

УДК 621.31; 62-03

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
БЕЗТРАНСФОРМАТОРНЫХ МНОГОУРОВНЕВЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ
МАГИСТРАЛЬНЫХ НАСОСОВ**

**EFFICIENCY TRANSFORMERLESS MULTILEVEL FREQUENCY
CONVERTERS IN ELECTRIC DRIVES OF THE MAIN PUMP**

**Шабанов В.А., Алексеев В.Ю., Калимгулов А.Р., Хакимьянов М.И.
Токмаков Д.А., Шепелин А.В.**

**ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация**

**Чебоксарский электроаппаратный завод, г. Чебоксары,
Российская Федерация**

**V.A. Shabanov, V.U. Alekseev, A.R. Kalimgulov, M.I. Khakimyanov
D.A. Tokmakov, A.V. Shepelin**

**FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,
Ufa, the Russian Federation**

Cheboksary Electric Apparatus Plant, Cheboksary, the Russian Federation

e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru

e-mail: cheaz@cheaz.ru

Аннотация. Рассмотрено повышение эффективности использования частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) на нефтеперекачивающих станциях (НПС). В настоящее время наиболее распространёнными являются многоуровневые преобразователи частоты (ПЧ) мостового или ячейкового типа с питанием от многообмоточного силового трансформатора. Наличие такого трансформатора повышает массу, объем

и стоимость ПЧ, снижает энергетические показатели. Рассмотрена одна из самых перспективных схем безтрансформаторного многоуровневого ПЧ, которая вместо входного трансформатора содержит второй силовой электронный преобразователь. Такой ПЧ будет иметь ряд преимуществ перед существующими ПЧ: существенно сниженная масса; уменьшенные габариты; повышенный КПД; сниженная себестоимость; осуществление функции рекуперации энергии в сеть.

Исследовано влияние ПЧ в приводе магистральных насосов на снижение затрат на оплату электроэнергии, на ремонт трубопровода и электродвигателей. Исследования проведены путем выполнения расчетов для технологического участка действующего нефтепровода. Исследования показали, что величины всех трех составляющих снижения затрат соизмеримы. Поэтому игнорирование любой из составляющих может привести к существенному увеличению расчетного срока окупаемости ПЧ. Показано, что снижение расхода электроэнергии на перекачку может составлять менее 3%. При этом на энергетическую эффективность использования ЧРП на НПС существенно будет влиять повышение коэффициента полезного действия ПЧ. Повышение КПД ПЧ за счет исключения входного трансформатора всего на один процент может привести к увеличению экономии электроэнергии до 45%. Показано, что использование безтрансформаторного многоуровневого ПЧ позволит снизить срок окупаемости ЧРП на НПС на 11-16%.

Abstract. The article considers the problems of assessing and improving the use of variable frequency drives (VFD) on oil-pumping stations (OPS). Reducing the weight and size and improving the energy performance of frequency converters (FC) is considered. Currently, multi-level inverters with powering from a multi-winding power transformer are the most common. Such transformer increases the weight, volume and cost and reduces energy indicators of the FC. One of the most promising transformerless multilevel inverter, which has no the input transformer, but has the second electronic converter is

investigated. This FC will have a number of advantages over existing FC: significantly reduced weight; reduced size; increased efficiency; reduced costs; implementation function of energy recovery in the network.

The influence of the inverter of the VFD main pump on reducing the cost of the electricity, repair of pipeline and of the electro motors is investigated. Research are carried out by performing calculations for the technological section of the existing pipeline. The study showed that the values of all three components in reducing costs are commensurate. Therefore, ignoring any of the components may lead to a substantial increase in the estimated payback period of the inverter. It is shown that the reduction of power consumption for pumping may be less than 3%. Thus on the energy efficiency of VFD at OPS will be significantly affected by the increase in the efficiency of the inverter. Increasing the efficiency of the inverter by eliminating the input transformer, just one percent can lead to increased energy saving up to 45%. It is shown that the use of the transformerless multilevel inverters may to reduce the payback period of VFD at OPS to 11-16%.

Ключевые слова: Преобразователь частоты, частотно-регулируемый электропривод (ЧРП), магистральный насос, нефтеперекачивающая станция, оценка эффективности.

Key words: Frequency converter, variable frequency drive (VFD), main pump, oil pumping station, assessing the efficiency.

Введение

В настоящее время во всех крупных компаниях топливно-энергетического комплекса России приняты и внедряются программы по развитию технологий энергоресурсосбережения. Одним из наиболее важных направлений таких технологий является внедрение и развитие частотно-регулируемых электроприводов (ЧРП). Наиболее значительное

снижение энергопотребления при внедрении ЧРП может быть получено в механизмах с вентиляторной характеристикой, приводимых во вращение высоковольтными двигателями большой мощности. Типичным примером таких устройств являются центробежные насосы, чья механическая характеристика описывается уравнением квадратичной параболы, а потребляемая мощность пропорциональна кубу частоты вращения. Для таких механизмов даже небольшое снижение частоты вращения может дать значительное снижение потребляемой мощности. В связи с этим в последние годы много внимания уделяется разработке высоковольтных ЧРП центробежных магистральных насосов нефтеперекачивающих станций (НПС) [1, 2, 3, 4]. Снижение расхода электроэнергии на перекачку – это одно из главных достоинств использования ЧРП на НПС [5, 6]. Мощность приводов магистральных насосов достигает 8 МВт и более, а расход электроэнергии на привод магистральных насосов составляет до 94-98% от общего расхода электроэнергии НПС. Так как потребляемая мощность центробежных насосов пропорциональна кубу частоты вращения, то теоретически снижение частоты вращения магистральных насосов всего на 1% может снизить потребление мощности НПС на перекачку примерно на 2,7%. Однако, такой эффект возможен только в том случае, если все насосы технологического участка магистрального нефтепровода оснащены ЧРП и для всех насосов соблюдаются условия его работы с максимальным КПД [7]. В состав технологического участка магистрального нефтепровода входят до 5-6 НПС. На каждой НПС устанавливается, как правило, четыре магистральных насоса. Для установки ЧРП на всех магистральных насосах технологического участка может потребоваться свыше двадцати преобразователей частоты (ПЧ). Это потребует настолько больших денежных затрат, что срок окупаемости ПЧ за счет снижения расхода электроэнергии может достигать нескольких десятков лет и превосходить срок службы этих устройств. Поэтому для повышения эффективности использования ЧРП на НПС необходимо

