УДК 621.313.333:621

Хайдаров Хумоюн Мухтор угли

доцент

Андижанский государственный технический институт

Республика Узбекистан, г. Андижан

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСНОГО АГРЕГАТА ПО УДЕЛЬНОМУ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЮ

Аннотация. *В статье рассматривается методика моделирования энергоэффективности частотно-регулируемого асинхронного электропривода центробежного насосного агрегата на основе удельного энергопотребления. Цель исследования состоит в формировании расчетного подхода, позволяющего сопоставлять режимы работы насоса при изменении частоты вращения с учетом подачи, напора, потребляемой электрической мощности и КПД компонентов системы. Предложена структура модели, основанная на характеристиках насосного агрегата, законах подобия и энергетическом балансе электропривода. Представлен иллюстративный расчет для нескольких относительных скоростей, который демонстрирует методику вычисления удельного энергопотребления, но не является результатом натурного эксперимента.*

Ключевые слова: *асинхронный электропривод, центробежный насос, частотное регулирование, моделирование, удельное энергопотребление, КПД, энергосбережение.*

MODELING THE ENERGY EFFICIENCY OF A VARIABLE-FREQUENCY INDUCTION MOTOR DRIVE FOR A CENTRIFUGAL PUMPING UNIT USING SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION

Khaydarov Khumoyun Mukhtor ugli
Associate Professor Andijan State Technical Institute
Republic of Uzbekistan, Andijan

Abstract. *The article presents a methodology for modeling the energy efficiency of a variable-frequency induction motor drive for a centrifugal pumping unit using specific energy consumption. The objective is to develop a calculation approach for comparing pump operating modes at different rotational speeds while accounting for flow rate, head, electrical input power and component efficiencies. The proposed model combines pump performance characteristics, affinity laws and the energy balance of the drive system. An illustrative calculation for several relative speeds demonstrates the calculation procedure but does not represent field-experiment results.*

Keywords: *induction motor drive, centrifugal pump, variable-frequency control, modeling, specific energy consumption, efficiency, energy saving.*

Введение

Центробежные насосные агрегаты широко применяются в системах водоснабжения, орошения, теплоснабжения и технологических процессах. Значительная доля эксплуатационных затрат таких систем связана с потреблением электрической энергии электродвигателем насоса. При этом реальный режим работы часто отличается от расчетного: расход меняется в течение суток, требуемый напор зависит от сопротивления сети, а насос может длительно работать при частично закрытой задвижке. Поэтому оценка энергоэффективности только по паспортной мощности двигателя или общему потреблению электроэнергии не дает достаточного представления о качестве работы системы.

Одним из распространенных способов регулирования подачи является изменение частоты питания асинхронного двигателя с помощью

преобразователя частоты. При снижении частоты уменьшается скорость вращения ротора, а вместе с ней меняются подача и напор насоса. Для центробежных насосов применимы законы подобия, согласно которым при сходных условиях подача приблизительно пропорциональна частоте вращения, напор — квадрату частоты, а потребляемая мощность — кубу частоты. Однако данные зависимости являются приближенными: фактический результат определяется системной характеристикой, статическим напором, КПД насоса и потерями в преобразователе и двигателе [1–3].

Актуальность исследования состоит в необходимости оценивать не только абсолютное снижение мощности, но и энергию, затрачиваемую на перекачивание единицы объема жидкости при требуемом напоре. Такой показатель позволяет сопоставлять режимы с разной подачей и выявлять ситуации, когда снижение мощности сопровождается чрезмерным снижением полезной производительности.

Цель работы — разработать методику моделирования энергоэффективности частотно-регулируемого асинхронного электропривода центробежного насосного агрегата по удельному энергопотреблению. Для достижения цели решаются задачи: сформировать расчетную структуру модели; определить взаимосвязь частоты вращения, подачи, напора и мощности; учесть КПД насоса, электродвигателя и преобразователя; предложить алгоритм сравнения режимов; продемонстрировать вычисления на условном примере.

Материалы и методы исследования

1. Структура моделируемой системы

Объектом моделирования является электромеханическая система, включающая преобразователь частоты, асинхронный электродвигатель, механическую передачу (при наличии), центробежный насос и

трубопроводную сеть. На вход модели подаются заданная частота вращения или частота питания, характеристики насоса и сети, плотность жидкости, а также параметры КПД двигателя и преобразователя. Выходными переменными являются подача Q, полный напор H, потребляемая электрическая мощность Рэл, полезная гидравлическая мощность Рг и удельное энергопотребление.

