

УДК 621.313.333

ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННОГО РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

П.В. Тютеева, О.О. Муравлева

Томский политехнический университет

Tomsk Polytechnic University

Предложена методика расчета экономической эффективности работы регулируемого привода, с учетом характеристик насоса, трубопровода и асинхронного двигателя. Произведено сравнение экономической эффективности при реализации различных законов управления.

Ключевые слова: регулируемый электропривод, насосный агрегат, асинхронный двигатель, эффективность.

The design procedure of profitability of a controlled-velocity electric drive in terms of the pump, the pipeline and the induction motor characteristics has been proposed. Comparison of profitability when implementing various control laws has been made.

Key words: controlled-velocity electric drive, pumping unit, induction motor, profitability.

ВО ВСЕМ мире для решения задач по энергосбережению на государственном уровне разрабатываются специальные программы (США – комплексные программы *Energy Saving* и *Energy Conservation*; Германия – экологический налог; Франция – программа сокращения энергоемкости экономики на 40 %). Российские власти также приняли основные положения и задания Энергетической стратегии России, заложенные в Федеральную целевую программу «Энергоэффективная экономика». Мировой опыт свидетельствует, что затраты на внедрение энергосберегающих мероприятий в 3...5 раз меньше затрат на добычу и производство первичных энергоисточников, эквивалентных по объему сбереженным.

Одной из отраслей народного хозяйства, в которой энергосберегающие мероприятия до последнего времени практически не внедрялись, является коммунальное хозяйство и, в частности, системы водоснабжения. В системах водоснабжения критерий надежности всегда ставился выше экономических выгод, поэтому водопроводные насосные станции не могли быть оснащены сложным и мало надежным энергосберегающим оборудованием. Одной из основных причин неэкономичной работы насосного агрегата является несоответствие рабочих параметров насоса (напор H , подача Q) режиму работы

системы. Насосные агрегаты применяются во многих отраслях народного хозяйства, поэтому применение асинхронного регулируемого электропривода (РЭП) для них является актуальной проблемой, решение которой связано с энергосбережением. Однако при реализации энергосберегающих мероприятий в насосных агрегатах асинхронному двигателю (АД) практически не уделяется внимания. В ранее проводимых исследованиях рассматривалась возможность энергосбережения при внедрении энергоэффективных АД [1], в данной же работе внимание будет посвящено реализации энергосберегающих технологий при учете характеристик АД.

Целью данной работы является оценка экономической эффективности внедрения регулируемого электропривода насосных агрегатов с учетом характеристик асинхронного двигателя при различных законах управления.

Для расчетов использовалась математическая модель оценки экономической эффективности при эксплуатации АД в составе регулируемого электропривода насосного агрегата. Она охватывает следующие этапы расчета АД: электромагнитный [2] и экономический расчет [3], позволяющий оценить оптимальность работы асинхронной машины в составе регулируемого электропривода. Исходными параметрами модели являются характеристики трубопровода, на-

соса, закон управления, а также поперечная и продольная геометрия асинхронных машин. Характеристика трубопровода с постоянными параметрами будет определяться уравнением

$$H = H_{\text{ст}} + RQ^2,$$

где R – коэффициент сопротивления сети; $H_{\text{ст}}$ – статический напор, идущий на подъём жидкости на определенную высоту.

Характеристика насоса для номинальной частоты вращения АД может быть получена из справочных данных [4], пересчет для различных частот вращения n производится по формулам подобия, тогда характеристики насоса при изменении частоты вращения могут быть представлены в виде

$$H = H_0 \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 + Q^2 \frac{H_0 - H_n}{Q_n^2},$$

где n_n – номинальная частота вращения механизма; H_0 – статический напор, создаваемый при номинальной частоте вращения и производительности равной нулю; H_n – номинальный напор насоса, Q_n – номинальный расход насоса.

