

ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

В.Р. Иванова*, И.Н. Киселев

Казанский Государственный Энергетический университет,
г. Казань, Россия

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7667-5456>
vr-10@mail.ru, igorkiselev17@gmail.com

Резюме: Актуальность исследования заключается в поиске энергосберегающих технологий. Так, в настоящее время, наиболее распространенным типом электропривода в промышленности является асинхронный, причем большинство из таких – нерегулируемые. Замена нерегулируемого электропривода на регулируемый в различных агрегатах позволяет существенно снизить потребление электроэнергии, увеличить срок службы механической части привода и повысить качество регулируемого технологического параметра. Замена заключается в установке между сетью и двигателем устройства – электронный преобразователь частоты. Данное устройство изменяет частоту вращения ротора двигателя за счет изменения частоты и амплитуды питающего напряжения. Наибольшее распространение получили преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Такие устройства построены на электронных ключах, которые выполнены на IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) транзисторах. С помощью программного обеспечения NI Multisim14 создана модель для определения экономии мощности при внедрении ЧРП.

В работе приводится обоснование внедрения частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) для оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах и системах, в частности для примера представлен полный анализ энергоэффективности применения ЧРП в насосных системах водоснабжения. Также приведен расчет его экономической эффективности для конкретной установки.

Ключевые слова: преобразователь частоты, электропривод, энергосбережение, насосные установки, энергосбережение, частота, асинхронный двигатель.

Для цитирования: Иванова В.Р., Киселев И.Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №5. С. 59-70. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.

FREQUENCY-ADJUSTABLE ELECTRIC DRIVE FOR ENERGY SAVING AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN ELECTRICAL COMPLEXES

VR Ivanova*, IN Kiselev

Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7667-5456>
vr-10@mail.ru, igorkiselev17@gmail.com

Abstract: The relevance of the study lies in the search for energy-saving technologies. So, at present, the most common type of electric drive in industry is asynchronous, most of which are unregulated. Replacing an unregulated electric drive with an adjustable one in various units can significantly reduce energy consumption, increase the life of the mechanical part of the drive and improve the quality of the adjustable process parameter. The replacement consists in installing an electronic frequency converter between the network and the motor of the device. This device changes the rotational speed of the motor rotor by changing the frequency and amplitude of the

supply voltage. The most common are frequency converters with an intermediate DC link. Such devices are built on electronic keys, which are made on IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) transistors. Using the NI Multisim14 software, a model was created to determine power savings during the implementation of VFD.

The paper gives the rationale for the introduction of a frequency-controlled electric drive (VFD) to optimize technological processes in electrical complexes and systems, in particular, a complete analysis of the energy efficiency of VFD application in pumped water supply systems is presented as an example. The calculation of its economic efficiency for a particular installation is also given.

Keywords: frequency converter, electric drive, energy saving, pumping units, energy saving, frequency, asynchronous motor.

For citation: Ivanova VR, Kiselev IN. Frequency-adjustable electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):59-70. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70.

Введение

Потребление электрической и тепловой энергии с каждым годом возрастает. При этом первичным источником энергии в подавляющем большинстве случаев являются не возобновляемые энергоресурсы (природный газ, нефть, каменный уголь и т. д.), запасы которых ограничены. Кроме этого, традиционная энергетика порождает экологические проблемы, такие как выбросы вредных веществ в атмосферу, радиоактивное загрязнение и т.д. Активно ведутся исследования в области возобновляемых источников энергии, однако доля выработки энергии, получаемой таким путем имеет малый процент. По вышеприведенным причинам проблема энергосбережения в настоящее время весьма актуальна. Для решения этой проблемы в развитых странах в сфере энергосбережения стали создаваться специальные программы и организации, издаваться законы, направленные на рациональное использование энергии. Анализ структуры потерь электроэнергии показывает, что 90% приходится на электропотребление и, учитывая то, что основным потребителем электроэнергии является электропривод (около 70%), очевидно, что в нем заключен большой потенциал энергосбережения. Наиболее распространенным типом электропривода в промышленности является асинхронный, причем подавляющее большинство таких электроприводов нерегулируемые (около 95%). Последние используются в массовых агрегатах, таких как насосы, компрессоры, вентиляторы, конвейеры и т.д. Замена нерегулируемого электропривода на регулируемый в данных агрегатах позволяет существенно экономить электроэнергию, увеличить срок службы механической части привода и повысить качество регулируемого технологического параметра [1-7]. Например, подача жидкостей с помощью насосов должна изменяться в зависимости от потребностей потребителей. Если частота вращения колеса центробежного насоса постоянна, то регулировать подачу насоса можно изменением поперечного сечения трубопровода, например, с помощью запорно-регулирующей арматуры. Насос в данном случае работает «в пустую» и создает избыточный напор, который может привести к гидравлическим ударам при пуске системы, к разрывам труб и т.д. Если же в данной системе использовать регулируемый привод, то можно плавно регулировать подачу насоса, при этом электроэнергия используется рационально и избыточный напор отсутствует.

Материалы и методы

Целью данной работы является обоснование преимуществ внедрения частотно-регулируемого привода (ЧРП) для оптимизации технологического процесса в насосных системах, а также расчет его экономической эффективности для конкретной установки с помощью программного обеспечения NI Multisim14.

