устойчивый режим*	*Исключение варианта*
Насос	*Рабочая зона; кавитационный запас; вибрационные ограничения*	*Исключение варианта*
Электропривод	*Ток, момент, нагрев, диапазон частоты*	*Исключение или доработка*
Электросеть	*Мощность КЗ, гармоники, защита, селективность*	*Доработка или исключение*
Надежность	*Выполнение категории и требуемого резервирования*	*Исключение варианта*
Экономика	*$NPV \ge 0$ либо иной корпоративный порог*	*Исключение по решению инвестора*

СИСТЕМА КРИТЕРИЕВ

Для допустимых вариантов предлагается иерархия из пяти групп: энергетическая результативность, экономика, технологическая эффективность, надежность и безопасность, экологические и организационные эффекты. Система должна быть полной, но не избыточной: два показателя, отражающих один результат, создают двойной учет. Например, годовую экономию электроэнергии и снижение удельного электропотребления допустимо использовать одновременно только при объяснении различий в нормировании и назначении.

Таблица 2.

Рекомендуемая структура критериев

Код	***Критерий***	***Единица / направление***
E1	*Годовое снижение электропотребления*	*МВт·ч; максимум*
E2	*Снижение удельного расхода энергии*	*%; максимум*
F1	*Чистый дисконтированный доход*	*руб.; максимум*
F2	*Дисконтированный срок окупаемости*	*лет; минимум*
T1	*Доля режимов без дросселирования*	*%; максимум*
T2	*Точность поддержания давления/расхода*	*отклонение, %; минимум*
R1	*Сокращение пусков и циклов давления*	*%; максимум*
R2	*Коэффициент готовности решения*	*доля; максимум*
S1	*Технологический риск*	*балл/вероятность; минимум*
G1	*Снижение косвенных выбросов*	*т CO_2-экв.; максимум*

Энергетические показатели рассчитывают относительно базовой линии. Согласно ISO 50006, базовая линия служит основой сравнения энергетической результативности, а при существенном влиянии переменных требуется нормализация [10]. Для нефтепровода такими переменными являются объем и направление перекачки, плотность и вязкость нефти, температура, состав работающих НПС, состояние внутренней поверхности и ограничения смежных участков.

Экономический блок формируют на основе полного денежного потока. CAPEX включает силовой преобразователь, трансформаторы, коммутацию, фильтры, охлаждение, строительную часть, АСУ ТП и пусконаладку; OPEX – обслуживание, запасные модули, собственные потери и сервис. Доходная часть учитывает экономию энергии и мощности, ремонтов и потерь от простоев. Последние две составляющие принимают только при наличии статистически или расчетно подтвержденной причинной связи.

Технологический блок отражает способность ЧРП расширить реестр устойчивых режимов и уменьшить дросселирование. Надежность характеризуется не только плавным пуском, но и готовностью самого преобразователя, ремонтопригодностью, наличием байпаса и запасных частей. Риск оценивается по сочетанию вероятности события и тяжести последствий; недопустимые риски переводятся в ограничения первого контура.

РАСЧЕТ ЕДИНИЧНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Гидравлический и энергетический расчет выполняют для каждого режима i с продолжительностью t_i. Мощность определяется по расходу, напору и КПД цепочки «насос – двигатель – преобразователь». Годовое изменение потребления электроэнергии равно разности базового и проектного балансов:

$$\Delta W_j = \Sigma_i(Рбаз,i - P_j,i)\cdot t_i - Wсоб,j \quad (1)$$

где j – номер альтернативы; Wсоб,j – собственное потребление дополнительных систем. Для сопоставления участков разной длины и

грузооборота применяют удельный показатель кВт·ч/(тыс. т·км), а для одной станции – кВт·ч/т. Значения подтверждают расчетом и данными измерений; использование только паспортного кубического закона без характеристики сети недостаточно [4, 9].

Надежностный результат можно выразить изменением приведенного числа циклов давления, числа прямых пусков, ожидаемой продолжительности вынужденных простоев и коэффициента готовности. Если исходные данные ограничены, показатель задают интервально и анализируют чувствительность. Экспертный балл применяют лишь к тем характеристикам, которые невозможно измерить на стадии сравнения, например к сложности интеграции или доступности сервиса.

Экологический эффект от сокращения электропотребления рассчитывают как произведение ΔW на утвержденный для отчетности коэффициент выбросов электроэнергии. Коэффициент должен быть единым для всех альтернатив и сопровождаться ссылкой на принятую корпоративную или региональную методику; произвольное значение способно изменить рейтинг и не допускается.