обеспечить снижение массогабаритных и улучшение энергетических показателей ПЧ. Снижение массогабаритных показателей ПЧ приведет к уменьшению их стоимости, затрат на монтажные и пуско-наладочные работы, а также на эксплуатацию. Улучшение энергетических показателей ПЧ, в том числе, повышение КПД и коэффициента мощности, снижение уровня высших гармоник тока, генерируемых в питающую электрическую сеть, и уровня гармоник в выходном напряжении приведет к уменьшению эксплуатационных затрат на ЧРП. В статье рассматриваются пути повышения эффективности использования ЧРП магистральных насосов на НПС.

1 Снижение массогабаритных показателей ПЧ. Разработка новых систем высоковольтных ПЧ

В настоящее время применяются следующие основные системы высоковольтных ПЧ на базе автономных инверторов напряжения: ПЧ прямого преобразования, двухтрансформаторные ПЧ с низковольтным преобразователем и многоуровневые ПЧ. В зависимости от схемы полупроводниковых преобразователей многоуровневые ПЧ выполняются либо по мостовой схеме, либо ячейкового типа [8, 9].

В ПЧ прямого преобразования напряжение питающей сети и номинальное напряжение двигателя соответствуют напряжению преобразователя частоты. Силовые схемы управляемого выпрямителя и инвертора построены на базе трехфазных мостов. Каждое вентильное плечо выпрямителя (инвертора) составлено из нескольких последовательно включенных вентилях (тиристоров или IGBT-транзисторов). Такой высоковольтный ПЧ прямого преобразования имеет сложную схему силовой части и систему управления и контроля целостности силовых полупроводниковых приборов на стороне высокого напряжения. Существенным недостатком высоковольтных ПЧ прямого преобразования является их высокая стоимость [10].

Двухтрансформаторные ПЧ содержат низковольтный преобразователь с понижающим трансформатором на входе и повышающим трансформатором на выходе. Снижение рабочего напряжения преобразователя позволяет устанавливать по одному вентилю в плечах выпрямителя и инвертора и снизить изоляционные промежутки. При этом габариты шкафа низковольтного преобразователя в 2,5...3 раза меньше, чем высоковольтного. Основными недостатками двухтрансформаторных преобразователей являются ограниченный диапазон мощностей (до 1500–1600 кВт), низкие по сравнению с другими схемами КПД (93...96%) и надежность. Кроме того, такие преобразователи из-за насыщения сердечника выходного трансформатора имеют ограниченный диапазон регулирования частоты вращения двигателя ($n_{ном.} > n > 0,5n_{ном.}$) [10].

Мостовые многоуровневые ПЧ в каждом плече инвертора содержат несколько последовательно включенных вентиляей. Но, в отличие от ПЧ прямого преобразования, вентили используются для ступенчатого формирования выходного напряжения с уменьшенными шагами по напряжению, число которых определяет число уровней напряжения. Это обеспечивает снижение высших гармоник выходного напряжения, излучаемых преобразователем. Форма выходного напряжения пятиуровневого ПЧ показана на рисунке 1.

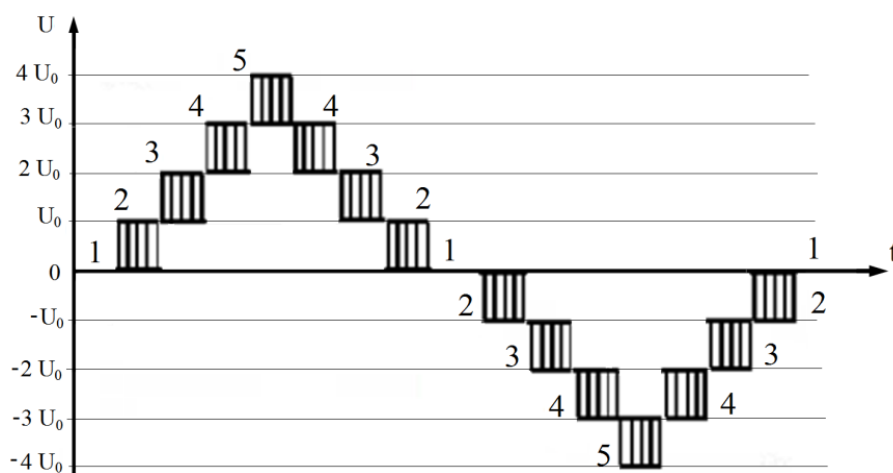


Рисунок 1. Формирование выходного напряжения многоуровневого ПЧ

Диаграмма напряжения представлена в долях напряжения U_0 на выходе выпрямителя в звене постоянного тока.

Ячейковые многоуровневые ПЧ также обеспечивают многоуровневое формирование выходного напряжения. Они строятся на базе отдельных ячеек (силовых модулей), каждая из которых питается напряжением U_{in} от отдельной трехфазной вторичной обмотки многообмоточного трансформатора $W_{2,k}$, где k – номер вторичной обмотки, и содержит трехфазный мостовой выпрямитель B , сглаживающий конденсатор C и однофазный инвертор I (рисунок 2).