Для корректного моделирования следует различать частоту питающего напряжения f и фактическую частоту вращения ротора n. Синхронная скорость асинхронного двигателя определяется выражением $n_s = 60f/p$, если p — число пар полюсов. Фактическая скорость ниже синхронной на величину скольжения s: $n = n_s(1-s)$. При изменении частоты преобразователем необходимо учитывать допустимый диапазон напряжения, момент нагрузки и возможность охлаждения двигателя на малых скоростях. В упрощенной модели скорость насоса можно связывать с измеренной скоростью вала, а не только с заданной частотой.

2. Законы подобия центробежного насоса

Для одного и того же насоса при неизменном диаметре рабочего колеса и близких условиях подобия используются зависимости:

$$\frac{Q_2}{Q_1} \approx \frac{n_2}{n_1}, \qquad \frac{H_2}{H_1} \approx \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2, \qquad \frac{P_2}{P_1} \approx \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$$

Здесь Q — объемная подача, H — напор, P — мощность на валу насоса, n — частота вращения. Эти соотношения полезны для первичной оценки, но не должны трактоваться как точные при любых условиях. В реальной сети рабочая точка определяется пересечением характеристики насоса с характеристикой системы. Если присутствует существенный статический напор, снижение скорости может привести к гораздо меньшему снижению подачи либо к выходу насоса из требуемого режима [1, 2].

Характеристика трубопроводной сети в общем случае может быть представлена зависимостью $H_{сист}(Q) = H_{ст} + kQ^2$, где $H_{ст}$ — статическая составляющая напора, а kQ^2 описывает потери на трение и местные сопротивления. Для каждой частоты вращения модель должна находить рабочую точку из условия $H_{нас}(Q,n) = H_{сист}(Q)$. Если заводская характеристика насоса доступна в виде таблицы или кривой, предпочтительно использовать интерполяцию данных производителя, а не только кубический закон мощности.

3. Энергетический баланс электропривода

Гидравлическая мощность, передаваемая жидкости, определяется выражением $P_г = \rho g Q H$, где ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с²; Q — расход, м³/с; H — полный напор, м. Мощность на валу насоса можно оценить как $P_{вал} = P_г/\eta_{нас}$, где $\eta_{нас}$ — КПД насоса в текущей рабочей точке.

Потребляемая электрическая мощность включает потери в насосе, электродвигателе и преобразователе частоты. В приближенном стационарном расчете: $P_{эл} = P_г/(\eta_{нас}\cdot\eta_{дв}\cdot\eta_{пч})$, где $\eta_{дв}$ — КПД двигателя, $\eta_{пч}$ — КПД преобразователя частоты. Если передача имеет заметные потери, формула дополняется КПД передачи $\eta_{пер}$: $P_{эл} = P_г/(\eta_{нас}\cdot\eta_{дв}\cdot\eta_{пч}\cdot\eta_{пер})$. Значения КПД не являются постоянными во всем диапазоне нагрузок; для детального анализа следует использовать карты КПД или экспериментальные характеристики компонентов [3, 4].

Для переменных режимов электрическая энергия за период T определяется интегрированием мощности: $E = \int_0^T P_{эл}(t)dt$. При дискретной модели $E \approx \Sigma P_{эл,i}\Delta t_i$. Если мощность задана в кВт, а время — в часах, результат получают в кВт·ч.

4. Показатели удельного энергопотребления

Основной показатель на единицу перекачанного объема определяется как $e_v = E/V$, кВт·ч/м³, где V — объем жидкости за рассматриваемый период. При постоянной подаче V = Qt. Для сравнения режимов с разным напором дополнительно рассчитывается удельное энергопотребление на единицу объема и напора: $e_h = E/(V \cdot H)$, кВт·ч/(м³·м). Если напор меняется во времени, более корректно использовать $e_h = \Sigma E_i/\Sigma(V_i H_i)$.

Показатель e_v удобен для оценки затрат электроэнергии на фактическую подачу, а e_h — для сопоставления режимов при различной гидравлической нагрузке. Однако показатель e_h не заменяет анализа качества водоснабжения: снижение удельного расхода нельзя считать успешным, если система перестает обеспечивать минимально необходимый расход или давление.

Общая эффективность «от сети до воды» может быть определена как ηсист = Рг/Рэл × 100%. Она отражает совместное влияние преобразователя частоты, двигателя и насоса. При расчете по энергии за период следует использовать согласованные значения электрической энергии и гидравлической работы.

Результаты исследования

5. Алгоритм моделирования

Для практического применения предлагается следующий алгоритм.

Этап 1. Ввод исходных данных: номинальная частота и скорость, характеристика насоса Q–H–P или Q–H–η, характеристика трубопроводной сети, диапазон частот преобразователя, плотность жидкости и КПД компонентов.

