

## О МЕТОДИКЕ ВЫБОРА ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

*Ю. Г. Качан, д.т.н.*

*Запорожская государственная инженерная академия  
пр. Ленина, 226, 69006, г. Запорожье, Украина*

*А. В. Николенко, к.т.н., В. В. Кузнецов*

*Национальная металлургическая академия Украины*

*пр. Гагарина, 4, 49600, г. Днепрпетровск, Украина*

*E-mail: wit\_jane2000@mail.ru*

В статье рассмотрена методика обоснования технически возможных мер по повышению технико-экономических показателей асинхронного двигателя при его работе в условиях некачественной электроэнергии. Приведены расчетные алгоритмы для оценки электромагнитной и тепловой составляющих, образующегося при этом экономического ущерба. Выполнена апробация предложенной методики на конкретном примере.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, показатели качества электроэнергии, электромагнитная и тепловая составляющие экономического ущерба.

**Введение.** Отрицательное влияние некачественной электроэнергии на эксплуатационные показатели электроустановок хорошо изучено [1, 2, 3]. Так известно, что при наличии искажений питающего напряжения особое внимание следует уделять системам электроприводов, поскольку это приводит к снижению их надежности и эффективности и, как следствие, к существенному снижению технико-экономических показателей многих производств. При снижении качества электроэнергии происходит увеличение потерь мощности в асинхронных двигателях (АД), что обуславливает их повышенный нагрев. А это, в свою очередь, способствует интенсивному старению изоляции и, в конечном итоге, ее пробую.

**Анализ предыдущих исследований.** Внезапный отказ электродвигателя, находящегося в технологической линии, может также привести к значительному экономическому ущербу. Кроме того, высшие гармоники и несимметричные режимы обуславливают недоиспользование средств компенсации реактивной мощности (батареи конденсаторов и синхронных компенсаторов), что приводит к снижению коэффициента мощности предприятия. Кроме того, даже при существующих тарифах, существенно увеличивается оплата электроэнергии, являющаяся доминирующей составляющей в общей сумме капитальных и эксплуатационных затрат большинства используемого на производстве электрооборудования [4].

Так в течение года электромашиный преобразователь малой и средней мощности потребляет объем электроэнергии, которая в 3-5 раз дороже самого двигателя. Вместе с тем, до 75% электроэнергии на производстве потребляется именно АД такой мощности (до 75 кВт) [5]. Поэтому снижение КПД двигателя вследствие того, что он питается некачественной электроэнергией даже на один процент, означает существенный экономический ущерб для любого предприятия.

В настоящее время показатели качества электроэнергии (ПКЭ) в сетях промышленных предпри-

ятий, такие как уровень напряжения, его частота, симметрия и синусоидальность нормируются ГОСТ-Том [6]. Несмотря на это, как показано в [7], отдельные ПКЭ, например, коэффициенты гармонических составляющих, во многих случаях существенно превышают предельно-допустимые величины (ПДВ).

**Цель работы.** Исходя из вышеизложенного у инженерно-технического персонала предприятий возникает необходимость использования средств по снижению отрицательного влияния некачественной электроэнергии на энергоэффективность производства. Возможными путями решения этой проблемы являются: применение «индивидуальных» LC-фильтров [8] для защиты особо ответственных электроприводов; применение «групповых» устройств для компенсации влияния некачественности питающего напряжения на уровне цеха, таких как силовые активные выпрямители, с возможной их интеграцией в существующие преобразователи для регулируемого электропривода; подавление искажений питающего напряжения в местах их возникновения, т.е. защита сети от первопричины. Допускается и отказ от принятия каких-либо мер, не считаясь с существенным уменьшением ресурса двигателя.

Каждый из указанных вариантов характеризуются конкретными стоимостью внедрения и ожидаемым экономическим эффектом. Тем не менее, несмотря на актуальность рассматриваемой проблемы, в Украине до сих пор нет единой методики принятия экономически обоснованных решений по уменьшению отрицательного воздействия некачественной электроэнергии на энергоэффективность производства.

**Материал и результаты исследования.** Решить указанную проблему предлагается с помощью вычислительных методов, реализуемых на модели, которая по текущим показателям качества электроэнергии, зависящим от характера и мощности подключаемых к сети электропотребителей, значениям технических параметров и стоимости рассматриваемой электромеханической системы, позволяет

спрогнозировать величину суммарного ущерба от эксплуатации последней в конкретных условиях. При этом вычисляются также капитальные и текущие затраты на реализацию всех технически возможных в данном случае мер защиты. Затем величина ущерба сопоставляется с затратами, что и позволяет определить экономически наиболее целесообразную из рассмотренных мер.