В современном асинхронном регулируемом электроприводе между сетью и двигателем имеется устройство – электронный преобразователь частоты (ПЧ). Это устройство изменяет частоту вращения ротора двигателя за счет изменения частоты и амплитуды питающего напряжения. Преобразователи частоты в зависимости от структуры силовой части делятся на два типа: преобразователи частоты без промежуточного звена постоянного тока и преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока [10-14]. Последние получили наибольшее распространение. ПЧ такого типа могут быть трех видов: ПЧ с автономным инвертором тока (АИТ), ПЧ с автономным инвертором напряжения (АИН). Назначение элементов схемы приведем на примере ПЧ с АИН. В таком преобразователе используется трехфазный мостовой

неуправляемый выпрямитель на диодах VD1-VD6. Емкостной фильтр предназначен для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения. Выпрямитель и фильтр образуют звено постоянного тока. Автономный инвертор напряжения, электронные ключи которого выполнены на IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) транзисторах VD1-VD12, посредством широтно-импульсной модуляции преобразует постоянное напряжение в переменное с регулируемой частотой и амплитудой (рис.1).

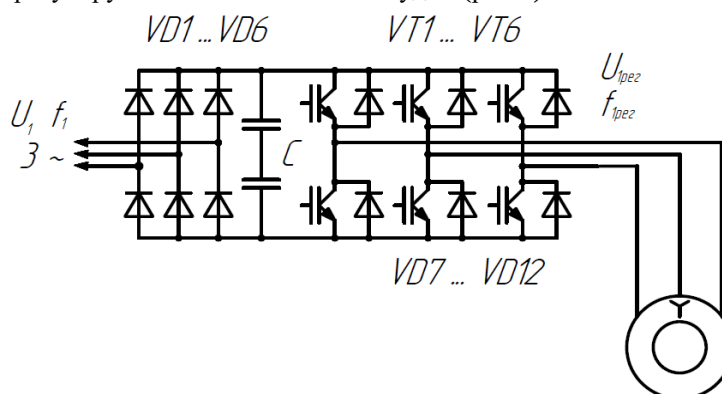


Рис. 1. Схема силовых цепей системы
«Преобразователь частоты – Асинхронный двигатель»

Применение IGBT-транзистора связано с рядом достоинств таких как большое допустимое рабочее напряжение и ток; малая мощность, затрачиваемая на управление, т.е. управление производится напряжением, а не током базы, как у биполярного транзистора. Это значительно упрощает схемы управления транзисторами. Недостатком IGBT-транзисторов является то, что они дороже полевых MOSFET-транзисторов, которые также применяются в ПЧ. MOSFET-транзисторы хорошо подходят для работы на частотах выше 20 кГц при напряжениях питания до 500 В, т.к. при низких напряжениях полевые транзисторы обладают меньшим сопротивлением, в то время как IGBT хорошо работают на частотах до 20 кГц при напряжениях питания 1000 и более вольт.

Различают два вида управления двигателями с помощью ПЧ – это скалярное управление и векторное. В скалярном управлении питающее напряжение и частота изменяются по закону $\frac{U_1}{f_1^n} = \text{const}$. Скалярное управление применяется там, где не

нужна высокая точность регулирования, поэтому такой тип управления применяется для общепромышленных установок: насосов, вентиляторов, компрессоров. Реализация векторного управления имеет большую стоимость и с его помощью можно получить высокое качество и большой диапазон регулирования электропривода. ПЧ со скалярным управлением управляет одним электродвигателем или несколькими электроприводами, работающими во взаимосвязанном режиме. В этом случае установка преобразователя в комплексе с автоматизированной системой управления объектом позволяет расширить его функциональные возможности, повысить надежность системы и облегчить управление.

Использование ПЧ позволяет получить некоторые энергосберегающие эффекты. Радикальным отличием от нерегулируемого привода является то, что к рабочему органу технологической установки, согласно формуле мощности на валу $P = M \cdot \omega$, в любой момент времени подводится столько мощности, сколько требуется для надлежащего выполнения технологического процесса. При этом потери энергии минимальны не только в электроприводе, но и в технологической установке (например, отсутствие излишнего напора в насосных системах). ПЧ обеспечивают плавное и экономичное регулирование скорости в больших диапазонах (при одинаковой нагрузке и любой частоте вращения потери в электродвигателе постоянны), высокий и стабильный коэффициент мощности, что уменьшает потребление полной мощности из сети, особенно если двигатель подобран неправильно, т. е. работает с малым коэффициентом нагрузки, а следовательно с малым КПД и коэффициентом мощности (рис. 2).

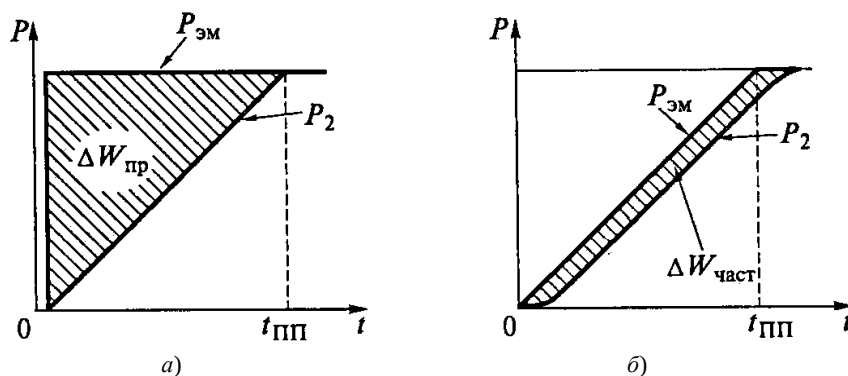


Рис. 2. Потери энергии при прямом (а) и частотном пуске (б)

