

Кошелев М.А.,

студент

магистрант кафедры «Транспорт углеводородных ресурсов»

Тюменский индустриальный университет

Россия, г. Тюмень

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ НА НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЯХ

***Аннотация:** Рассмотрен комплексный подход к оценке внедрения частотно-регулируемого электропривода магистральных насосных агрегатов. Показана связь энергетического эффекта с характеристикой трубопроводной сети, загрузкой станции и долей времени работы на пониженной производительности. Сформирована последовательность гидравлического, энергетического, надежности и экономического расчета. Выполнена верификация подхода по опубликованным данным типовой нефтеперекачивающей станции. Установлены условия, при которых применение ЧРП обеспечивает максимальный интегральный эффект.*

***Ключевые слова:** магистральный нефтепровод, нефтеперекачивающая станция, магистральный насос, частотно-регулируемый электропривод, энергоэффективность, надежность, экономическая эффективность.*

***Annotation:** The paper considers an integrated approach to evaluating the implementation of a variable-frequency electric drive for main pumping units. The energy effect is linked to the pipeline system curve, station load and the share of reduced-capacity operation. A sequence of hydraulic, energy, reliability and economic calculations is proposed. The approach is verified using published data*

for a typical oil pumping station. The conditions providing the highest integrated effect of a variable-frequency drive are identified.

Key words: *main oil pipeline, oil pumping station, main pump, variable-frequency drive, energy efficiency, reliability, economic efficiency.*

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергия, потребляемая магистральными и подпорными насосными агрегатами, формирует значительную часть эксплуатационных затрат нефтеперекачивающей станции (НПС). При этом фактический грузооборот, свойства нефти, ограничения смежных станций и графики ремонта изменяются, поэтому оборудование длительно работает вне расчетной точки. Традиционное регулирование дросселированием или периодическим изменением числа включенных агрегатов обеспечивает требуемое давление и расход, но сопровождается потерями энергии либо циклическими переходными процессами [1, 2].

Частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) изменяет частоту вращения рабочего колеса и тем самым согласует напорно-расходную характеристику насоса с характеристикой трубопровода. Дополнительный эффект связан с плавным пуском и остановом, ограничением пускового тока, снижением амплитуды колебаний давления и механических нагрузок. Однако наличие преобразователя частоты создает собственные потери, повышает капитальные затраты и предъявляет требования к качеству электроэнергии, охлаждению и резервированию. Следовательно, решение о внедрении нельзя принимать только по паспортной зависимости мощности от частоты вращения [4, 5].

Цель исследования – разработать последовательность оценки технической и экономической эффективности ЧРП магистральных насосов и определить условия его рационального применения на НПС. Научно-

практическая задача состоит в совместном учете энергетического результата, технологических ограничений, надежности и стоимости жизненного цикла.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Для геометрически неизменного центробежного насоса в области подобных режимов применяют законы пропорциональности: подача изменяется приблизительно пропорционально частоте вращения, напор – ее квадрату, а мощность на валу – кубу [1, 9]. Если индекс 0 относится к номинальному режиму, а индекс 1 – к регулируемому, то:

$$Q_1/Q_0 = n_1/n_0; \quad H_1/H_0 = (n_1/n_0)^2; \quad N_1/N_0 = (n_1/n_0)^3 \quad (1)$$

Кубическая зависимость объясняет высокий потенциал энергосбережения при снижении подачи. Вместе с тем она не является готовым прогнозом экономии: статическая составляющая напора не уменьшается пропорционально частоте, КПД насоса зависит от положения рабочей точки, а в преобразователе, двигателе и питающей сети возникают потери. Поэтому расчет выполняют по совмещенным характеристикам насоса и трубопровода, а не путем механического возведения коэффициента скорости в третью степень.

Характеристику участка нефтепровода для установившегося режима можно представить как сумму статического и гидравлического напоров:

$$H_{тр}(Q) = H_{ст} + K \cdot Q^2 \quad (2)$$

где $H_{ст}$ – геодезическая и иная не зависящая от расхода составляющая; K – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления; Q – расход. Рабочая точка определяется пересечением $H_{тр}(Q)$ с характеристикой насосной станции. Требуемая электрическая мощность регулируемого агрегата рассчитывается по полезной гидравлической мощности с учетом КПД насоса η_n , двигателя η_d и преобразователя $\eta_{пч}$:

$$P_{эл} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / (\eta_n \cdot \eta_d \cdot \eta_{пч}) \quad (3)$$

Энергетическое преимущество возрастает при высокой доле динамического сопротивления, широком диапазоне требуемых расходов и

значительной продолжительности работы ниже номинальной подачи. При почти постоянной максимальной производительности дополнительная ступень преобразования может, напротив, ухудшить результат. В опубликованном исследовании типовой НПС отмечено, что на максимальном режиме питание через ЧРП менее эффективно прямого питания из-за дополнительных потерь преобразователя [9].