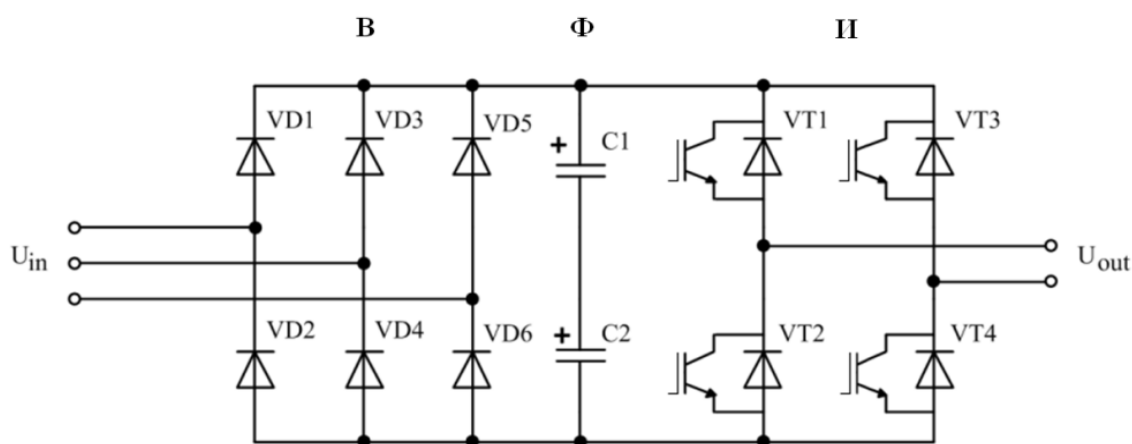


Рисунок 2. Схема силового модуля

Выходы выпрямительно-инверторных ячеек включаются последовательно, образуя три группы, соединенные в звезду (рисунок 3). При этом фазное напряжение, подводимое к электродвигателю ЭД, равно сумме выходных напряжений силовых ячеек U_{out} . Каждая ячейка обеспечивает три уровня выходного напряжения: U_0 , 0 и $-U_0$. При n последовательно включенных ячейках обеспечивается $3+2(n-1)$ уровней выходного напряжения преобразователя в целом. Например, при трех ячейках в фазе можно получить 7 уровней фазного напряжения, а при 5 ячейках – 11. Суммарный коэффициент гармоник при этом не превышает 3% [10].

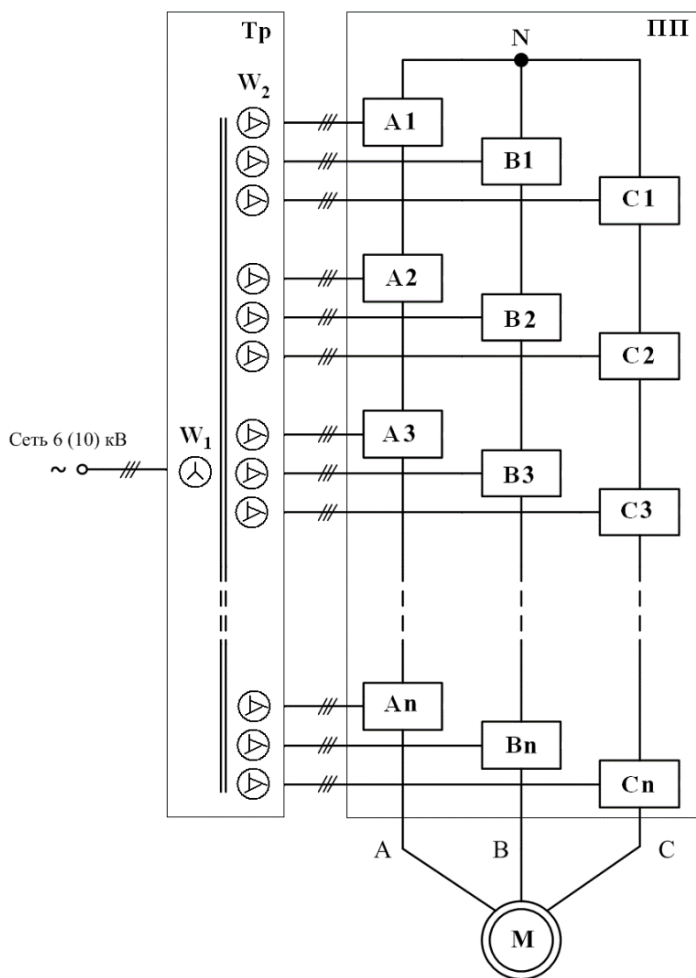


Рисунок 3. Схема ячейкового многоуровневого ПЧ

Такой ПЧ содержит простые выпрямительно-инверторные ячейки, но сложный силовой трансформатор с множеством вторичных обмоток, соединенных зигзагом для снижения гармоник во входном токе. Входной трансформатор Tr занимает более 30% объема ПЧ, до 70% массы и до 30% его стоимости. Силовой трансформатор мостового многоуровневого ПЧ проще, но также занимает значительную часть объема, веса и стоимости. Кроме того, такие ПЧ не способны обеспечить рекуперацию энергии в сеть при снижении частоты вращения и торможении электродвигателя.

Таким образом, в настоящее время на рынке представлены различные высоковольтные ПЧ, основанные на различных конструктивных решениях. Наиболее распространенная конфигурация ПЧ представляет собой многоуровневый преобразователь мостового или ячейкового типа с питанием от многообмоточного силового трансформатора. Наличие такого

трансформатора повышает массу, объем и стоимость ПЧ, снижает энергетические показатели. Поэтому актуальной задачей является разработка ПЧ, построенных с использованием иных технических принципов, позволяющих избавиться от указанных недостатков.