Препятствием на пути реализации такого алгоритма является сложность оценки электромагнитной (энергетической), тепловой и технологической составляющих указанного ущерба в условиях меняющихся ПКЭ. При этом известно, что последняя из них зависит не только от стоимости используемого на предприятии оборудования и вероятностных характеристик отказов АД, но и от многих других факторов [1].

В целом же технологический ущерб, связанный с уменьшением производительности и снижением качества выпускаемой продукции, полностью определяется спецификой производства и подлежит, при необходимости его учета, оценке по индивидуальным методикам. Учитывая же, что наиболее распространенные привода насосных, компрессорных и вентиляционных систем приводят обычно к незначительному технологическому ущербу, остановимся только на их рассмотрении.

Оценка же электромагнитной составляющей ущерба менее проблематична, поскольку она связана с расчетом стоимости дополнительно потребляемой двигателем электроэнергии. Но и в этом случае методики определения ущерба довольно противоречивы. Так в соответствии с наиболее распространенной из них [1] дополнительные мощности, потребляемые АД вследствие несимметрии питающего напряжения и несинусоидальности потребляемого тока, рассчитываются по следующим зависимостям:

$$\Delta P_{\text{нсим}} = 2,41 \cdot k_n^2 \cdot \Delta P_{\text{ном}} \cdot \varepsilon_2^2 ; \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{нсин}} = \Delta P_{\text{ном}} \cdot k_n^2 \sum_v \left( \frac{U_v^2}{v} \right)^2 (\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}), \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{ном}}$  – потери в электродвигателе при допустимых ПКЭ;  $k_n$  – кратность пускового тока;  $\varepsilon_2$  – коэффициент обратной последовательности;  $U_v$  – напряжение  $v$ -й гармонической составляющей.

Здесь не учитывается то, что причиной увеличения потерь при питании электродвигателя несимметричной системой напряжений является наличие в токах составляющих не только обратной, но и нулевой (при соединении обмоток в треугольник) последовательности, не образующей вращающего момента. В то же время токи этих последовательностей вызывают дополнительные нагрев обмоток и пульсации магнитного потока, которые приводят к потерям за счет перемагничивания стали магнитопроводов и вихревых токов в них. При этом считается, что при нормально допустимых значениях ПКЭ дополнительные потери равны нулю.

Известен и другой метод расчета энергетических параметров асинхронного электродвигателя при его работе в условиях некачественной электроэнергии [2, 8, 9], основой которого является модель АД, предполагающая использование произвольной формы питающее напряжение. В качестве примера на рис.1 приведено сопоставление результатов расчета электромагнитного ущерба от работы электродвигателя мощностью 45 кВт (асинхронный короткозамкнутый двигатель типа АИР 250М8, номинальное напряжение – 380 В, привод центробежного насоса), выполненного по формулам (1), (2) и на основе указанной модели.

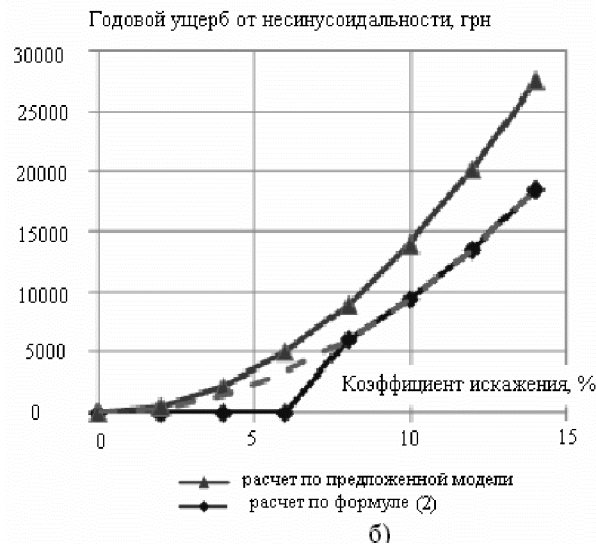
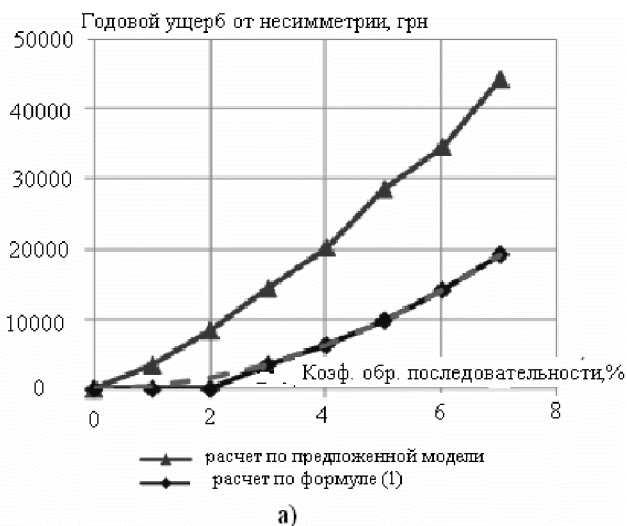