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ

Оценку целесообразно выполнять не для одной расчетной точки, а для годового набора технологических режимов. Исходные данные включают почасовой или посуточный расход, давления на входе и выходе НПС, свойства нефти, фактическую мощность агрегатов, положения регулирующей арматуры, число пусков и остановов, ограничения по кавитации и допустимым давлениям. Базовый период должен быть репрезентативным; принципы ISO 50006 предусматривают сопоставление отчетного режима с энергетической базовой линией и нормализацию по существенно влияющим переменным [10].

Таблица 1.

Состав показателей для оценки внедрения ЧРП

<i>Блок</i>	<i>Основные показатели</i>	<i>Назначение</i>
<i>Технологический</i>	<i>Q; давления; диапазон частот; запас по кавитации</i>	<i>Проверка реализуемости режимов</i>
<i>Энергетический</i>	<i>кВт·ч; кВт·ч/т; кВт·ч/(тыс. т·км); КПД</i>	<i>Определение экономии энергии</i>
<i>Надежность</i>	<i>число пусков; циклы давления; простои; ремонты</i>	<i>Оценка ресурсного эффекта</i>
<i>Экономический</i>	<i>CAPEX; OPEX; NPV; DPP; PI</i>	<i>Инвестиционное решение</i>
<i>Электротехнический</i>	<i>гармоники; $\cos \varphi$; нагрузка трансформаторов</i>	<i>Проверка совместимости с сетью</i>

На первом этапе строят базовую модель работы без ЧРП. Для каждого режима фиксируют продолжительность t_i и фактическую мощность $P_{\text{баз},i}$. Если применяется циклическая перекачка, учитывают время работы и простоя, потери переходных процессов и расход энергии вспомогательными системами. Расчетную модель калибруют по данным коммерческого или технического учета; допустимость отклонения должна быть заранее установлена программой измерений.

На втором этапе для того же объема транспортировки определяют конфигурацию агрегатов с ЧРП, частоту вращения и рабочую точку. Обязательны проверки минимально допустимой подачи насоса, кавитационного запаса, нагрева двигателя при пониженной скорости, максимального давления, устойчивости совместной работы параллельных агрегатов и запретных зон вибрации. При нескольких насосах обычно сравнивают варианты «один регулируемый агрегат + нерегулируемые», индивидуальные ЧРП и групповой преобразователь.

На третьем этапе рассчитывают годовой баланс. Экономия электроэнергии определяется при одинаковом полезном результате – объеме перекачки и соблюдении графика поставки:

$$\Delta W = \Sigma(P_{\text{баз},i} \cdot t_i) - \Sigma(P_{\text{чрп},i} \cdot t_i) - W_{\text{соб}} \quad (4)$$

где $W_{\text{соб}}$ – собственное потребление преобразователя, охлаждения и сопутствующих систем, если оно не включено в $P_{\text{чрп},i}$. Денежный результат должен учитывать не только тариф за активную энергию, но и плату за мощность, потери, реактивную составляющую, стоимость ремонтов, вынужденных простоев и возможного недоотпуска. Эффект от надежности включают только при наличии статистики отказов и документированной модели изменения межремонтных интервалов; недопустимо автоматически приравнивать любой плавный пуск к фиксированной денежной экономии.

На четвертом этапе формируют денежный поток проекта. Инвестиции включают преобразователь, трансформаторное и коммутационное

оборудование, гармонические фильтры, кабели, систему охлаждения, АСУ ТП, строительно-монтажные и пусконаладочные работы. Эксплуатационные затраты охватывают обслуживание, запасные модули и потери электроэнергии. Основными критериями являются чистый дисконтированный доход NPV, дисконтированный срок окупаемости DPP и индекс доходности PI:

$$NPV = -I_0 + \sum CF_t / (1+r)^t; \quad PI = \sum CF_t / (1+r)^t / I_0 \quad (5)$$

Расчет выполняют минимум в трех сценариях: консервативном, базовом и оптимистическом. Чувствительность проверяют по грузообороту, цене электроэнергии, капитальным затратам, коэффициенту готовности ЧРП, сроку службы и ставке дисконтирования. Такой подход предотвращает выбор оборудования, эффективного только при одном благоприятном режиме.

ВЕРИФИКАЦИЯ ПОДХОДА

Для проверки логики использованы открытые результаты исследования НПС с восемью насосами ЦНС 315-630 и электродвигателями мощностью 1000 кВт. Авторы рассмотрели замену оборудования на шесть агрегатов НМВ 800-400 и последующее частотное регулирование. Для исходного максимального режима приведена потребляемая мощность 4585 кВт, для модернизированного варианта — 3705 кВт при небольшом увеличении производительности; снижение мощности составило 19,2 % [9].

Таблица 2.