Достоинством ПЧ при пуске и торможении является то, что он осуществляет плавное торможение и пуск по запрограммированным пользователем параметрам. Необходимость плавного пуска объясняется тем, что пусковой ток превышает номинальный у асинхронных двигателей в 5-8 раз и пусковой момент значительно превышает номинальный. Первое обстоятельство приводит к большому выделению тепла в обмотке статора, по этой причине изоляция обмотки может прийти в негодность, также может возникнуть понижение напряжения сети во время пуска, если двигатель имеет большую мощность, и появление следов нагара на контактах коммутационной аппаратуры. Большой пусковой момент двигателя может привести к гидравлическим ударам, рывкам в механизме, обрыву транспортных лент и т.д. Плавный останов двигателя позволяет избежать «всплеска» напряжения сети, как бывает при отключении мощного двигателя с помощью контактора, что может вывести из строя питаемые от этой сети электроприемники, а также позволяет избежать кавитации и гидроударов в насосных системах с высоким гидростатическим напором, обеспечивая плавное снижение скорости в процессе закрытия обратного клапана. Кроме того, преобразователи частоты имеют специальные возможности в зависимости от области применения. ПЧ в системах водоснабжения могут иметь такие функции, как контроль утечек, защита насоса от сухого хода, компенсация расхода и т.д. Таким образом, при помощи ЧРП достигается не только энергосбережение, но и повышение качества технологического процесса и увеличения срока службы оборудования. Однако у ЧРП имеются недостатки. Сюда можно отнести загрязнение питающей сети гармониками, перенапряжения в обмотке статора, волновые переходные процессы в системе ПЧ-АД. Эти проблемы решаются установкой фильтров и усилением изоляции обмоток, что является дополнительными затратами. Если низковольтная распределительная сеть оснащена установками компенсации реактивной мощности, то существует вероятность возникновения резонансных явлений. На низких скоростях из-за ухудшения условий охлаждения необходимо устанавливать дополнительный вентилятор со своим приводом [11-14].

Определение экономической эффективности является актуальной проблемой, т.к. ПЧ имеет внушительную стоимость и потребителю необходимо иметь гарантии того, что вложенные средства окупятся, причем желательно за короткие сроки [8-10]. Кроме того, препятствием для применения ЧРП являются причины организационного характера, которые часто заключаются в том, что руководители предприятий не желают заменять неэффективно функционирующее с точки зрения энергосбережения оборудование на новое энергосберегающее. Для решения этой проблемы опять же необходимо обосновать возможность получения прибыли от внедрения ЧРП.

ЧРП обеспечивает не только экономию электроэнергии или тепла, но и создает выгоду за счет уменьшения количества аварий, затрат на ремонт, сокращения численности обслуживающего персонала. Это должно быть учтено при определении экономического эффекта.

К сожалению, универсальной методики оценки экономической эффективности не существует в связи с большим разнообразием технологических процессов. Но провести оценку экономической эффективности можно для отдельных установок, причем часто это производится на основе экспериментальных данных или с помощью специализированных пакетов программ. Рекомендации, разработанные в Московском энергетическом институте (МЭИ) совместно с Научно-исследовательским институтом электроэнергетики (АО ВНИИЭ), могут помочь сотрудникам предприятий, на которых

планируются или уже проводятся мероприятия по энергосбережению и оптимизации технологических процессов. Ими разработана методика оценки экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в системах водоснабжения зданий, а также разработана «Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода», согласованная с Главгосэнергонадзором и утверждена Минтопэнерго. Примером прикладных программ по оценке экономической эффективности от внедрения ЧРП является программное обеспечение *Eco8*, разработанное французской компанией *Schneider Electric*. Оно позволяет рассчитать экономию электроэнергии при регулировании подачи изменением частоты вращения в насосных системах в сравнении с использованием нерегулируемого электропривода.

Энергосбережение в насосных системах является актуальной проблемой по двум причинам. Во-первых, согласно исследованиям 72% электроэнергии потребляется электродвигателями, причем 63% от этой величины используется в электроприводах насосов, вентиляторов и компрессоров. Во-вторых, за счет того, что центробежные насосы и вентиляторы, имеют квадратичную механическую характеристику: увеличение скорости вращения пропорционально квадрату момента нагрузки на валу двигателя. Поэтому мощность на валу двигателя имеет кубическую зависимость от скорости вращения. Следовательно, даже небольшое снижение скорости двигателя может дать значительный выигрыш в мощности, поэтому экономия электроэнергии является главным преимуществом использования ЧРП для центробежных насосов и вентиляторов [15-19].

Результаты

На насосных станциях системы водоснабжения величина подачи определяется потребностями потребителя. Регулировать подачу насоса можно путем изменения частоты вращения колеса или без изменения частоты вращения, например, при помощи клапанов, установленных за насосом (дресселирование), путем использования байпасной линии, параллельным включением насосов и т.д. В случае дросселирования, когда все клапаны распределительной сети открыты, характеристика сети представляет собой кривую 2 (рис. 3) и точка А является рабочей точкой сети и насоса. При дросселировании гидравлическое сопротивление трубопровода возрастает, характеристика сети 3 более круто возрастает и точка В является рабочей точкой сети и насоса.