НОРМИРОВАНИЕ И ВЕСА

Поскольку показатели имеют разные единицы, их переводят в безразмерную шкалу [0; 1]. Для критерия, который необходимо максимизировать, линейное нормирование имеет вид:

$$z_{ij} = (x_{ij} - x_i,min)/(x_i,max - x_i,min) \quad (2)$$

Для минимизируемого критерия числитель меняют на $(x_i,max - x_{ij})$. Если размах равен нулю, критерий не влияет на различие вариантов и исключается из агрегирования. При наличии нормативного целевого значения предпочтительно кусочно-линейное нормирование: достижение целевого уровня соответствует единице, а превышение не создает необоснованного преимущества.

Весовые коэффициенты определяют методом анализа иерархий (AHP). Эксперты попарно сравнивают важность критериев по шкале 1–9, после чего из матрицы сравнений получают вектор приоритетов. Согласованность проверяют через индекс CI и отношение согласованности CR:

$$CI = (\lambda max - n)/(n - 1); \quad CR = CI/RI \tag{3}$$

При CR не более 0,10 суждения обычно считают приемлемо согласованными; при превышении порога сравнения пересматривают. Состав экспертной группы должен охватывать технологию транспорта, энергетику, надежность, промышленную безопасность, автоматизацию и инвестиционный анализ. Весы утверждают до просмотра итогового рейтинга, иначе возникает риск подгонки результата под заранее выбранную альтернативу.

Если экспертная процедура недоступна, применяют несколько прозрачных наборов весов, отражающих разные стратегии: энергосбережение, минимизация риска, ограниченный бюджет. Окончательное решение считают устойчивым, если лидер сохраняется при разумных изменениях весов. Единственный произвольно назначенный набор не должен использоваться как доказательство эффективности.

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА

После нормирования интегральный индекс альтернативы рассчитывается как взвешенная сумма:

$$I_j = \Sigma_i \, w_i \cdot z_{ij}, \quad \Sigma_i \, w_i = 1 \tag{4}$$

Индекс применяют только внутри конкретной задачи и набора альтернатив; значение 0,75 не является универсальной характеристикой качества ЧРП. Вместе с I_j в итоговой таблице приводят исходные физические показатели, результаты фильтра ограничений и интервалы неопределенности. Это сохраняет инженерный смысл и позволяет понять, за счет каких преимуществ сформирован рейтинг.

Таблица 3.

Форма итоговой матрицы решения

Вариант	***Допустимость***	***ΔW***	***NPV***	***DPP***	***Готовность***	***Риск***	***Индекс I***
A_0 — без ЧРП	*да/нет*	*значение*	*значение*	*значение*	*значение*	*значение*	*расчет*
A_1 — один ЧРП	*да/нет*	*значение*	*значение*	*значение*	*значение*	*значение*	*расчет*
A_2 — несколько ЧРП	*да/нет*	*значение*	*значение*	*значение*	*значение*	*значение*	*расчет*
A_3 — групповой ЧРП	*да/нет*	*значение*	*значение*	*значение*	*значение*	*значение*	*расчет*

Для неопределенных параметров задают диапазоны или вероятностные распределения. Минимальный набор анализа чувствительности включает грузооборот, тариф на электроэнергию, CAPEX, коэффициент готовности, стоимость ремонта, ставку дисконтирования и остаточный срок службы. Если небольшое изменение одного параметра меняет лидера, решение признается неустойчивым и требуется дополнительное обследование или пилотный проект.

Рекомендуется также проверить доминирование: вариант исключают, если другой вариант не хуже по всем критериям и лучше хотя бы по одному при сопоставимых ограничениях. Такая процедура уменьшает число альтернатив до экспертного обсуждения и предотвращает компенсацию явно слабых решений манипуляцией весами.

ПОРЯДОК ПРИМЕНЕНИЯ

Методика реализуется в восемь последовательных этапов. Сначала определяют границы объекта и базовый период, затем собирают режимные и ремонтные данные. Далее формируют технически различимые альтернативы,

выполняют гидравлический и электротехнический расчеты, применяют фильтр обязательных ограничений, рассчитывают показатели жизненного цикла, определяют веса и интегральные индексы, после чего проводят анализ чувствительности и готовят решение.

Таблица 4.