Этап 2. Выбор расчетного режима: задается относительная скорость $\alpha = n/n_{ном}$ либо частота питания. Если скорость получена из частоты, учитывается скольжение асинхронного двигателя.

Этап 3. Расчет рабочей точки: для выбранной скорости формируется характеристика насоса, затем определяется пересечение с характеристикой системы. На этом этапе получают фактические Q и H.

Этап 4. Расчет мощности: определяется гидравлическая мощность Pг = ρgQH, затем мощность на валу и электрическая мощность с учетом КПД насоса, двигателя и преобразователя.

Этап 5. Интегрирование за период: для каждого временного шага вычисляется электрическая энергия и объем перекачанной жидкости. Для режима с постоянными параметрами используются E = Pэлt и V = Qt.

Этап 6. Расчет показателей e_v, e_h и ηсист. Полученные значения сопоставляются с базовым режимом, например работой на номинальной скорости с дросселированием.

Этап 7. Проверка ограничений: контролируются минимально допустимый расход, необходимый напор, допустимая скорость двигателя, устойчивость работы насоса и отсутствие недопустимых режимов.

Такой алгоритм может быть реализован в MATLAB/Simulink, Python или электронной таблице. Для Simulink модель целесообразно разделить на блоки: «Преобразователь частоты», «Асинхронный двигатель», «Насосная характеристика», «Характеристика сети», «Расчет мощности и энергии» и «Оценка удельного энергопотребления». При наличии экспериментальных данных параметры блоков уточняются по результатам измерений.

6. Иллюстративный расчет при изменении скорости

Для демонстрации методики рассмотрим условный пример, не являющийся результатом натурного эксперимента. Пусть базовый режим характеризуется подачей $Q_1 = 40$ м³/ч, напором $H_1 = 30$ м и частотой вращения $n_1 = 1500$ об/мин. Рассмотрим относительные скорости α = 1,00; 0,90 и 0,80.

Для первичной оценки применим законы подобия, считая рабочие точки сходными и временно не учитывая влияние статического напора.

При $\alpha = 0{,}90$ расчетная подача составляет $Q_2 \approx 40 \cdot 0{,}90 = 36$ м³/ч, напор $H_2 \approx 30 \cdot 0{,}90^2 = 24{,}3$ м, а мощность на валу в относительных единицах $P_2/P_1 \approx 0{,}90^3 = 0{,}729$. Следовательно, идеализированная мощность на валу снижается приблизительно на 27,1%.

При $\alpha = 0{,}80$ получаем $Q_3 \approx 32$ м³/ч, $H_3 \approx 19{,}2$ м, а $P_3/P_1 \approx 0{,}80^3 = 0{,}512$, что соответствует снижению мощности на валу приблизительно на 48,8%. Эти результаты показывают потенциальную чувствительность мощности к скорости, но не являются прямым прогнозом экономии электроэнергии для любой сети.

Удельное энергопотребление зависит от того, как меняются электрическая мощность и подача. В идеализированном случае $P \propto n^3$ и $Q \propto n$, поэтому $P/Q \propto n^2$. Однако в реальной системе необходимо рассчитывать Рэл по КПД преобразователя, двигателя и насоса, а подачу — по пересечению насосной и системной характеристик. Если статическая составляющая напора велика, идеальная кубическая зависимость может существенно отличаться от фактической [2, 5].

Таблица 1. Иллюстративные относительные значения по законам подобия

Режим $\alpha = n/n_1$	Q/Q_1	H/H_1	Рвал/Рвал,1	Оценка снижения мощности
1,00	1,000	1,000	1,000	0%
0,90	0,900	0,810	0,729	27,1%
0,80	0,800	0,640	0,512	48,8%

7. Сравнение частотного регулирования и дросселирования

При дросселировании подача уменьшается за счет дополнительного сопротивления, создаваемого регулирующей арматурой. Насос при этом может продолжать развивать высокий напор, часть которого теряется на клапане. При частотном регулировании изменяется характеристика самого насоса, и при правильно подобранном диапазоне скорости требуемая подача может обеспечиваться при меньшей потребляемой мощности.

Для объективного сравнения оба способа следует оценивать при одинаковом полезном результате: сопоставимых объемах перекачанной жидкости, требуемом давлении или напоре и одинаковых временных интервалах. Сравнение только мгновенной мощности может быть некорректным, если один режим подает меньше воды. Более надежный критерий — удельное энергопотребление e_v при выполнении технологических требований, дополненное показателем e_h и оценкой КПД системы.