Опубликованные результаты модернизации типовой НПС [9]

<i>Показатель</i>	<i>Исходное оборудование</i>	<i>Модернизированный вариант</i>
<i>Число установленных агрегатов</i>	8	6 (4 рабочих, 2 резервных)
<i>Мощность на максимальном режиме, кВт</i>	4585	3705

<i>КПД технологического участка, режим 1, %</i>	59,6	76,7
<i>Удельное потребление, режим 1, кВт·ч/т</i>	2,40	1,93
<i>Годовая экономия электроэнергии</i>	—	<i>не менее 4,4 млн кВт·ч</i>

Для регулируемых режимов опубликовано снижение потребляемой мощности относительно постоянной частоты и дросселирования от 9,1 до 37,0 %, а максимальное повышение КПД установки составило 28,1 процентного пункта. Оцененная авторами годовая экономия — не менее 4,4 млн кВт·ч, или 18,5 млн руб. в ценах 2024 г. [9]. Эти значения относятся к конкретной конфигурации и не должны напрямую переноситься на другую НПС, но подтверждают необходимость расчета по режимной карте: эффект существенно различается между режимами.

Результаты также показывают, что часть эффекта получена заменой насосов и оптимизацией их количества, а часть — регулированием частоты. Для корректного инвестиционного обоснования эти мероприятия следует разделять по вариантам: сохранение оборудования без ЧРП; оптимизация режимов; замена насосов; установка ЧРП; комбинированная модернизация. Иначе экономия, обусловленная ростом КПД новых насосов, будет ошибочно полностью отнесена к преобразователю частоты.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рациональная область ЧРП формируется сочетанием четырех условий: переменный грузооборот; продолжительная работа на частичных подачах; наличие непроизводительного дросселирования или циклической перекачки; достаточный остаточный ресурс основного оборудования. Наибольший эффект ожидается, когда регулируемый насос позволяет удерживать агрегаты в допустимой зоне КПД и уменьшить число переключений. При высокой

статической составляющей напора и узком диапазоне расхода потенциал ниже.

К рискам относятся рост гармонических и высокочастотных воздействий на изоляцию двигателя, дополнительные потери и нагрев, отказ силовых модулей, сложность ремонта и зависимость от сервисной поддержки. На стадии проектирования предусматривают электромагнитную совместимость, фильтрацию, байпас, резервирование критических функций и алгоритмы безопасного перехода на нерегулируемый режим. Технологическая надежность имеет приоритет над расчетной экономией энергии.

После ввода ЧРП результат подтверждают измерениями по принципу «до/после» с нормализацией по объему, плотности и вязкости нефти, температуре, конфигурации участка и внешним ограничениям. Контрольные показатели: удельное электропотребление, КПД технологического участка, число пусков, диапазон давления, продолжительность простоев и затраты на ремонт. Такой мониторинг соответствует системному подходу энергетического менеджмента [10, 11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность ЧРП магистральных насосов определяется не паспортными свойствами преобразователя, а изменением работы системы «насос — электродвигатель — трубопровод — график перекачки». Достоверная оценка требует моделирования годовой режимной карты, учета КПД всех элементов, проверки технологических ограничений и сопоставления вариантов при одинаковом объеме транспортировки.

В инвестиционную модель необходимо включать энергетический, ресурсный и эксплуатационный эффекты, но надежность экономии учитывать только при подтвержденной статистике. Опубликованный пример типовой НПС показывает, что снижение мощности в регулируемых режимах может заметно различаться, а на максимальной производительности потери преобразователя способны уменьшить преимущество. Поэтому наиболее

обоснованным является поэтапный выбор количества и расположения регулируемых агрегатов с последующей верификацией экономии по данным учета.

Использованные источники:

1. Васильев, Г. Г. Трубопроводный транспорт нефти : учебник для вузов : в 2 т. Т. 1 / Г. Г. Васильев, Г. Е. Коробков, А. А. Коршак [и др.] ; под ред. С. М. Вайнштока. — Москва : Недра-Бизнесцентр, 2002. — 407 с.
2. Зайцев, Л. А. Регулирование режимов магистральных нефтепроводов / Л. А. Зайцев, Г. С. Ясинский. — Москва : Недра, 1980. — 187 с.
3. Булгаков, А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А. А. Булгаков. — Москва : Наука, 1966. — 297 с.
4. Шабанов, В. А. Алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию снижения расхода электроэнергии / В. А. Шабанов, Е. Ф. Хакимов, С. Ф. Шарипова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2013. — Т. 9, № 2. — С. 34–42.
5. Шабанов, В. А. Критерии эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на нефтеперекачивающих станциях / В. А. Шабанов, С. Ф. Шарипова // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2013. — Т. 9, № 1. — С. 38–43.
6. Шабанов, В. А. Методика многокритериальной оценки эффективности применения ЧРП на объектах магистральных нефтепроводов / В. А. Шабанов, А. Р. Калимгулов, Е. Ф. Хакимов, П. А. Ревель-Муроз // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — 2016. — № 2. — С. 11–17.
7. 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.

8. РД 153-39.4-113-01. Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов. — Введ. 2002-07-01. — Москва, 2001.

9. Носиков, Н. А. Структурно-параметрический синтез комплекса электрооборудования нефтеперекачивающей станции / Н. А. Носиков, Ю. А. Макаричев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2026. — Т. 34, № 1. — С. 164–179. — DOI 10.14498/tech.2026.1.9.

10. ISO 50006:2023. Energy management systems — Evaluating energy performance using energy performance indicators and energy baselines. — Geneva : ISO, 2023.

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