Рисунок 1 – Сопоставление электромагнитной составляющей ущерба, обусловленного несимметрией питающего напряжения (а) и его несинусоидальностью (б) для двигателя 45 кВт

Анализ представленных зависимостей свидетельствует о том, что традиционные формулы существенно занижают рассматриваемый ущерб. Скорее всего, это вызвано тем, что особенности двигателей длительного и повторно– кратковременного режимов работы, общепромышленного и кранометаллургического исполнения учитываются в рассмот-

ренных режимах единственным параметром – кратностью пускового тока –  $k_n$ .

Другой важной составляющей экономического ущерба при работе электродвигателя в условиях некачественной электроэнергии является сокращение срока его службы, связанное с ухудшением состояния изоляции обмоток, которое, в свою очередь, определяется температурным режимом АД. Прогноз температурного состояния последнего и превышение допустимой температуры изоляции статора предлагается выполнить на основании суммарных мгновенных «греющих» потерь, образующихся в ходе эксплуатации двигателя.

Суть указанного подхода заключается в комбинированном использовании двух моделей: модели асинхронного двигателя, позволяющей рассчитать энергетические показатели АД в текущий момент времени при заданной форме питающего напряжения [2], и его динамической тепловой модели [10]. Основой последней является зависимость, позволяющая прогнозировать срок службы изоляции при периодически изменяющемся превышении температуры изоляции обмоток:

$$T = \Delta t \cdot \sum_{k=1}^M e^{-\beta \cdot \Delta \tau_k} \quad (3)$$

где,  $\beta = \frac{\ln 2}{\Delta \theta}$ ;  $M = \frac{T_n}{\Delta t}$ , где  $T$  и  $T_n$  – сроки службы изоляции при заданной и допустимой температурах, соответственно;  $\Delta \tau_k$  – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды в  $k$ -м интервале времени  $\Delta t$ ;  $\Delta \theta$  – коэффициент, зависящий от класса изоляции. Так, например, для изоляции класса F –  $\Delta \theta = 10$  °C, для H –  $\Delta \theta = 12$  °C [11].

Очевидно, при отсутствии превышения допустимой температуры АД ( $\Delta \tau_k = 0$ ) на всех временных участках  $K = \overline{1, M}$  значение суммы в формуле (3) будет равно  $M$ , а  $\Delta t \cdot M = T_n$ , т.е. срок службы соответствует номинальному. Представленная методика апробирована экспериментально [12].

В результате получена совокупность программно-реализованных математических моделей, которую можно рассматривать как технико-экономическую модель двигателя, предназначенную для принятия решений о выборе средств защиты последнего от влияния некачественной электроэнергии.

Расчет технико-экономических показателей, связанных с применением указанных выше средств защиты АД, рассмотрен на примере упомянутого электродвигателя мощностью 45 кВт. Последний работает в длительном режиме (S1), годовой фонд его рабочего времени – 7200 часов, тариф на электроэнергию – 0,8232 грн/кВт\*час, стоимость АД – 14,5 тыс. грн. Двигатель эксплуатируется в условиях некачественной электроэнергии: коэффициент искажения синусоидальности – 10 % (нормально допустимое значение для сетей 0,4 кВ – 8 %), коэффициент обратной последовательности – 3 % (нор-

мально допустимое значение – 2 %). Результаты расчета представлены в табл. 1.

**Таблица 1 – Пример сопоставления экономических показателей вариантов технических решений**

Показатель	Ед. изм.	Вариант 1 (отказ)	Вариант 2 (активный фильтр)	Вариант 3 (фильтро-компенсирующее устройство (ФКУ) + симметрирующее устройство)	Вариант 4 (индивидуальный LC-фильтр)
Коэффициент искажения синусоидальности	%	10,0	0,1	4,0	1,5
Коэффициент обратной последовательности	%	3,0	0,1	0,1	3,0
Годовой ущерб, причиненный несинусоидальностью	тыс. грн.	14,0	0,3	2,1	3,3
Годовой ущерб, причиненный несимметрией	тыс. грн.	14,3	0,3	0,3	14,3
Ущерб от сокращения срока службы электродвигателя	тыс. грн.	7,25	0,145	0,725	1,45
ИТОГО, суммарный ущерб	тыс. грн.	35,6	0,8	3,2	19,1
Стоимость технического решения	тыс. грн.	0	48,6	12,6	8,2
Срок окупаемости технического решения	лет	0	1,4	0,4	0,5

Анализ представленных данных указывает на значительную величину годового ущерба, вызванного эксплуатацией АД без применения средств защиты (вариант 1). Она практически втрое превышает стоимость самого двигателя. Последняя же соизмерима со стоимостью годовых ущербов по каждой составляющей в отдельности. Использование активных фильтров (вариант 2), цена которых сопоставима со стоимостью преобразователей частоты, является наиболее затратным, хотя последние имеют дополнительные существенные преимущества по сравнению с фильтрами. Несмотря на это срок окупаемости первого варианта является приемлемым.