В последние годы активно разрабатываются безтрансформаторные схемы многоуровневых ПЧ [11, 12]. Одна из самых перспективных схем безтрансформаторного многоуровневого ПЧ предложена в [13, 14] (патентоуладелец Чебоксарский электроаппаратный завод (ЧЭАЗ)). В основе конфигурации создаваемого на ЧЭАЗ высоковольтного преобразователя лежит многоуровневая система, силовой электронный преобразователь которой (выходной) образован последовательно соединенными по выходу низковольтными выпрямительно-инверторными ячейками, образующими три группы ячеек, соединенных в звезду, к фазным выводам которой подключается обмотка электродвигателя. Принципиальное отличие предложенной в [13] конфигурации от известных в том, что отсутствует входной многообмоточный трансформатор, а схема ПЧ выполняется симметричной. Для этого вместо входного трансформатора разрабатываемый на ЧЭАЗ ПЧ содержит второй (входной) силовой электронный преобразователь П2, построенный аналогично первому (выходному) П1, причем фазные выводы «звезды» входного преобразователя П2 подключаются к питающей электрической сети (рисунок 4).

Переток энергии между ячейками входного П2 и выходного П1 преобразователей осуществляется на высокой частоте посредством малогабаритных разделяющих трансформаторов, расположенных внутри ячеек. Использование повышенной частоты снижает массогабаритные показатели трансформаторов, а электрическое объединение всех разделительных трансформаторов через шины высокой частоты обеспечивает выравнивание между собой напряжения в звеньях постоянного тока всех ячеек и позволяет более чем в десять раз снизить

емкость силовых накопительных конденсаторов в ячейках, что значительно повышает надежность и снижает цену ПЧ.

Рассмотренный ПЧ будет иметь следующие преимущества перед существующими преобразователями: существенно сниженная масса (в 3-5 раз); уменьшенные габариты (в 2-3 раза) и себестоимость (на 10-15%); сохранение работоспособности при отклонениях напряжения питания в широких пределах ($-50...+20\%$); возможность рекуперации энергии в сеть.

