

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ УСТАНОВКИ ДОБЫЧИ НЕФТИ

М.Ю. Чернев

РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина,
Россия, Москва, makchernev@gmail.com

Аннотация. В настоящей статье выполнен анализ влияния вида и состава преобразователей частоты на уровень несинусоидальности токов и напряжений, рассмотрены способы компенсации негативных влияний уровня гармонических искажений, выдаваемых выпрямителем, зависящих от пульсности схемы выпрямителя, на входе ПЧ в сторону питающей сети. Выбрана методика определения дополнительных потерь электроэнергии, обусловленных несинусоидальностью токов и напряжений.

Ключевые слова: ПЧ, ПЭД, выпрямитель, пульсность, гармоники, несинусоидальность, потери.

ENERGY LOSSES IN ELEMENTS OF ELECTRICAL POWER SYSTEM OF FREQUENCY CONTROLLED SUBMERSIBLE MOTOR OF OIL PRODUCTION INSTALLATION

M.U. Chernev,

Gubkin Russian State University of Oil and Gas,
Russia, Moscow, makchernev@gmail.com

Abstract. In the article it is analyzed how a type and constitution of the frequency converter (FC) effects on the level of non-sinusoidal currents and voltages, considered methods of compensation the negative influences produced by rectifier on the harmonic distortion which depend on rectifier pulse circuit on the FC input towards supply mains. The technique is selected aimed at detecting the additional power losses caused by non-sinusoidal currents and voltages.

Keywords: frequency converter, electrical submersible motor, rectifier, pulse, harmonics, nonsinusoidality, power loss.

В настоящее время частотно-регулируемые электроприводы находят все большее применение в технологических установках добычи нефти. Частотно-регулируемый привод (ЧРП) позволяет оптимизировать рабочие параметры электроцентробежного насоса (ЭЦН) при высоком значении газового фактора, высокой вязкости или наличии песка, что позволяет улучшить управление ЭЦН, контролировать депрессию в скважине, облегчать пуск, понижать температуру нагрева погружного электродвигателя (ПЭД), максимально использовать возможности мониторинга технологических параметров скважины [1,2]. Схема подключения элементов ЧРП к сети представлена на рисунке 1.

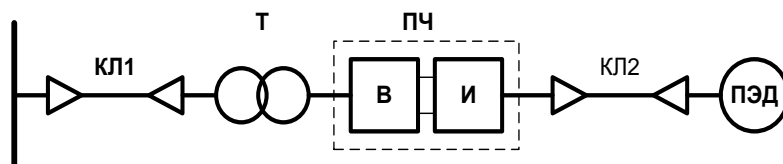


Рис. 1 – Схема электроснабжения установки ЭЦН:
КЛ1, КЛ2 – кабельные линии; Т – силовой трансформатор;
ПЧ- преобразователь частоты; ПЭД – погружной электродвигатель

В состав двухзвенного частотного преобразователя входят: выпрямитель (В); инвертор (И). А также не показанные на рисунке фильтр звена постоянного тока, соединяющего выпрямитель и инвертор, сетевой и моторный фильтры, система управления.

Выпрямитель может быть неуправляемым, управляемым или активным. Звено постоянного тока ЧРП состоит из неуправляемых пассивных элементов, в состав которых входят индуктивности, конденсаторы и сопротивления. В совокупности они образуют фильтр низких частот, обеспечивающий сглаживание пульсаций постоянного тока или напряжения на выходе выпрямителя. Выходной блок ПЧ – инвертор может работать в режиме источника тока или напряжения. В режиме источника напряжения инвертор регулирует форму и амплитуду выходного напряжения, а форма переменного тока определяется характеристиками подключенной нагрузки. В режиме источника тока инвертор регулирует ток, а форма выходного напряжения обычно определяется подключенной нагрузкой. Для питания асинхронных двигателей, к которым относится ПЭД, обычно используются инверторы напряжения, в состав звена постоянного тока которых входит блок конденсаторов, являющийся источником напряжения для инвертора.

Широкое применение частотно-регулируемых приводов ПЭД в составе установок ЭЦН приводит к существенному повышению уровня гармонических составляющих тока и напряжения в сетях электропитания, что приводит к дополнительным потерям энергии в сетях, вызывает сбои в работе электрических устройств, получающих питание от этих сетей [3]. Снижение уровня гармонических искажений в сетях электропитания установок ЭЦН с ЧРП достигается двумя основными способами: применением во входном звене многопульсной системы выпрямителя или установкой фильтров сетевых гармоник – фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). По данным эксплуатации [3] традиционные средства компенсации высших гармоник тока и напряжения на базе пассивных ФКУ и сглаживающих реакторов имеют ряд существенных недостатков, делающих их применение в сетях нефтепромыслов нецелесообразным. Пассивные ФКУ способны компенсировать ограниченное число гармоник, кроме того их установка, как и использование сглаживающих реакторов, может обусловить возникновение резонансных явлений на различных гармонических частотах [4].