Групповые методы коррекции ПКЭ (вариант 3), хотя и имеют большую суммарную стоимость ФКУ и симметрирующих устройств по сравнению со средствами индивидуальной защиты в виде LC – фильтров (вариант 4), обеспечивают наименьший срок окупаемости. В данном случае они являются экономически предпочтительными, хотя при других условиях эксплуатации рассматриваемого двигателя или для других типов и мощностей АД предпочтительными могут оказаться и другие варианты.

**Выводы.** Предложенная методика выбора средств защиты электродвигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии, представ-

ляющая собой вычислительный алгоритм, реализованный на основе электромагнитной и тепловой модели АД, позволяет определить экономически целесообразный вариант их технически реализуемых решений. Она может использоваться как инструмент службы энергоменеджмента промышленного предприятия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 340 с.
2. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2009. – Вип. 3/2009(56). – С. 56–58.
3. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. О технико-экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 80. – С.58–62.
4. United States Industrial Motor Systems Market Opportunities Assessment, report by Xenergy for Oak Ridge National Laboratory and the U.S. Department of Energy, 1998. – Режим доступа: [www.oit.doe.gov/bestpractices/pdfs/mtrmkt.pdf](http://www.oit.doe.gov/bestpractices/pdfs/mtrmkt.pdf).
5. Energy distribution annual report 2009, U.S. Department of Energy data storage and statistic service. – Режим доступа: [www.doe.gov/stat/enreport](http://www.doe.gov/stat/enreport) 2009.
6. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения: ГОСТ 13109-97. – ИПК. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 15 с.
7. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. О количественной оценке качества электрической энергии в сетях промышленных предприятий // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 84. – С.9–16.
8. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. О влиянии гармонического состава питающего напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 83. – С.113–118.
9. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Оценка адекватности математической модели асинхронного двигателя в условиях некачественного питания // Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – Вип. 3. – С.67–69.
10. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Тепловая составляющая экономического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 85. – С.113–118.
11. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В. Влияние качества электрической энергии на надежность асинхронных двигателей // Промислова енергетика та електротехніка. – Київ, 2004. – № 1. – С.15–21.
12. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Идентификация параметров и проверка адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2011. Вип. 1/2011(66). – С.56–59.

## ПРО МЕТОДИКУ ВИБОРУ ЕКОНОМІЧНО ДОЦІЛЬНИХ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

*Ю. Г. Качан, д.т.н.*

*Запорізька державна інженерна академія*

*пр. Леніна 226, 69006 м. Запоріжжя, Україна*

*А. В. Ніколенко, к.т.н., В. В. Кузнецов*

*Національна металургійна академія України*

*пр. Гагаріна, 4, 49600, м. Дніпропетровськ, Україна.*

*E-mail: wit\_jane2000@mail.ru*

У статті розглянута методика обґрунтування техніко-можливих рішень щодо підвищення техніко-економічних показників асинхронного двигуна при його роботі в умовах неякісної електроенергії. Наведені розрахункові алгоритми для оцінки електромагнітної і теплової складових економічного збитку, що утворюється при цьому. Виконана апробація запропонованої методики на конкретному прикладі.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, показники якості електроенергії, електромагнітна та тепла складові економічного збитку.

## ABOUT METHODOLOGY OF CHOOSING ECONOMICALLY EXPEDIENTAL FACILITIES OF DEFENCE ASYNCHRONOUS ENGINES WORKING IN THE CONDITIONS OF OFF-GRADE ELECTRIC POWER

*U. Kachan, Doc. Sc. (Tech.)*

*Zaporizhia State Engineering Academy*

*Lenina Ave. 226, 69006 Zaporizhia, Ukraine*

*A. Nikolenko, Cand. of Sc. (Tech.), V. Kuznetsov*

*National metallurgical academy of Ukraine*

*Gagarina avenue, 4, 49600, Dniepropetrovsk, Ukraine.*

*E-mail: wit\_jane2000@mail.ru*

The article is considered methodology of ground technical decisions on the increase of technical-economically indexes of asynchronous engine during his work in the conditions of off-grade electric power. Calculation algorithms are brought for an estimation of electromagnetic and thermal constituents of economic damage. Approbation is executed to the offered methodology on a concrete example.

**Key words:** asynchronous engine, indicators of electric power quality, electromagnetic and thermal constituents of economic damage.