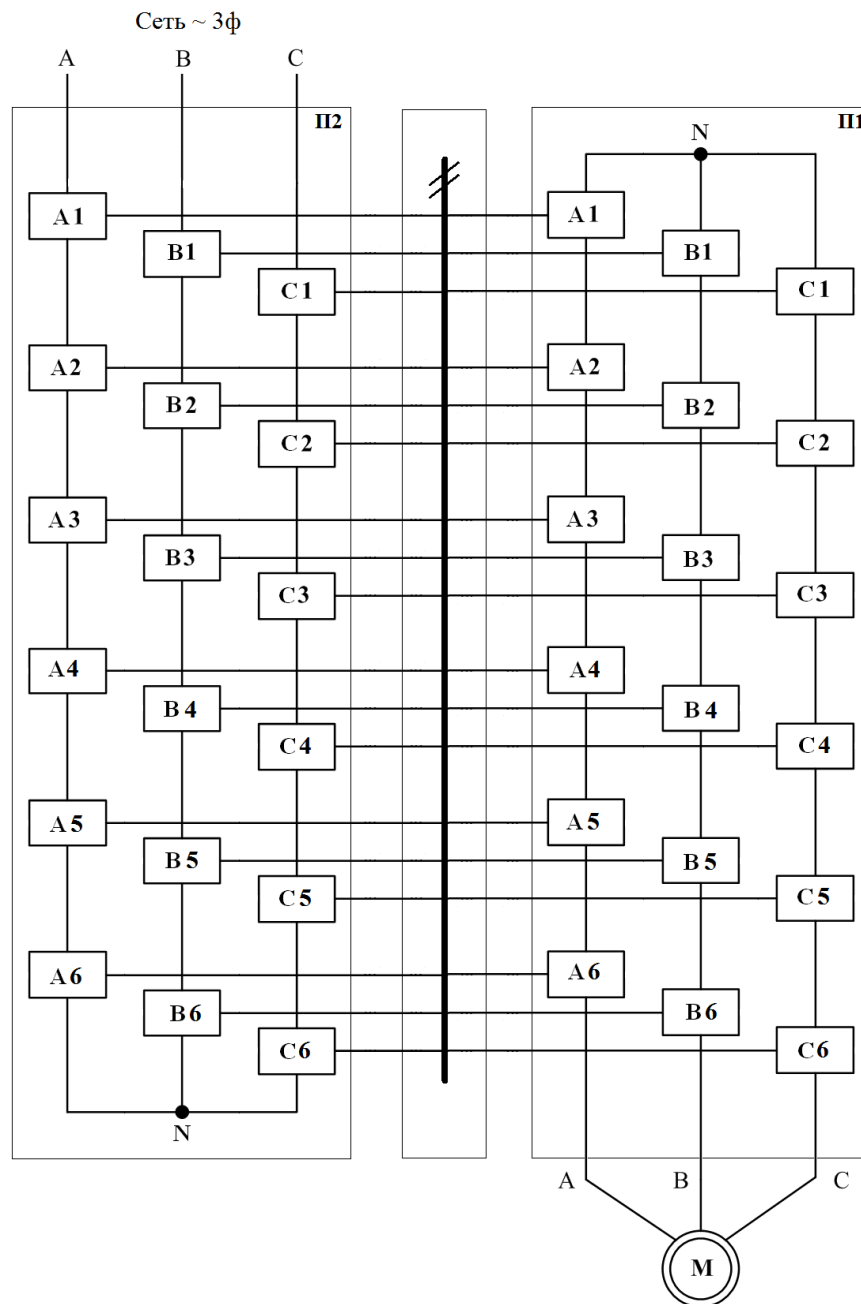


Рисунок 4. Многоуровневый ПЧ без входного многообмоточного трансформатора

2 Оценка эффективности использования ЧРП

Использование ЧРП на НПС приводит не только к сокращению расхода электроэнергии, но и позволяет уменьшить число включений и отключений магистральных насосов и их электродвигателей. В результате снижается число пусков и пусковые токи электродвигателей, число и величина перепадов давления в трубопроводе, что в конечном итоге приводит к повышению ресурса электродвигателей, насосов и трубопровода. Поэтому при оценке эффективности использования ЧРП целесообразно использовать не только энергетические критерии, но и критерии, связанные с повышением остаточного ресурса и снижением затрат на эксплуатацию и ремонт трубопровода и энергетического оборудования, в первую очередь, электродвигателей [15, 16].

Снижение расхода электроэнергии. Расчеты по оценке снижения расхода электроэнергии при использовании ЧРП были выполнены для технологического участка Ленинск-Нурлино нефтепровода НКК (Нижевартовск – Курган – Куйбышев) за период январь – декабрь 2013 г. (таблица 1). При расчетах использована методика, изложенная в [5, 6].

Таблица 1. Результаты расчета снижения расхода электроэнергии

Фактический расход электроэнергии без ЧРП, кВт·ч	Снижение расхода электроэнергии, кВт·ч		
	При использовании ЧРП для изменения производительности	При использовании ЧРП для регулирования давления	Всего
134 770 286,1	1 406 635,1 (1,0%)	1 614 778,0 (1,2%)	30 221 413,1
	При использовании ПЧ по [13] с повышенным КПД на 1%		43 126 491,5

Снижение расхода электроэнергии оценивалось как за счет частотного регулирования производительности нефтепровода вместо циклической перекачки, так и за счет использования частотного регулирования в качестве регуляторов давления. При установке ЧРП на трех магистральных насосах технологического участка происходит снижение расхода

электроэнергии на 2,2%. Снижение затрат на оплату электроэнергии составит, в ценах 2013 г., 7 238 тыс. руб. Небольшое снижение расхода электроэнергии, всего на 2,2%, означает, что энергетическая эффективность ЧРП в значительной степени зависит от КПД ПЧ. Повышение КПД ПЧ на 1% приведет к снижению расхода электроэнергии также примерно на 1% (при установке ПЧ на всех насосах) и общее снижение расхода электроэнергии составит 3,2%. В результате при использовании ПЧ с повышенным на 1% КПД снижение расхода электроэнергии увеличивается на 45% и составит 43 126 491,5 кВт·ч. Повышение КПД ПЧ достигается за счет исключения входного трансформатора [13].

Снижение затрат на ремонт электродвигателей. Одной из основных причин, влияющих на снижение остаточного ресурса электрических машин, является износ изоляции. Использование ЧРП приводит к снижению износа изоляции, как вследствие снижения числа пусков, так и вследствие использования плавного пуска электродвигателей и ограничения величины пусковых токов. Расчеты по оценке износа изоляции и затрат на текущие и капитальные ремонты электродвигателей были выполнены для технологического участка Ленинск-Нурлино магистрального нефтепровода НКК по методике, изложенной в [17, 18]. При пуске электродвигателей из горячего состояния начальная температура обмотки $\theta_{\text{нач}}$ принималась равной номинальному значению, а при пуске из холодного состояния $\theta_{\text{нач}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Было установлено, что при установке ЧРП на трех магистральных насосах технологического участка и снижении числа пусков на 14%, снижение затрат на текущие и капитальные ремонты электродвигателей составит 2697,3 тыс. руб. в год.

Снижение затрат на ремонт трубопровода. При циклической перекачке также циклически изменяются давления на входах и выходах НПС, а также давления во всех других сечениях нефтепровода, в том числе

и в опасных, в которых имеются дефекты. Циклическое изменение давления в трубопроводе приводит к ускоренному развитию дефектов в теле трубы, что сокращает остаточный ресурс и приводит к необходимости сокращать межремонтный период. Применение ЧРП позволяет исключить циклические режимы перекачки, снизить цикличность нагружения, увеличить межремонтный период и снизить среднегодовые затраты на ремонт трубопровода [19]. Результаты расчета снижения затрат на ремонт трубопровода (на устранение дефектов) от использования трех ЧРП на технологическом участке Ленинск-Нурлино магистрального нефтепровода НКК за 2013 г., выполненные в соответствии с [19], приведены в таблице 2.

Затраты на устранение дефектов при работе МН без использования ЧРП изменяются в широких пределах. Чем дольше эксплуатируется нефтепровод, тем больше затраты на ремонт и тем выше эффект от использования ЧРП. В строке 2 приведены расчеты снижения затрат при увеличенных в три раза затратах на ремонт трубопровода, при работе без использования ЧРП.