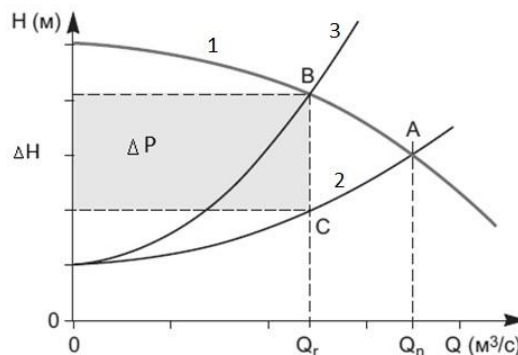


Рис. 3. Регулирование дросселированием: 1 – естественная характеристика насоса; 2 – естественная характеристика сети; 3 – характеристика сети с дроссельным регулированием

Чтобы обеспечить величину подачи Q_r достаточно напора, соответствующего точке С. Поэтому затененная площадь – это потери энергии на клапанах ΔP . Они возникают за счет избытка напора ΔH . Избыточный напор может привести к гидравлическим ударам при пуске системы, к разрывам труб.

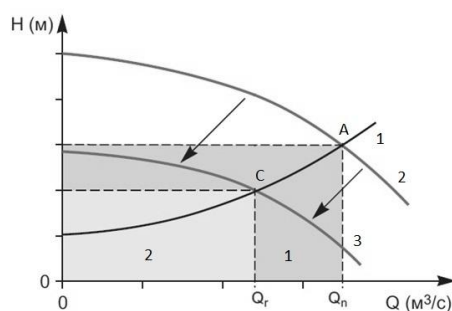


Рис. 4. Регулирование подачи насоса при переменной частоте вращения: 1 – естественная характеристика сети; 2 – естественная характеристика насоса; 3 – характеристика насоса при пониженной частоте вращения

Избежать потерь можно, изменяя вид характеристики насоса за счет изменения частоты вращения колеса центробежного насоса, т.е. за счет применения частотно-регулируемого привода. В данном случае точка C (рис. 4) достигается путем смещения характеристики насоса к началу координат, при этом потребление электроэнергии, пропорциональное произведению Q и H снижается (площадь прямоугольника 2 меньше площади 1) и отсутствуют потери на клапанах.

Для анализа энергоэффективности от применения преобразователя частоты был выбран центробежный насос K150-125-250 с приводным электродвигателем АИР160S4. Технические характеристики насоса K150-125-250 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики насоса K150-125-250

Марка агрегата	Подача, м³/ч	Напор, м	Рабочая зона, м³/ч	Марка АД	Мощность АД, кВт	Частота, об/мин
1	2	3	4	5	6	7
К 50-125-250	200	20	120...240	АИР160S4	15	1500

Для упрощения анализа работы центробежного насоса рассматриваются характеристики системы трубопроводов без противодавления (статического напора). В этом случае можно использовать формулы подобия. Кроме того считаем, что характеристика насоса имеет вид $H_* = 1$.

В качестве графика расхода в течение суток рассматриваем график $Q(t)$ (Рис.5), который в каждом отдельном случае различается в зависимости от вида потребителя или технологического процесса.

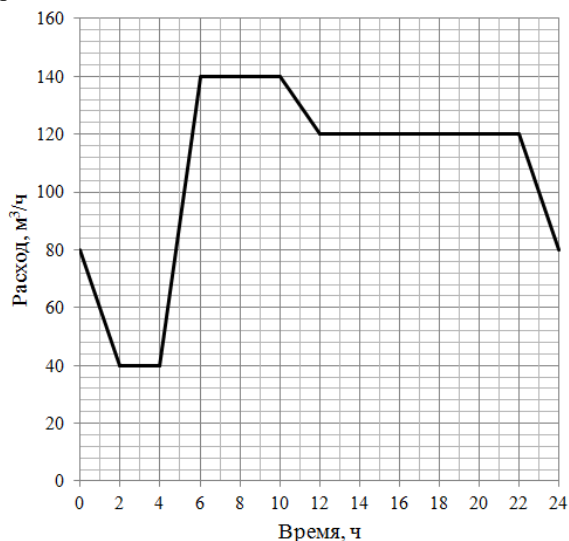


Рис. 5. Зависимость расхода в течение суток

Номинальная мощность, потребляемая насосом:

$$N_{\text{ном}} = \frac{H_{\text{ном}} \cdot Q_{\text{ном}}}{367 \cdot \eta_{\text{ном}}} = \frac{20 \cdot 200}{367 \cdot 0,8} = 13,62 \text{ кВт.} \quad (1)$$

Потребляемая центробежным насосом мощность при номинальной частоте вращения, т.е. при регулировании дросселированием, кВт:

$$N_{\text{др}}(Q) = N_{\text{ном}}(0,4 + 0,6 \cdot \frac{Q}{Q_{\text{ном}}}) = 13,62(0,4 + 0,6 \cdot \frac{Q}{200}) = 5,45 + 0,041 \cdot Q. \quad (2)$$

Потребляемая центробежным насосом мощность при частотном регулировании, кВт:

$$N_{\text{чр}}(Q) = N_{\text{ном}}(\frac{Q}{Q_{\text{ном}}})^3 = 13620(\frac{Q}{200})^3 = 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot Q^3. \quad (3)$$

Минимальная потребляемая насосом мощность при дросселировании по формуле (1) равна 5,45 кВт, номинальная – 13,62 кВт, т. е. коэффициент использования при наименьшей нагрузке $k_3 = 0,4$. При таком значении k_3 и более КПД двигателя приблизительно равен номинальному [3, с. 78]. Современные ПЧ обеспечивают экономичное регулирование скорости, высокий и стабильный коэффициент мощности [1, с. 101]. Таким образом, в данных условиях при частотном регулировании и при регулировании дросселированием потери в электродвигателе приблизительно равны, т.е. $\Delta P_{\text{др}} \approx \Delta P_{\text{чр}} \approx \Delta P_{\text{ном}}$.