Этапы многокритериальной оценки

Этап	***Содержание***	***Выходной документ***
1	*Границы, цель, базовая линия*	*Паспорт исследования*
2	*Режимы, измерения, ремонты, ограничения*	*Верифицированная база данных*
3	*Формирование вариантов*	*Реестр альтернатив*
4	*Гидравлические и электрические расчеты*	*Режимные карты*
5	*Проверка допустимости*	*Протокол ограничений*
6	*Энергетика, LCC, NPV, надежность*	*Матрица показателей*
7	*AHP, нормирование, индекс*	*Рейтинг вариантов*
8	*Чувствительность и рекомендация*	*Инвестиционное заключение*

Качество результата определяется качеством исходной информации. Желательны архивные данные АСУ ТП и учета электроэнергии минимум за полный эксплуатационный цикл, сведения о переключениях и ремонтах, паспортные и фактические характеристики насосов. Расчетная модель должна воспроизводить базовые режимы с заранее согласованной точностью. ISO 50001 требует определять и регулярно анализировать показатели энергетической результативности относительно базовой линии [11].

После ввода проекта многокритериальная оценка не завершается. Фактические значения ΔW, готовности, числа циклов давления и затрат на обслуживание сравнивают с проектом. При существенном расхождении

уточняют режимную модель и правила эксплуатации. Таким образом, методика включается в цикл постоянного улучшения «планирование – выполнение – проверка – действие».

ОБСУЖДЕНИЕ

Преимущество предложенной схемы заключается в разделении безопасности и предпочтительности. Ограничения невозможно компенсировать экономией, а интегральный индекс используется только для допустимых вариантов. Одновременно сохраняется возможность учитывать неэнергетические эффекты: снижение циклической нагрузки, гибкость диспетчерского управления, ремонтопригодность и готовность.

Ограничение метода связано с субъективностью весов и неполнотой надежностной статистики. Для снижения влияния этих факторов необходимы межфункциональная экспертная группа, проверка согласованности AHP, интервальная оценка и публикация исходной матрицы. Методика не должна создавать ложную точность: если показатель задан экспертно, это явно отмечают, а результат представляют диапазоном.

Практический результат – не только рейтинг оборудования, но и выявление условий, при которых лидер меняется. Например, индивидуальные ЧРП могут быть предпочтительны по управляемости и резервированию, а групповой – по CAPEX; снижение грузооборота усиливает ценность регулирования, но одновременно уменьшает абсолютную транспортную работу. Поэтому окончательная рекомендация должна содержать сценарные границы применимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика объединяет обязательную проверку технологической допустимости и многокритериальное ранжирование. В систему включены энергетические, финансовые, технологические, надежностные, рисковые и экологические показатели; предусмотрены

нормирование, определение весов методом AHP и проверка согласованности экспертных суждений.

Для принятия решения интегральный индекс необходимо сопровождать исходными физическими показателями, расчетом жизненного цикла и анализом чувствительности. Такой формат позволяет обоснованно выбирать количество и размещение ЧРП, исключать небезопасные решения и фиксировать предпосылки эффективности для последующей проверки по фактическим данным эксплуатации.

Использованные источники:

1. Шабанов, В. А. Методика многокритериальной оценки эффективности применения ЧРП на объектах магистральных нефтепроводов / В. А. Шабанов, А. Р. Калимгулов, Э. Ф. Хакимов, П. А. Ревель-Муроз // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — 2016. — № 2. — С. 11–17.

2. РД-29.160.30-КТН-071-15. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Методика оценки эффективности применения частотно-регулируемого электропривода на объектах магистральных нефтепроводов ОАО «АК «Транснефть». — Москва : ОАО «АК «Транснефть», 2015. — 119 с.

3. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. — Москва : Радио и связь, 1993. — 278 с.

4. Saaty, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process / T. L. Saaty // International Journal of Services Sciences. — 2008. — Vol. 1, No. 1. — P. 83–98. — DOI 10.1504/IJSSCI.2008.017590.

5. Ishizaka, A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process / A. Ishizaka, A. Labib // Expert Systems with Applications. — 2011. — Vol. 38, No. 11. — P. 14336–14345. — DOI 10.1016/j.eswa.2011.04.143.

6. ГОСТ 33969-2016 (ISO/ASME 14414:2015). Энергетическая эффективность. Оценка энергоэффективности насосных систем. — Введ. 2018-01-01. — Москва : Стандартинформ, 2017. — 46 с.

7. ISO 50006:2023. Energy management systems — Evaluating energy performance using energy performance indicators and energy baselines. — 2nd ed. — Geneva : International Organization for Standardization, 2023. — 36 p.

8. ISO 50015:2014. Energy management systems — Measurement and verification of energy performance of organizations — General principles and guidance. — Geneva : International Organization for Standardization, 2014.

9. ГОСТ Р ИСО 50001-2012. Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению. — Введ. 2012-12-01. — Москва : Стандартинформ, 2012.

10. Миркин, Б. Г. Проблема группового выбора / Б. Г. Миркин. — Москва : Наука, 1974. — 256 с.

11. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. — Москва : Наука, 1981. — 208 с.