Таблица 2. Результаты расчета снижения затрат на ремонт трубопровода

Затраты, на ремонт при работе МН без использования ЧРП, З _{р1} , тыс. руб.	Коэффициент снижения цикличности нагружения для отдельных участков, k _{с.ц}	Снижение затрат при использовании ЧРП, ΔЗ, тыс. руб.
33 934,4	От 1,56 до 2,29	17 242,4
101 803,2 (Увеличение в 3 раза)	От 1,56 до 2,29	51 727,2

3 Оценка экономической эффективности использования ЧРП по сроку окупаемости

При использовании всех рассмотренных положительных эффектов от использования ЧРП магистральных насосов в качестве критерия

эффективности целесообразно использовать срок окупаемости капитальных вложений $T_{ок}$, лет:

$$T_{ок} = \frac{(1 + 3k_M) \cdot N_{ПЧ} \cdot Z_{ПЧ}}{\mathcal{E}}, \quad (1)$$

где $Z_{ПЧ}$ – стоимость ПЧ, тыс. руб.;

$N_{ПЧ}$ – количество устанавливаемых ЧРП на НПС технологического участка;

k_M – коэффициент, учитывающий затраты на строительные, монтажные и пуско-наладочные работы;

\mathcal{E} – годовая экономия при применении ЧРП, тыс. руб.:

$$\mathcal{E} = \Delta Z_{ЭЭ} + \Delta Z_{ЭД} + \Delta Z_{ТУ} - Z_{обсл.}, \quad (2)$$

где $\Delta Z_{ЭЭ}$ – снижение затрат на оплату электроэнергии;

$\Delta Z_{ЭД}$ – снижения затрат на проведение ремонтов электродвигателей;

$\Delta Z_{ТУ}$ – снижение затрат на ремонт трубопровода технологического участка;

$Z_{обсл.}$ – годовые затраты на обслуживание ПЧ специализированной организацией:

$$Z_{обсл.} = k_{обсл.} \cdot N_{ПЧ} \cdot Z_{ПЧ}, \quad (3)$$

где $Z_{ПЧ}$ – стоимость ПЧ, тыс. руб.;

$k_{обсл.}$ – коэффициент, принимаемый на основе опыта эксплуатации либо по данным заводов изготовителей, или обслуживающих организаций.

Пример расчета. Расчеты срока окупаемости ЧРП для участка Ленинск-Нурлино без учета затрат на строительные-монтажные работы и обслуживание ПЧ приведены в таблице 3.

Таблица 3. Экономическая эффективность ЧРП

Снижение затрат за год, тыс. руб				Срок окупаемости, лет	
На оплату электроэнергии	На ремонт ЭД	На ремонт трубы	Итого:	При ПЧ с входным трансформатором	При установке ПЧ по [13]
7238,00	2697,30	17242,4	27177,7	8,83	7,42...7,86
7238,00	2697,30	51727,2	61662,5	3,89	3,27...3,50

Если принять суммарное снижение затрат за 100%, то снижение затрат на оплату электроэнергии в суммарном снижении затрат составит 26,7%; на ремонт электродвигателей 9,9%, на ремонт трубопровода 63,4%. Величины всех составляющих снижения затрат соизмеримы. Поэтому игнорирование любой из составляющих приведет к существенному увеличению расчетного срока окупаемости и, как следствие, к снижению расчетного значения эффективности использования ЧРП. В строке 2 приведены расчеты срока окупаемости при увеличенных в три раза расходах на ремонт трубопровода. При этом срок окупаемости ЧРП снижается до 3,89 лет. На срок окупаемости в значительной степени влияют стоимость ПЧ и затраты на эксплуатацию. Стоимость ПЧ для двигателя мощностью 8 МВт при расчетах была принята равной 80 млн руб. По прогнозным расчетам стоимость разрабатываемого на ЧЭАЗ многоуровневого ПЧ без сложного дорогостоящего входного трансформатора снизится на 10-15%. При этом срок окупаемости ЧРП с учетом повышения КПД ПЧ и рекуперации энергии в сеть (при торможении и в режимах снижения частоты) снизится, примерно, на 11-16% и составит, для рассматриваемого примера, от 3,27 до 7,86 лет.

Выводы

1 В настоящее время наиболее распространёнными являются многоуровневые ПЧ мостового или ячейкового типа с питанием от многообмоточного силового трансформатора. Наличие в схеме такого трансформатора повышает массу, объем и стоимость ПЧ, снижает

энергетические показатели. Поэтому актуальной проблемой является совершенствование ПЧ.

2 Одной из самых перспективных является схема безтрансформаторного многоуровневого ПЧ. Схема выполняется симметричной, вместо входного трансформатора содержит второй (входной) силовой электронный преобразователь. Такой ПЧ будет иметь следующие преимущества перед существующими преобразователями: существенно сниженная масса (в 3-5 раз); уменьшенные габариты (в 2-3 раза) и себестоимость (на 10-15%); сохранение работоспособности при отклонениях напряжения питания в широких пределах ($-50...+20\%$); возможность рекуперации энергии в сеть.

3 Исследование влияния типа ПЧ на энергетические критерии оценки эффективности использования ЧРП и критерии, связанные со снижением затрат на эксплуатацию и ремонт трубопровода и электродвигателей, показало, что величины всех составляющих снижения затрат соизмеримы. Поэтому игнорирование любой из составляющих приведет к увеличению расчетного срока окупаемости и снижению расчетной эффективности использования ЧРП. Показано, что на снижение расхода электроэнергии на перекачку существенно влияет повышение коэффициента полезного действия ПЧ. Повышение КПД ПЧ за счет исключения входного трансформатора всего на один процент может привести к увеличению экономии электроэнергии на 45%. Показано, что при снижении числа пусков электродвигателей магистральных насосов на 14%, снижение затрат на текущие и капитальные ремонты электродвигателей составляет 9,8% от общей экономии энергоресурсов. По прогнозным расчетам себестоимость разрабатываемого на ЧЭАЗ многоуровневого ПЧ без сложного дорогостоящего входного трансформатора снизится на 10-15%. При этом с учетом повышения КПД ПЧ и рекуперации энергии в сеть срок окупаемости ЧРП снизится, примерно, на 11-16% и составит, для рассмотренного примера, от 3,27 до 7,86 лет.

Список используемых источников

1 Туманский А.П. Оптимизация режимов перекачки по магистральным трубопроводам с перекачивающими станциями, оборудованными частотно-регулируемым приводом // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2005. №8. С. 11-14.