Экономия мощности при внедрении ЧРП:

$$\Delta N(Q) = N_{\text{др}}(Q) + \Delta P_{\text{др}} - (N_{\text{чр}}(Q) + \Delta P_{\text{чр}}) = 5,45 + 0,041 \cdot Q - 1,7 \cdot 10^{-6} Q^3. \quad (4)$$

Используя зависимости $Q(t)$ и (4), при помощи *Excel* строим график экономии мощности в течение дня $\Delta N(Q(t))$ (Рис. 6).

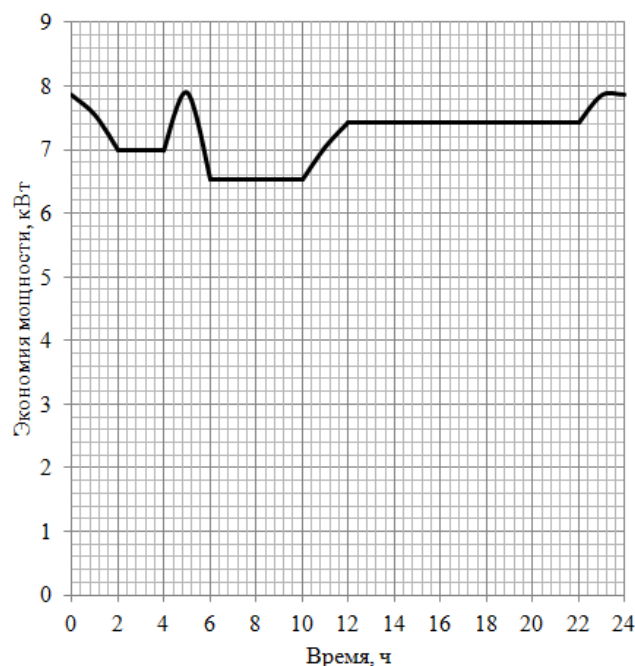


Рис. 6. Зависимость экономии мощности в течение суток при использовании ЧРП вместо дросселирования

Оказывается, что при данном графике расхода экономия мощности равна 7,25 кВт и максимальное отклонение от этого значения не превышает 10 % от этого значения. Измерим эту же экономию мощности в созданной модели (Рис.7) в среде *NI Multisim14*. В собранной схеме имеется электродвигатель *M1*, по характеристикам имитирующий электродвигатель АИР160S4, центробежный насос *U1*, колесо которого приводится во вращение от электродвигателя *M1*; трехфазный источник ЭДС *V1*, имитирующий электрическую сеть 380/220 В частотой 50 Гц, служащую источником питания электродвигателя *M1*.

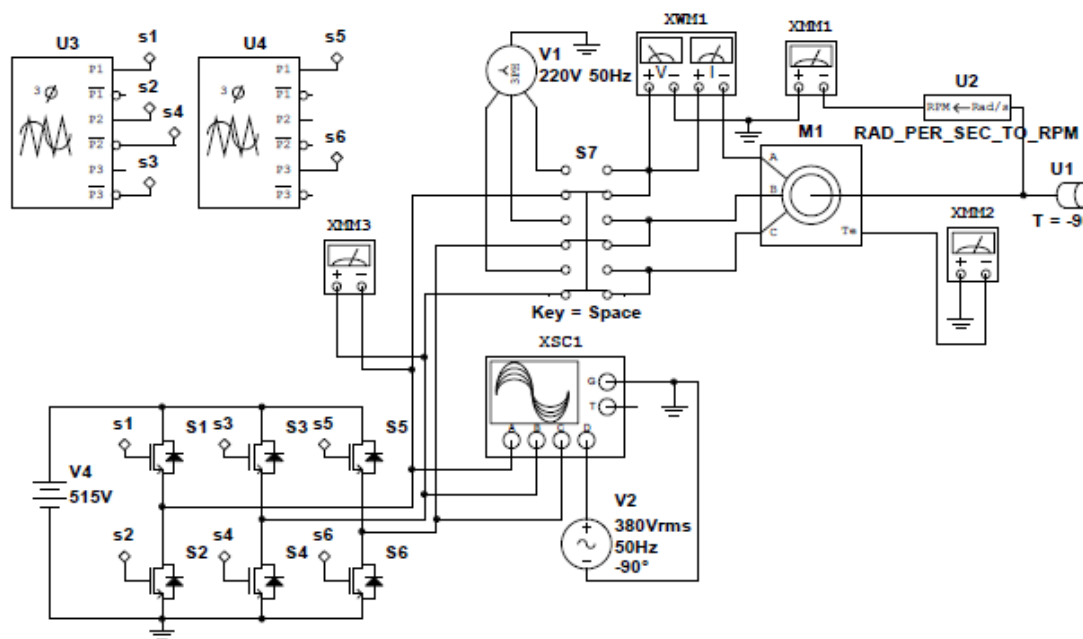


Рис. 7. Модель для определения экономии мощности при внедрении ЧРП

Для симуляции ПЧ имеется автономный инвертор напряжения (АИН) на *IGBT*-транзисторах S1-S6. Выходное напряжение трехфазной мостовой схемы имитируется источником постоянной ЭДС V4. Коммутация ключей S1-S6 управляется широтно-импульсными модуляторами U3, U4, выходные импульсы которых частотой 2 кГц и амплитудой 10 В подаются на затворы транзисторов S1-S6. Один ШИМ-модулятор состоит из 6 компараторов: на инвертирующий вход операционного усилителя (ОУ) подается пилообразное опорное напряжение частотой 2 кГц, на не инвертирующий вход подается управляющее синусоидальное напряжение. Частота этого напряжения задает частоту трехфазного выходного напряжения АИН.