В качестве выходных параметров математической модели оценки экономической эффективности приняты энергетические характеристики: КПД $\eta_{\text{дв}}$ и коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{дв}}$ асинхронного двигателя, а также экономические характеристики, такие как суммарная потребляемая электроэнергия за год ΣW насосного агрегата системы водоснабжения [5]:

$$\Sigma W = \Sigma P_n t,$$

где ΣP_n – мощность, потребляемая насосным агрегатом, кВт; t – время, ч.

Мощность, потребляемая насосным агрегатом, определяется из выражения

$$P_n = \frac{\rho g H Q}{1000 \eta_n \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{пч}}},$$

где ρ – плотность перекачиваемой жидкости, в случае воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; g – ускорение свободного падения; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД асинхронного двигателя; η_n – КПД насосного агрегата; $\eta_{\text{пч}}$ – КПД преобразователя частоты.

Затраты на активные потери электроэнергии ΣC_a могут быть определены по выражению:

$$\Sigma C_a = \Sigma C_a P_{2\text{дв}} \left(\frac{1 - \eta_{\text{дв}}}{\eta_{\text{дв}}} \right) t,$$

где C_a – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии; t – число часов работы двигателя в год; $P_{2\text{дв}}$ – полезная мощность на валу двигателя.

Закон управления может быть записан как $U/f^{1+k/2} = \text{const}$ [5], где U – напряжение питающей сети; f – частота напряжения сети; k – коэффициент, зависящий от вида механической характеристики насоса, $k = 2 \dots 4$, большие значения соответствуют характеристикам насоса с большей статической составляющей напора. Задача моделирования заключается в том, чтобы, руководствуясь заданными геометрическими размерами машины, характеристиками насоса и трубопровода определить экономическую эффективность при различных законах регулирования.

Для оценки энергосбережения проведем расчет экономии электроэнергии для РЭП насосной станции, в состав которого входит насос К45/30 [4], асинхронный двигатель АИР112М2 и преобразователь частоты. Расчет проводится по суточному графику водопотребления, представленному на рис. 1.

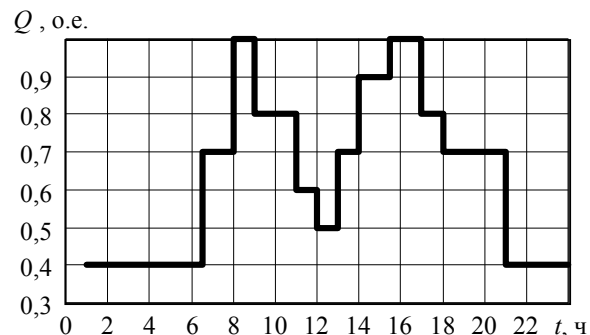


Рис. 1. Суточный график водопотребления

Для согласованной работы АД и насосного агрегата требуется знать механические характеристики как двигателя при различных способах регулирования частоты вращения, так и нагрузки, которая определяется через рабочие параметры насоса:

$$M_C = 9,565 \frac{\rho g Q H}{\eta_n n}.$$

Рабочий участок характеристики нагрузки, рассчитанный по приведенной формуле, используется для дальнейших расчетов. В РЭП для регулирования или стабилизации скорости вращения используют различные соотношения между частотой и напряжением, выбор конкретного соотношения зависит от характера момента нагрузки. Для насосных агрегатов возможно применение различных законов управления. Оценка энергетических характеристик при различных законах сравнения рассмотрена при эксплуатации РЭП на базе общепромышленного АД при различных частотах и напряжениях питания без изменения геометрии поперечного сечения. По результатам математического моделирования

были получены энергетические и экономические характеристики АД при реализации различных законов управления.

На рис. 2 представлены энергетические характеристики АД $\eta_{\text{дв}} = f(P_{2\text{дв}})$ и $\cos \varphi_{\text{дв}} = f(P_{2\text{дв}})$ при различных законах управления. Анализ показывает, что большим значениям коэффициента k соответствуют меньшие значения КПД, так как увеличивается потребляемый ток АД, что приводит к росту потерь, при этом коэффициент мощности оказывается большим при увеличении k , что связано с изменением соотношения между потребляемым активным и реактивным током.