2 Самоленков С.В., Кабанов О.В. Об алгоритме оптимального управления работой нефтеперекачивающих станций //Рассохинские чтения: сб. материалов меж регион. семинара. 2011. С. 287-291.

3 Сокол Е.И., Бару А.Ю., Лукпанов Ж.К. Опыт разработки и внедрения преобразователей частоты для регулируемого электропривода насосных агрегатов МН// Электротехника. 2004. № 7. С. 52-57.

4 Шабанов В.А., Кабаргина О.В. Достоинства и перспективы использования частотно регулируемого электропривода магистральных насосов на НПС // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2011. Т. 2. С. 63-66.

5 Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Шарипова С.Ф. Алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию снижения расхода электроэнергии//Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. №2(9). С. 34-42.

6 Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Шарипова С.Ф. Анализ коэффициента полезного действия магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов при использовании частотно регулируемого электропривода в функции регуляторов давления // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2013. №1. С. 324-333. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_16.pdf

7 Шабанов В.А., Шарипова С.Ф., Ахметгареев А.А. Влияние частоты вращения на КПД магистрального насоса при разном сочетании числа регулируемых и нерегулируемых магистральных насосов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. №4(13).

8 Лазарев Г.Б. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем// Новости электротехники. 2005. № 2. С. 23.

9 Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики/ Н. Донской, А Иванов, В. Матисон, И. Ушаков // Силовая электроника. 2008. № 1. С. 26-32.

10 Бурдасов Б. К., Нестеров С. А. Многоуровневые и каскадные преобразователи частоты для высоковольтных электроприводов переменного тока. URL: http://fetmag.mrsu.ru/2011-1/pdf/Frequency_Converters.pdf (дата обращения: 21.08.2015).

11 Иванов А.Г., Ушаков И.И. Бестрансформаторный многоуровневый инвертор для высоковольтного электропривода // Силовая электроника. 2011. № 4. С. 36-44.

12 Статический многоуровневый преобразователь частоты для питания асинхронных и синхронных электродвигателей/ А. П. Стригулин: пат. РФ № 2303851. Оpubл. 27.07.2007. БИ № 21.

13 Способ распределения мощности в многоуровневом преобразователе частоты для питания синхронных и асинхронных двигателей/ А. Л. Иванов, А. В. Шепелин: пат. РФ № 2489791. Оpubл. 10.08. 2013. БИ № 22.

14 Многоуровневый преобразователь электроэнергии для питания синхронных и асинхронных двигателей от источника высокого напряжения постоянного тока / А.Л. Иванов, А.В. Шепелин Д.А. Токмаков, А.В. Шепелин, И.В. Викторов, Д.Ю. Григорьев, Е.А. Терентьев, Д.О. Мочалов: пат. РФ № 2554856. Оpubл. 27.06.2015. БИ № 18.

15 Шабанов В.А., Бондаренко О.В. Целевые функции и критерии оптимизации перекачки нефти по нефтепроводам при частотно-регулируемом электроприводе магистральных насосов // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2012. № 4. С. 10-17. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_12.pdf

16 Шабанов В.А., Шарипова С.Ф. Критерии эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на нефтеперекачивающих станциях // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. №1(9). С. 38-43.

17 Shabanov V.A., Khakimyanov M.I., Khakimov E.F. The Influence of Main Pump with High-Voltage Variable Frequency Drives on Electric Motors Periodic Repair // Applied Mechanics and Materials Vol. 698 (2015) pp. 3-6.

18 Шабанов В.А., Хакимьянов М.И. Снижение износа изоляции электродвигателей магистральных насосов при использовании частотно-регулируемого электропривода// Изв. высших учебных заведений. Нефть и газ. 2014. № 6. С.75-79.

19 Шабанов В.А., Павлова З.Х., Калимгулов А.Р. О влиянии частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов на цикличность нагружения трубопровода// Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2012. №5.С. 23-30. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_14.pdf

References

1 Tumanskiy A.P. Optimizatsiya rezhimov perekachki po magistral'nyim truboprovodam s perekachivayushchimi stantsiyami, oborudovannymi chastotno-reguliruyemym privodom // Transport i khraneniye nefteproduktov. 2005. № 8. Pp. 11-14. [in Russian].

2 Samolenkov S.V., Kabanov O.V. Ob algoritme optimal'nogo upravleniya rabotoy nefteperekachivayushchikh stantsiy // Sbornik materialov mezhregional'nogo seminara «Rassokhinskiye chteniya». 2011. Pp. 287-291. [in Russian].

3 Sokol E.I., Baru A.J., Lukpanov J.K. Experience in the development and implementation of frequency converters for adjustable electric pumps MN.-Electrical, 2004. № 7. Pp. 52-57. [in Russian].

4 Shabanov V.A., Kabargina O.V. Advantages and prospects of frequency controlled electric main pumps at oil pumping stations // Quality management in the oil and gas complex. 2011. V. 2. Pp. 63-66. [in Russian].

5 Shabanov V.A., Khakimov E.F., Sharipova S.F. Algoritm otsenki effektivnosti chastotno-reguliruyemogo elektroprivoda magistral'nykh nasosov ekspluatiruyemykh nefteprovodov po kriteriyu snizheniya raskhoda elektroenergii // Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy. 2013. №2(9). Pp. 34-42. [in Russian].

6 Shabanov V.A., Khakimov E.F., Sharipova S.F. Analiz koeffitsiyenta poleznogo deystviya magistral'nykh nasosov ekspluatiruyemykh nefteprovodov pri ispol'zovanii chastotno reguliruyemogo elektroprivoda v funktsii regulyatorov davleniya// Neftegazovoye delo: elektron. nauch. zhurn. 2013. №1. Pp. 324-333. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_16.pdf [in Russian].