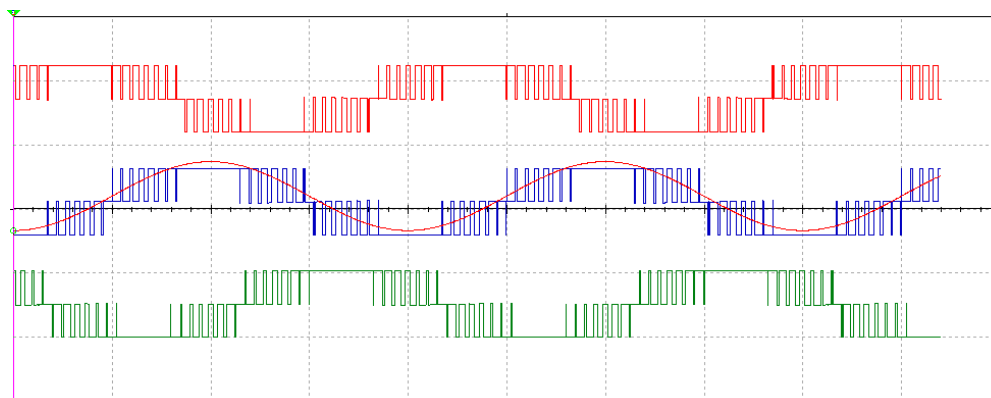


Рис. 8. Осциллограммы выходного напряжения АИН

Импульсы от U3, U4 подаются на управляющие электроды транзисторов в такой последовательности, чтобы на выходе АИН было 3 модулированных сигнала, средние напряжения которых образуют трехфазную симметричную систему, которую можно наблюдать осциллографом XSC1 (Рис. 8). Отношение амплитуды управляющего напряжения к амплитуде пилообразного напряжения позволяет изменять время импульса, т.е. изменять скважность. Опытным путем установлена зависимость выходного напряжения АИН от этого отношения (Рис. 9).

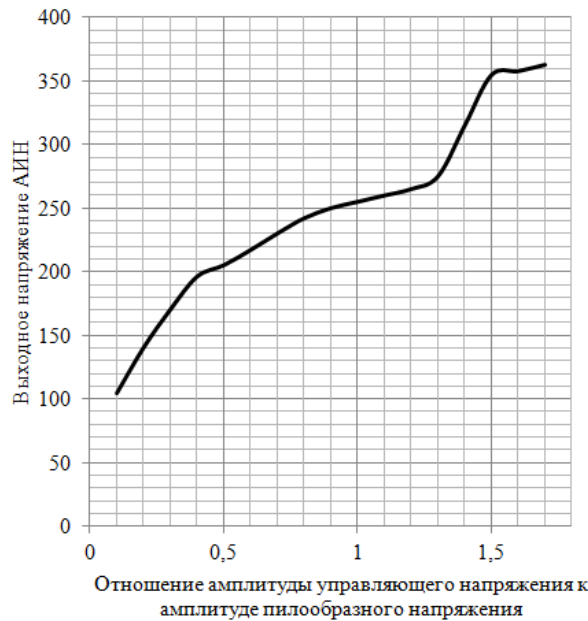


Рис. 9. Зависимость выходного напряжения АИН от отношения амплитуд входных сигналов ШИМ-модулятора

Также в схеме имеются следующие измерители: $XWM1$ – ваттметр, измеряющий потребляемую мощность фазой двигателя $M1$; $XMM1$ – измеритель частоты вращения вала с преобразователем $U2$ (преобразует рад/с в об/мин), $XMM2$ – измеритель электромагнитного момента двигателя.

Для определения потребляемой мощности при дросселировании нужно переключатель $S7$ перевести в верхнее положение, т.е. питать от источника неизменной частоты $V4$. Затем нужно найти момент сопротивления насоса при данной подаче и определить потребляемую мощность и утроить ее.

Момент сопротивления насоса определяется по формуле, Н·м:

$$M_C = \frac{N}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{N}{\omega_0(1-s_{\text{ном}})} = \frac{5450 + 41 \cdot Q}{157,1 \cdot (1 - 0,03)} = 35,77 + 0,27 \cdot Q, \quad (5)$$

где частота вращения считается номинальной и неизменной, т.к. естественная механическая характеристика асинхронного двигателя является жесткой и скорость изменяется не существенно.

Измерим потребляемую мощность при дросселировании через каждые 2 часа и сведем в табл. 2.

Для определения потребляемой мощности при частотном регулировании нужно переключатель $S7$ перевести в нижнее положение. Момент сопротивления центробежного насоса при частотном регулировании определяется по формуле, Н·м [6, с. 378]:

$$M_C = \frac{N_{\text{др}}}{\omega} = \frac{N_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}^3} \cdot \omega^2 = \frac{13620}{152,4^3} \cdot \omega^2 = 3,85 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2. \quad (6)$$

Находим напряжение источника ЭДС $V4$ как среднее значение выходного напряжения трехфазного моста [5, с. 233]:

$$V = 2,34 \cdot U_{\phi} = 2,34 \cdot 220 = 515 \text{ В}. \quad (7)$$

Современные ПЧ обеспечивают экономичное регулирование скорости, высокий и стабильный коэффициент мощности [1, с. 101], поэтому считаем что двигатель работает с $S_{\text{ном}}$. Частота вращения и подача насоса связаны выражениями:

$$\omega = \frac{2\pi f}{p} \cdot (1 - S_{\text{ном}}) \quad (8)$$

$$\frac{Q}{Q_{\text{ном}}} = \frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}. \quad (9)$$