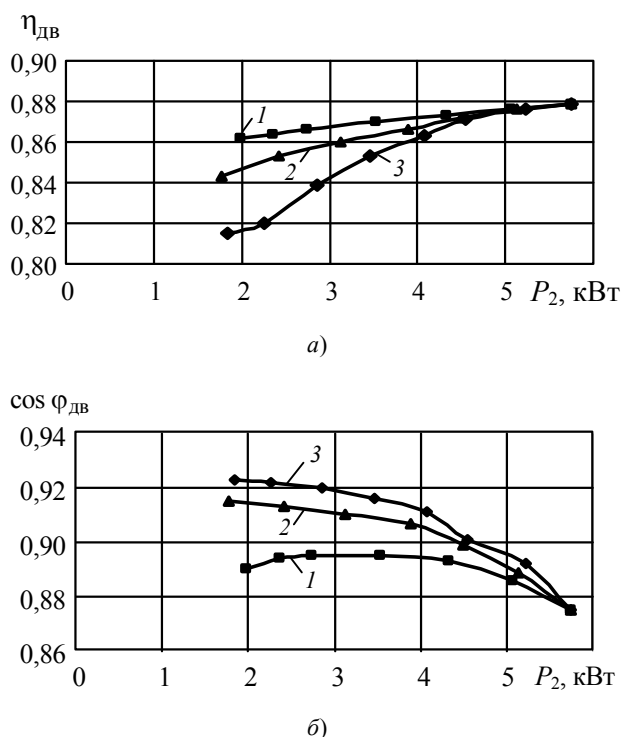


Рис. 2. Энергетические характеристики при различных законах управления: а – КПД $\eta_{\text{дв}} = f(P_{2\text{дв}})$; б – коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{дв}} = f(P_{2\text{дв}})$: 1 – $U/f^2 = \text{const}$; 2 – $U/f^{2.5} = \text{const}$; 3 – $U/f^3 = \text{const}$

Полученные энергетические характеристики АД при регулировании частоты вращения используются для расчета электрической энергии, потребляемой насосным агрегатом, рассчитываемой при использовании регулируемого электропривода по участкам согласно рис. 1:

$$\Sigma W = \Sigma P_{\text{нв}} t.$$

На рис. 3, а представлена мощность, потребляемая насосным агрегатом, при реализации различных законов управления. Как видно из рисунка, наиболее экономичным является реализация закона $U/f^{2.5} = \text{const}$, за счет большего снижения электрических потерь АД. На рис. 3, б

представлено потребляемое количество энергии за год при использовании нерегулируемого электропривода, а также при реализации различных законов управления.

Для расчетов использовались тарифы для жилищных организаций, потребляющих электроэнергию на технические нужды жилых домов, данный тариф установлен РЭК Томской области и составляет 1,27 руб. с учетом НДС за 1 кВт·ч. Для нерегулируемого электропривода годовая потребляемая электроэнергия будет составлять 56940 кВт·ч, а стоимость электроэнергии в год 72313,8 руб. (рис. 3, б). При использовании законов управления получаем следующие значения: $U/f^2 = \text{const}$ – 30980 кВт·ч (39344,6 руб.); $U/f^{2.5} = \text{const}$ – 30476 кВт·ч (38704,5 руб.); $U/f^3 = \text{const}$ – 31041 кВт·ч (39422,1 руб.). Экономия потребляемой электроэнергии, получаемой при замене нерегулируемого на регулируемый электропривод, при заданных мощностях насосного агрегата и характеристиках трубопровода, за год составляет: $U/f^2 = \text{const}$ – 32969,2 руб. (45,6 %); $U/f^{2.5} = \text{const}$ – 33609,3 руб. (46,5 %); $U/f^3 = \text{const}$ – 32891,7 руб. (45,5 %). При этом сроки окупаемости во всех случаях составляют порядка 9 мес. (стоимость преобразователя частоты Danfoss – 40000 руб.).