7 Shabanov V.A., Sharipova S.F., Akhmetgareyev A.A. Vliyaniye chastoty vrashcheniya na KPD magistral'nogo nasosa pri raznom sochetanii chisla reguliruyemykh i nereguliruyemykh magistral'nykh nasosov // Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye kompleksy i sistemy, 2013. №4 (13). [in Russian].

8 Lazarev G.B. High voltage converters for variable-speed drive. Construction of various sistem.- News elektrotehniki . 2005. №2. Pp. 23. [in Russian].

9 Donskoy N., Ivanov A., Matison V., Ushakov I. Mnogourovnevyye avtonomnyye inventory dlya elektroprivoda i elektroenergetiki// Silovaya elektronika. 2008. № 1. Pp. 26-32. [in Russian].

10 Burdasov B. K., Nesterov S. A. Mnogourovnevyye i kaskadnyye preobrazovateli chastoty dlya vysokovol'tnykh elektroprivodov peremennogo toka. URL: http://fetmag.mrsu.ru/2011-1/pdf/Frequency_Converters.pdf (the date of circulation: 21.08.2015). [in Russian].

11 Ivanov A.G., Ushakov I.I. Bestransformatorny mnogourovnevyy inverter dlya vysokovol'tnogo elektroprivoda // Silovaya elektronika. 2011. №4. Pp. 36-44. [in Russian].

12 Sticheskiy mnogourovnevyy preobrazovatel' chastoty dlya pitaniya asinkhronnykh i sinkhronnykh elektrodvigateley/ Strigulin A. P.: Pat. RF № 2303851. Opubl. 27.07.2007. B.I. №21. [in Russian].

13 Sposob raspredeleniya moshchnosti v mnogourovnevom preobrazovatele chastoty dlya pitaniya sinkhronnykh i asinkhronnykh dvigateley / Ivanov A. L., Shepelin A. V.: Pat. RF № 2489791. Opubl. 10.08.2013. B.I. № 22. [in Russian].

14 Mnogourovnevyy preobrazovatel' elektroenergii dlya pitaniya sinkhronnykh i asinkhronnykh dvigateley ot istochnika vysokogo napryazheniya postoyannogo toka / Ivanov A. L., Shepelin An. V. Tokmakov D.A., Shepelin A. V, Viktorov I. V., Grigor'yev D. YU., Terent'yev Ye. A., Mochalov D. O.: Pat. RF № 2554856. Opubl. 27.06.2015. B.I. № 18. [in Russian].

15 Shabanov V.A., Bondarenko O.V. Tselevyye funktsii i kriterii optimizatsii perekachki nefti po nefteprovodam pri chastotno-reguliruyemom elektroprivode magistral'nykh nasosov// Neftegazovoye delo: Elektron. Nauch. zhurn. 2012. № 4. Pp. 10-17. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_12.pdf [in Russian].

16 Shabanov V.A., Sharipova S.F. Kriterii effektivnosti chastotno-reguliruyemogo elektroprivoda magistral'nykh nasosov na nefteperekachivayushchikh stantsiyakh //Elektrotekhnicheskiye i informatsionnyye komplekсы i sistemy. 2013. №1(9). Pp. 38-43. [in Russian].

17 Shabanov V.A., Khakimyanov M.I., Khakimov E.F. The Influence of Main Pump with High-Voltage Variable Frequency Drives on Electric Motors Periodic Repair // Applied Mechanics and Materials Vol. 698 (2015) pp. 3-6.

18 Shabanov V.A., Khakimyanov M.I. Snizheniye iznosa izolyatsii elektrodvigatelye magistral'nykh nasosov pri ispol'zovanii chastotno-reguliruyemogo elektroprivoda // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz. 2014. № 6. Pp.75-79. [in Russian].

19 Shabanov V.A., Pavlova Z.Kh., Kalimgulov A.R. O vliyani chastotno-reguliruyemogo elektroprivoda magistral'nykh nasosov na tsiklichnost' nagruzheniya truboprovoda //Neftegazovoye delo: elektron. nauch. zhurn. 2012. № 5. Pp. 23-30. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Shabanov/Shabanov_14.pdf [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Шабанов В.А., канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

V.A. Shabanov, Candidate of Engineering Sciences, Head of the Chair “Electrotechnique and Electrical Equipment of Enterprises”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: ShabanovVA1@yandex.ru

Алексеев В.Ю., канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

V.U. Alekseev, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair “Electrotechnique and Electrical Equipment of Enterprises”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: vik120212@gmail.com

Калимгулов А.Р., канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A.R. Kalimgulov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair “Electrotechnique and Electrical Equipment of Enterprises”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: airatkr@rambler.ru

Хакимьянов М.И., канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и электрооборудование предприятий», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

M.I. Khakimyanov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair “Electrotechnique and Electrical Equipment of Enterprises”, FSBEI NPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: hakimyanovmi@gmail.com

Токмаков Д.А., техн. директор ГК ЧЭАЗ, генеральный директор ООО ЧЭАЗ-ЭЛПРИ, г. Чебоксары, Российская Федерация

D.A. Tokmakov, Technical Director Cheboksary Electric Apparatus Plant, Cheboksary, the Russian Federation

e-mail: cheaz@cheaz.ru

Шепелин А.В., техн. директор ООО ЧЭАЗ-ЭЛПРИ, г. Чебоксары, Российская Федерация

A.V. Shepelin, Technical Director ChEAZ-ELPRY Ltd, Cheboksary, the Russian Federation

e-mail: elpry@mail.ru