Из (8) и (9) получаем

$$f(Q) = \frac{\omega \cdot p}{2\pi \cdot (1 - S_{\text{НОМ}})} = \frac{Q \cdot \omega_{\text{НОМ}} \cdot p}{2\pi \cdot Q_{\text{НОМ}} (1 - S_{\text{НОМ}})} = \frac{157,1 \cdot 2 \cdot Q}{2\pi \cdot 200 \cdot (1 - 0,03)} = 0,26 \cdot Q. \quad (10)$$

По (10) находим f при данном Q . По учебному пособию закон частотного регулирования выглядит так:

$$\frac{U_{\text{Л}}}{f} = K, \quad (11)$$

где K – коэффициент, $U_{\text{Л}}$ – выходное линейное напряжение ПЧ.

Находим коэффициент K из номинальных данных:

$$K = \frac{380}{50} = 7,6 \text{ В / Гц}.$$

Далее находим $U_{\text{Л}}$ для данного f по (11), затем по графику рис. 5 определяем отношение амплитуды управляющего напряжения к амплитуде пилообразного напряжения и измеряем потребляемую мощность (Табл. 2).

Таблица 2

Опытное определение экономии мощности при внедрении ЧРП

Время, ч	Подача, м³/ч	Дросселирование		ЧРП			Экономия мощности, кВт
		Момент сопротивления, Н·м	Мощность, кВт	Частота f , Гц	Напряжение $U_{\text{Л}}$, В	Мощность, кВт	
0	80	57,37	9,5	20,8	158,08	1,5	8
2	40	46,57	7,7	10,4	79,04	0,3	7,4
4	40	46,57	7,7	10,4	79,04	0,3	7,4
6	140	73,57	12,3	36,4	276,64	6	6,3
8	140	73,57	12,3	36,4	276,64	6	6,3
10	140	73,57	12,3	36,4	276,64	6	6,3
12	120	68,17	11,4	31,2	237,12	3,9	7,5
14	120	68,17	11,4	31,2	237,12	3,9	7,5
16	120	68,17	11,4	31,2	237,12	3,9	7,5
18	120	68,17	11,4	31,2	237,12	3,9	7,5
20	120	68,17	11,4	31,2	237,12	3,9	7,5
22	120	68,17	11,4	31,2	237,12	3,9	7,5
24	80	57,37	9,5	20,8	158,08	1,5	8

Из таблицы видно, что экономия мощности в опыте получается практически одинакова с расчетным значением. Из этого можно сделать вывод, что в программе *NI Multisim 14* показанным способом можно определять экономию мощности при внедрении ЧРП. Для этого нужно иметь технические данные насоса и электродвигателя, а также знать с какой подачей работает насос.

Выводы

Из анализа можно сделать несколько выводов. Во-первых, экономия мощности постоянна и максимальна при расходе насоса ниже 70% при данном графике потребления воды. Во-вторых, уменьшение потерь в двигателе незначительно и практически не влияет на величину снижения потребляемой двигателем мощности при установке ПЧ. В-третьих, достаточно быстрая окупаемость и дальнейшая экономия финансовых средств.

Литература

- 1.Абрамов Б.И., Коган А.И., Бреслав Б.М., и др. Частотно-регулируемый электропривод буровых установок БУ-4200/250 // Электротехника. М.: Издательство. Фирма Знак. 2009. №1. С.8- 13.
- 2.Авербух М.А. Анализ электродинамических процессов и электромагнитной совместимости частотного электропривода в пакете MATLAB 7.12 // Известия высших учебных заведений. Электромеханика 2014. №4. С.57-62.

3. Бабакин В.И. Энергосберегающий частотно-регулируемый электропривод кустовой насосной станции // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2014. Т.1. №2. С.21-25.
4. Глоба М.Д. Разработка программного комплекса для дистанционного управления частотным электроприводом // *Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века*. №4. 2016. С. 204-206.
5. Иванова В.Р. Исследование работоспособности асинхронных электродвигателей совместно с преобразователем частоты // *Материалы 1 Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники»*. 2019. С. 283-286.
6. Иванова В.Р. Разработка критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации активно-адаптивных электроэнергетических систем // *Материалы международной научной конференции «Высокие технологии и инновации в науке»*. СПб: 2018. С. 112-116.
7. Иванова В.Р. Разработка учебного стенда для эффективной и безопасной эксплуатации резервного электроснабжения на промышленных предприятиях // *Известия высших учебных заведений.. Проблемы энергетики*. 2018. №9-10. С.165-169
8. Ivanova VR. The analysis of Measurements of Indicators of Quality of the Electric Power and Calculation of Economic Efficiency After Installation of the Booster Transformer OA. *International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, Fareastcon 2018*. Vladivostok, 03-04 Okt. 2018.
9. Кочегаров М.В, Муконин А.К, Питолин В.М. О работе преобразовательных устройств для частотного электропривода // *Вестник Воронежского государственного технического университета*, 2012. Т. 8. №3. С.166-168.
10. Крысанов В.Н. Разработка адаптивной АСУТП теплоснабжения на примере индивидуального теплового пункта // *Материалы 17 Международного семинара «Физико-математическое моделирование систем»*, 2017. С.79-83.
11. Ланген А.М. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод двухмассовой системы // *Электричество*. Изд. НИУ МЭИ. 1994. С.35-41
12. Макаров А.Н. Автоматизированный электропривод с частотным управлением по датчику гидростатического давления // *Вестник Машиностроения*. 2017. №3. С.53-10.
13. Мамедов Ф.А. Линейный электропривод с однофазным частотным преобразователем для вибропневмосепаратор // *Сборник трудов международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве»*, 2010. Т.3. С.161-164.
14. Мещеряков В.Н. Энергосберегающий каскадно-частотный электропривод для турбомеханизмов нефтегазовой отрасли // *Сборник статей конференции «Булатовские чтения»*, 2018. Т.6. С.218-220.
15. Новиков Е.А. Применение учебного стенда для изучения частотных преобразователей в учебном процесс // *Сборник трудов конференции «Актуальные вопросы преподавания технических дисциплин»*. 2016. С.232-237.
16. Panasetky D. Simplified variable frequency induction-motor drive model for power system stability studies and control // *IFAC-Papersonline*. 2016/ Т.49. №47. pp.451-456.
17. Филонов С. А. Частотно-регулируемый электропривод как способ оптимизации электропотребления // *Сборник трудов конференции «Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения»*. 2018. С.197-204.
18. Хворостенко С.В. Синтез пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для ослабления высших гармоник в цеховых сетях электроснабжения с нелинейными потребителям // *Интеллектуальная электротехника*. 2019. №1(5). С.84-93.
19. Шабанов В.А. Ресурсосберегающий эффект от использования функции подхвата преобразователя частоты электропривода при авторотации вентиляционных установок // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2019. №2. С.34-39.