Уровень гармоник, выдаваемый преобразователем частоты в сторону питающей сети, не зависит от типа формирования выходного сигнала инвертором в сторону ПЭД и определяется типом выпрямителя на входе ПЧ.

Одной из важных характеристик выпрямителей является их пульсность [5], определяющаяся числом повторяющихся пульсаций выходного тока и напряжения на периоде напряжения питающей сети. Пульсность, в свою очередь, определяется коэффициентом тактности (для мостовых схем равным 2) и фазности, которая определяется числом фаз вторичной обмотки трансформатора.

Предусматривается возможность выбора между стандартным 6-, 12-, 18- и 24-х пульсной схемой выпрямителя. В стандартной комплектации производители и поставщики ПЧ для установок УЭЦН обычно предлагают 6-пульсный выпрямитель.

В лабораторных условиях были сняты кривые изменения токов и напряжений на входе и выходе преобразователя частоты ATV71HU55M3 асинхронного привода номинальной мощностью 5,5 кВт. Регистрация кривых токов и напряжений осуществлялась прибором С.А 8335 (Qualistar+), который является трехфазным графическим анализатором параметров электросети измерительной категории IV в соответствии со стандартом (IEC 61010-1). На рисунке 2 представлены кривые токов на входе и выходе ПЧ соответственно. А на рисунке 3 представлены диаграммы спектра гармоник токов и напряжений на входе и выходе ПЧ, спектр напряжения обозначен черным цветом, спектр токов выделен серым цветом.

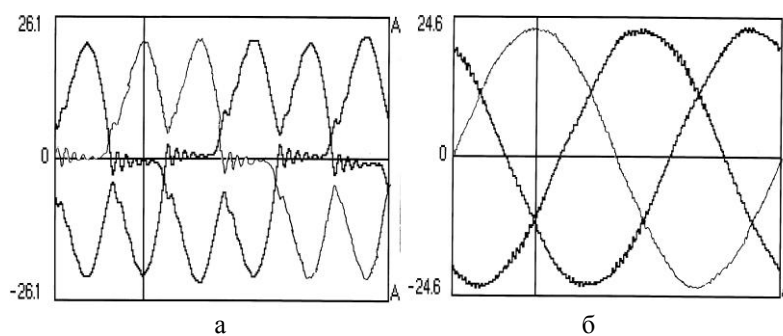


Рисунок 2 – Графики токов: а - на входе ПЧ; б - на выходе ПЧ

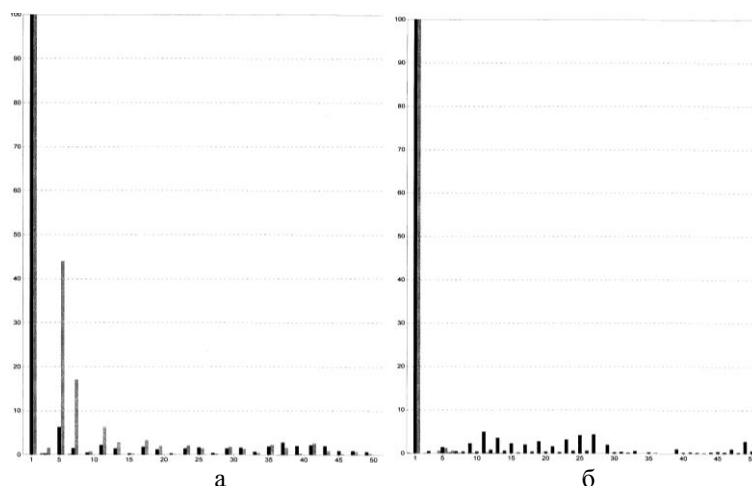


Рисунок 3 – Спектр гармоник тока и напряжения: а - на входе ПЧ; б - на выходе ПЧ

Силовая схема исследуемого привода оснащена сетевым и моторным фильтрами – дросселями. Как видно из результатов эксперимента высшие гармонические составляющие напряжений на входе и выходе ПЧ не выходят за пределы норм качества электроэнергии, установленных стандартом ГОСТ 32144-2013. В тоже время в сети на входе ПЧ зафиксированы большие значения высших гармонических составляющих тока. В таблице 1 приведены значения составляющих гармоник фазных токов на входе ПЧ для одного из опытов.

Таблица 1 – Процентное соотношение высших гармонических составляющих токов по фазам на входе ПЧ

Гармоника	$A_{1h}, \%$	$A_{2h}, \%$	$A_{3h}, \%$	$A_{cp,h}, \%$	Ток, А
1	100	100	100	100	12,83
5	44	39,6	42,9	42,1	5,38
7	17,1	16,0	17,1	16,7	2,14
11	6,3	5,2	6,2	5,9	0,75
13	2,8	3,1	3,1	3	0,38
17	3,3	2,4	3,0	2,9	0,37
19	2,0	2,2	2,2	2,1	0,26

Экспериментальные данные, полученные в экспериментальных условиях, хорошо согласуются с выводами, полученными для установки ЭЦН с 6-пульсным выпрямителем ПЧ в производственных условиях [3].