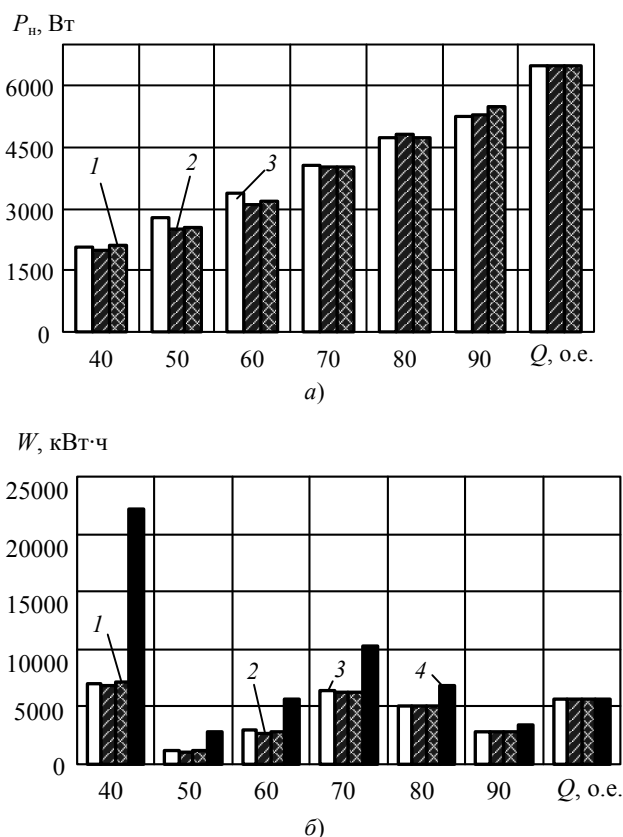


Рис. 3. Экономические характеристики при различных законах управления: а – мощность, потребляемая насосным агрегатом; б – количество энергии потребляемой за год: 1 – $U/f^2 = \text{const}$; 2 – $U/f^{2.5} = \text{const}$; 3 – $U/f^3 = \text{const}$; 4 – нерегулируемый электропривод

Таким образом, разработана математическая модель оценки экономической эффективности при эксплуатации АД в составе регулируемого электропривода насосного агрегата при различных законах управления, учитывающая характеристики насоса, трубопровода, цикл нагрузки и энергетические характеристики АД.

Произведена оценка экономической эффективности при эксплуатации асинхронного регулируемого электропривода, что позволило оценить экономический эффект энергосбережения при использовании РЭП в насосных установках. Наибольший эффект энергосбережения при эксплуатации насосного агрегата получается при реализации закона $U/f^{2,5} = \text{const}$, обеспечивающий уменьшение потребляемой энергии на 46,5 %, что доказывает важность определения используемого закона управления для конкретного случая нагрузочной характеристики насос-

ного агрегата. Срок окупаемости при реализации рассмотренных законов – менее года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Муравлева О.О., Тютеева П.В. Совершенствование асинхронных двигателей для регулируемого электропривода // Изв. Томского политехнического у-та. 2007. Т. 310. № 2. С. 177–181.
2. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под ред. И.П. Копылова. М.: Высшая школа, 2002. 757 с.
3. Асинхронные двигатели общего назначения / под ред. В.М. Петрова и А.Э. Кравчика. М.: Энергия, 1980. 488 с.
4. Каталог насосов 2000-2003. ОАО "Ясногорский машзавод". Ясногорск, 2002. 71 с.
5. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.

Поступила в редакцию

23 января 2008 г.

Тютеева Полина Васильевна – аспирант кафедры «Электрические машины и аппараты» Томского политехнического университета. Тел. 563-453. E-mail: TyutevaPV@elti.tpu.ru

Муравлева Ольга Олеговна – канд. техн. наук, докторант кафедры «Электрические машины и аппараты», Томского политехнического университета. Тел. 563-453 E-mail: MuravlevaOO@tpu.ru