При моделировании дросселирования изменяют характеристику сети, а при частотном регулировании — характеристику насоса. Затем для обоих вариантов определяют рабочую точку и рассчитывают Рэл, E, V и e_v. Если режимы дают разный полезный объем, сравнение выполняют за период, необходимый для перекачивания одинакового объема, либо отдельно указывают производительность и удельный расход.

Обсуждение

Результаты анализа подтверждают, что удельное энергопотребление является более информативным показателем, чем абсолютная мощность, когда насос работает с изменяющейся подачей. Законы подобия позволяют получить первичную оценку потенциального эффекта регулирования скорости, но точный расчет должен учитывать реальную характеристику сети и изменение КПД компонентов. В исследованиях по оценке экономии при использовании преобразователей частоты также подчеркивается необходимость учитывать

изменение КПД насоса при переходе от расчетной точки к новым режимам [4, 5].

Практическая реализация методики требует исходных характеристик конкретного насоса и измерений электрической мощности, расхода, напора и скорости. Если доступна только паспортная мощность двигателя, результаты следует обозначать как оценочные. Для верификации модели полезно провести измерения как минимум в нескольких установившихся режимах и сравнить расчетные значения с фактическими показаниями анализатора мощности и расходомера.

Следует учитывать, что чрезмерное снижение скорости может нарушить требуемую подачу, привести к недостаточному напору или вывести двигатель и насос за допустимый диапазон эксплуатации. При малых скоростях ухудшается охлаждение двигателя с собственным вентилятором, а КПД преобразователя и двигателя может снижаться. Поэтому оптимальный режим определяется не минимальной мощностью как таковой, а минимальным удельным энергопотреблением при соблюдении технологических и эксплуатационных ограничений.

Предложенная модель может служить основой для дальнейшей оптимизации: подбора диапазона частоты, выбора уставки давления, построения графика $e_v(f)$ и определения режима минимального удельного энергопотребления. Для научно-практической проверки необходимы натурные данные конкретного насосного агрегата; приведенный расчет предназначен только для демонстрации процедуры.

Заключение

Предложена методика моделирования энергоэффективности частотно-регулируемого асинхронного электропривода центробежного насосного агрегата по удельному энергопотреблению. Методика объединяет расчет

рабочей точки насоса, характеристику трубопроводной сети, энергетический баланс преобразователя частоты и двигателя, а также вычисление потребленной энергии и объема перекачанной жидкости.

Показано, что показатели $e_v = E/V$ и $e_h = E/(V \cdot H)$ позволяют сопоставлять режимы с различной подачей и напором. Законы подобия дают полезную первичную оценку влияния скорости на подачу, напор и мощность, однако для точного прогнозирования следует учитывать статический напор и изменение КПД насоса, двигателя и преобразователя.

Разработанный алгоритм может быть реализован в MATLAB/Simulink и применен при анализе режимов насосных станций, выборе частоты вращения и сравнении частотного регулирования с дросселированием. Дальнейшим этапом работы должно стать экспериментальное подтверждение модели на конкретном агрегате с использованием измеренных характеристик и оценкой неопределенности.

Использованные источники

1. U.S. Department of Energy. Improving Pumping System Performance: A Sourcebook for Industry. 2nd ed. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2006. Электронный ресурс. URL: https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/05/f16/pump.pdf (дата обращения: 28.10.2026).

2. Natural Resources Conservation Service (USDA). Variable Speed Drive (VSD) for Irrigation Pumping. Электронный ресурс. URL: https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1712940814/21858.pdf (дата обращения: 28.10.2026).

3. ASHRAE. ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment. Chapter 44: Centrifugal Pumps. Электронный ресурс. URL: https://handbook.ashrae.org/Handbooks/S24/SI/S24_Ch44/S24_Ch44_si.aspx (дата обращения: 28.10.2026).

4. Guo W., Perera J., Cox D.F., Nimbalkar S.K., Wenning J.T., Thirumaran K., Levine E. Variable-Speed Pump Efficiency Calculation for Fluid Flow Systems with and without Static Head. International Journal of Energy Management. 2020. Vol. 2, No. 3. P. 38–50. Электронный ресурс.

URL: https://www.ornl.gov/publication/variable-speed-pump-efficiency-calculation-fluid-flow-systems-and-without-static-head (дата обращения: 28.10.2026).
5. Estimation of Centrifugal Pump Efficiency at Variable Frequency for Irrigation Systems. Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 10. Article 4134. DOI: 10.3390/su16104134. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/16/10/4134 (дата обращения: 28.10.2026).
6. KSB. Affinity Laws. Centrifugal Pump Lexicon. Электронный ресурс. URL: https://www.ksb.com/en-global/centrifugal-pump-lexicon/article/affinity-laws-1115682 (дата обращения: 28.10.2026).