На основании экспериментальных и производственных данных можно заключить, что основные дополнительные потери в электрооборудовании установок ЭЦН с частотно-регулируемым приводом имеют место на участке сети до преобразователя частоты.

Для типовой схемы электроснабжения, представленной на рисунке 1, установки ЭЦН с двигателем ЭД 28-117 Т1Р, трансформатором ТМП- 63/856 и кабельной линией АВВГ сечением $3 \times 16 \text{ мм}^2$ и длиной 0,3 км были выполнены расчеты основ-

ных и дополнительных потерь, обусловленных несинусоидальностью тока на участке сети, питающей ПЧ и включающем кабельную линию и трансформатор. Дополнительные потери от несинусоидальности токов определялись по методике, изложенной в монографиях [6,7]. Значение общих основных потерь энергии для рассматриваемого участка сети составило 61525 кВт.ч/год, значение дополнительных потерь, обусловленных несинусоидальностью токов на этом же участке – 5649 кВт.ч/год, то есть 9,3% от основных потерь. Эти результаты подтверждают выводы других исследований, согласно которым дополнительные потери электроэнергии от несинусоидальности токов и напряжений могут достигать 15 % от значения основных потерь, что необходимо учитывать при выборе электрооборудования установок УЭЦН, повышая номиналы элементов сетей, а также ограничивая нелинейную нагрузку. Ограничение мощности нелинейной нагрузки до уровня 15-20% от номинальной мощности трансформатора нашло применение на нефтепромыслах, хотя его реализация не всегда технически осуществима [3].

Надо отметить, что отечественным стандартом ГОСТ 32144-2013, нормирующим показатели качества электроэнергии, установлены требования к несинусоидальности напряжений, но не токов, что предусмотрено в международном стандарте IEEE 519 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.

Наряду с 6-пульсными выпрямителями на месторождениях находят применение 12-пульсная мостовая схема, состоящая из двух 6-пульсных инверторов с фазовым сдвигом питающего напряжения на 30° . Форма кривой входного тока для ПЧ с 12-пульсным выпрямителем показана на рисунке 6 [3]. Как правило, 12-пульсный выпрямитель снижает уровень общих гармонических искажений входных токов до величины в 8%, в то время, как для 6-пульсной схемы этот показатель может превышать и 40% (см. рисунок 4).

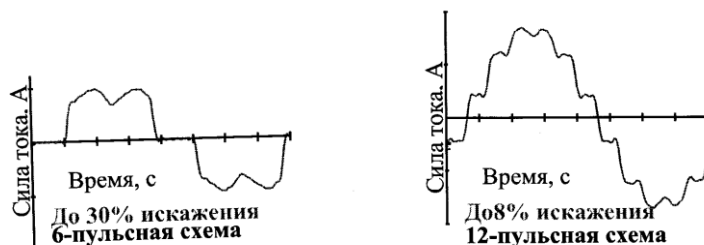


Рисунок 6 – Снижение гармонических составляющих входного тока ПЧ с увеличением пульсности схемы

Дальнейшее увеличение пульсности схемы еще более снижает уровень гармоник тока в питающей сети. Для ПЭД мощностью 125 кВт и более при его высокой загрузке экономически оправдано может оказаться применение 24-пульсных преобразователей.

Выводы

1. При оценке электромагнитной совместимости систем электроснабжения нефтепромыслов необходимо учитывать не только нормируемые гармонические составляющие напряжения, но и гармонические составляющие токов, участков сетей, питающих регулируемые электроприводы, хотя гармонические составляющие токов и не нормируются ГОСТ 32144-2013.

2. Высшие гармонические составляющие токов в сетях нефтепромыслов приводят к существенному (около 15%) увеличению потерь мощности и энергии в пи-

тающих сетях, что требует увеличения их пропускной способности на стадии проектирования.

3. Наиболее эффективные решения задачи электромагнитной совместимости, часто достигается на стадии выбора типа преобразователей частоты регулируемых электроприводов. Применение сетевых фильтров не всегда обеспечивает решение задачи, для мощных высоко нагруженных двигателей экономически оправдано может оказаться применение 24-пульсных преобразователей.

Библиографический список

1. Ершов М.С., Яризов А.Д. Электрооборудование и станции управления технологических установок механизированной добычи нефти. М.: Недра, 2008.
2. Ивановский В.Н. Анализ современного состояния и перспектив развития скважинных насосных установок для добычи нефти// Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2007, №6.
3. Черненко И.И., Булычаев Г.Н., Кислов Н.Н., Забабурин Д.В., Солодкий А.И. Применение систем частотного преобразователя с 24-пульсным конвертором на Ванкорском месторождении // Территория нефтегаз. 2011, №4.
4. Гамазин С.И., Кудрин Б.И., Цырук С.А. Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий, 2010. М.: Издательский дом МЭИ.
5. Розанов Ю.К., Рябчинский М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
6. Управление качеством электроэнергии/ И.И. Каргашев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шаменов и др. [под ред. Ю.В. Шарова]. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
7. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009.