Авторы публикации

Иванова Виля Равильевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений», Казанский Государственный энергетический университет». E-mail:vr-10@mail.ru.

Киселев Игорь Николаевич — студент, Казанский Государственный энергетический университет. E-mail:igorkiselev17@gmail.com.

References

1. Abramov BI. Frequency-adjustable electric drive for drilling rigs BU-4200/250. *Electrical engineering*. M.: 2009;1:8-13.
2. Averbukh MA Analysis of electrodynamic processes and electromagnetic compatibility of the frequency electric drive in the MATLAB package 7.1. *News of higher educational institutions. Electromechanics*. 2014;4:57-62.
3. Babakin VI. Energy-saving frequency-controlled electric pumping station pump. *Electrical Engineering: a networked electronic scientific journal*. 2014;1(2):21-25.
4. Globa MD. *Development of a software system for remote control of a frequency electric drive*. The scientific and educational potential of young people in solving actual problems of the 21st century. 2016;4:204-206.
5. Ivanova VR. Investigation of the performance of asynchronous electric motors together with a frequency converter. *Proceedings of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects for the Development of the Electric Power Industry and Electrical Engineering"*. 2019. pp. 283-286.
6. Ivanova VR. Development of criteria for assessing decisions made in the design, creation and operation of active-adaptive electric power systems. *Proceedings of the international scientific conference "High Technologies and Innovations in Science"*. St. Petersburg. 2018. pp. 112-116.
7. Ivanova VR. Development of a training facility for the efficient and safe operation of backup power supply at industrial enterprises . *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*. 2018;9-10:165 -169.
8. Ivanova VR. The analysis of Measurements of Indicators of Quality of the Electric Power and Calculation of Economic Efficiency After Installation of the Booster Transformer OA. *International multi-conference on industrial engineering and modern technologies, Fareastcon 2018*. Vladivostok, 03-04 Okt. 2018.
9. Krysanov VN. *Development of an adaptive heat supply process control system on the example of an individual heat supply station*. Proceedings of the 17 th International Seminar "Physical and Mathematical Modeling of Systems". 2017. pp. 79-83.
10. Kochegarov MV. About the work of converters for frequency electric drive. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2012;8(3):166-168.
11. Langen AM. Frequency-controlled asynchronous electric drive of a two-mass system. *Electricity. Ed. SRU MPEI*. 1994. pp. 35-41
12. Makarov AN. Automated electric drive with frequency control by hydrostatic pressure sensor *Bulletin of Machine Building*. 2017;3:53-10.
13. Mamedov FA. Line, 2017ar electric drive with single-phase frequency converter for vibropneumatic separator. *Collected Works of the International Scientific and Technical Conference "Energy Supply and Energy Saving in Agriculture"*. 2010;3:61-164.
14. Meshcheryakov VN. Energy-saving cascade-frequency electric drive for turbomechanisms of the oil and gas industry . Collection of articles of the conference "Bulat readings". 2018;6:218-220.
15. Novikov EA. Application of the training stand for studying frequency converters in the educational process. *Proceedings of the conference "Actual issues of teaching technical disciplines,"* 2016. pp. 232-237.
16. Panasetsky D. *Simplified variable frequency induction-motor drive model for power system stability studies and control* . IFAC-Papersonline. 2016;49(47):451-456.
17. Filonov SA, Pribylova NV, Soldatov YuI. Frequency-controlled electric drive as a way to optimize power consumption . *Proceedings of the conference "Science and education at the present stage of development: experience, problems and ways to solve them"*. 2018. pp.197-204.
18. Khvorostenko SV. Synthesis of passive filter-compensating devices for attenuating higher harmonics in shop-side power supply networks with non-linear consumers. *Intellectual Electrical Engineering*. 2019;1(5):84-93.
19. Shabanov VA. Resource-saving effect from the use of the pickup function of the frequency converter of the electric drive during the autorotation of ventilation systems. *Energy Security and Energy Saving*. 2019;2:34-39.

Authors of the publication

Viliya R. Ivanova – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia. E-mail:vr-10@mail.ru.

Igor N. Kiselev – Kazan state power engineering university, Kazan, Russia. E-mail:igorkiselev17@gmail.com.