

**Ю.Г. Качан, д-р техн. наук**

(Украина, г. Запорожье, Запорожская государственная инженерная академия)

**А.В. Николенко, канд. техн. наук, В.В. Кузнецов**

(Украина г. Днепропетровск, Национальная металлургическая академия Украины)

## ОЦЕНКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Низкое качество потребляемой электроэнергии является причиной значительного экономического ущерба, который несут в настоящее время отечественные предприятия. Доля затрат на электроэнергию является доминирующей составляющей их суммарных денежных средств, необходимых на эксплуатацию электрооборудования. По разным оценкам, она составляет 75-80% [1,2]. Поэтому даже незначительное увеличение потерь, связанных со снижениями показателей качества электроэнергии (ПКЭ) влечет существенное увеличение годовых затрат на содержание электроприводов. Таким образом, предприятиям необходимо предпринимать значительные усилия по предупреждению убытков, обусловленных низким качеством электроэнергии в их внутривзаводских сетях.

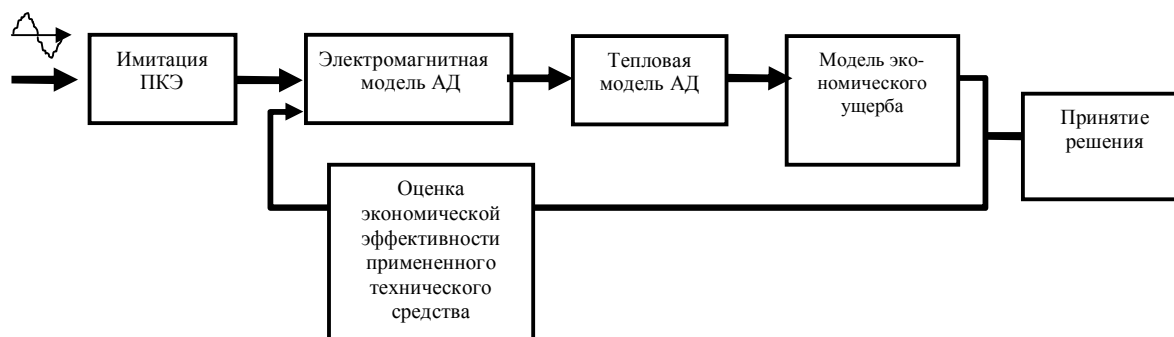
Вместе с тем, внедрение соответствующих технических средств должно быть экономически целесообразным, учитывать специфику производства и задействованного оборудования. К сожалению, в настоящее время не существует достаточно корректной единой методики экономического обоснования мероприятий по борьбе с отрицательными последствиями эксплуатации электродвигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии [3]. Это связано, во-первых, с невозможностью точного прогноза ущерба, причиненного именно некачественной электроэнергией.

Доказано [4], что применение известных формул по определению ущерба, причиненного несимметрией и несинусоидальностью питающего напряжения, дает, как правило, его приемлемую оценку, только тогда, когда ПКЭ незначительно превышают допустимые значения. Кроме того, задача усложняется тем, что в этом случае необходимо учитывать и изменения всех параметров электромеханической системы, вызванные применением того или иного технического средства.

Таким образом необходимо разработать новый универсальный инструментарий, позволяющий персоналу предприятия оперативно оценивать экономические показатели асинхронных двигателей (АД), работающих в условиях некачественной электроэнергии и выбирать приемлемые средства их защиты с учетом вероятностных характеристик ПКЭ в сети и специфики конкретного технического и технологического оборудования.

В настоящее время разработаны и экспериментально проверены все составляющие комплексной технико-экономической модели электропривода, работающего в условиях низкого качества электроэнергии [5-8]. Укрупненная структура такой модели показана на рис. 1. Она состоит из следующих основных блоков:

- § имитация показателей качества электроэнергии в цеховой сети ;
- § модель асинхронного электродвигателя, позволяющая определять его механические и энергетические показатели в условиях некачественной электроэнергии [5-7];
- § тепловая модель АД, учитывающая нестационарность ПКЭ [8];
- § модель экономического ущерба, связанного с эксплуатацией АД в условиях некачественной электроэнергии;
- § блок оценки эффективности применения технических средств (пассивных и активных фильтров, фильтро-компенсирующих устройств и др.).



**Рис. 1. Комплексная технико-экономическая модель АД**

Комплексная модель позволяет осуществить прогноз экономических показателей эксплуатации АД с учетом предложенных средств защиты. Сопоставление полученных результатов дает возможность выбора наиболее экономически целесообразных мер по борьбе с отрицательными последствиями эксплуатации электродвигателей в условиях некачественной электроэнергии. Алгоритм такого выбора соответствует последовательности расчетов, представленных в таблице 1. Используемые обозначения здесь соответствуют принятым в упомянутых выше работах.

В таблице 2 проиллюстрированы результаты применения предложенного алгоритма при эксплуатации однотипных двигателей (мощность 22 кВт, номинальная скорость 1000 об/мин, общепромышленное исполнение) в условиях различных предприятий. Очевидно, что при эксплуатации в условиях практически идеального питающего напряжения, не требуется применения никаких технических средств. При показателях качества электроэнергии, зарегистрированных в сварочном цеху ОАО "Запорожский трансформаторный завод", дополнительный годовой ущерб, обусловленный ростом потерь, составляет около 5100 грн. В этом случае целесообразно применение "фильтра-пробки" (заградительного фильтра), состоящего из параллельно включенной индуктивности и емкости с параметрами, приведенными в таблице 2.

Таблица 1.

**Последовательность расчетов в алгоритме выбора средств защиты АД,  
работающих в условиях некачественной электроэнергии**

№ этапа	Вычислительный субблок	Выходные параметры		
		Обозначение	Расчетная формула	Описание
1	2	3	4	5
1.	Имитация ПКЭ	$K_U$	$K_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2} \frac{100}{U_{ном}}$	Коэффициент искажения синусоидальности
		$K_{U(n)}$	$K_{U(n)} = \frac{U_n}{U_{ном}} \cdot 100$	Коэффициент отдельных гармонических составляющих
		$\epsilon_2$	$\epsilon_2 = \frac{A_2}{A_1}$	Коэффициент обратной последовательности
		$\epsilon_0$	$\epsilon_0 = \frac{A_2}{A_1}$	Коэффициент нулевой последовательности
2.	Электромагнитная модель АД	Истат.эquiv	$I_{Aeq} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N (i_{An})^2}$	Эквивалентное значение тока статора (рассчитывается для каждой фазы)
		Ирот.эquiv	то же для тока ротора	То же для ротора
		$I_{M_n}$	$I_{M_n} = I_{cmam_n} + I_{pom_n}$	Ток намагничивания
		$\Delta P_{m1}$	$\Delta P_{m1} = (I_{Aeq}^2 + I_{Beq}^2 + I_{Ceq}^2) R_{cmam}$	Потери в меди статора
		$\Delta P_{m2}$	то же для ротора	То же для ротора
		$\Delta P_C$	$\Delta P_C = 3 \cdot I_M^2 \cdot R_C$	Потери в стали
		$\Delta P_\Sigma$	$\Delta P_\Sigma = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_C$	Потери в стали
		$P_1$	$P_1 = U_A I_A + U_B I_B + U_C I_C$	Потребляемая активная мощность
		$Q_1$	$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2}$	Потребляемая реактивная мощность
		$S_1$	$S_1 = U_{Aeq} I_{Aeq} + U_{Beq} I_{Beq} + \dots + U_{Ceq} I_{Ceq}$	Потребляемая полная мощность
		$P_2$	$P_2 = \omega_{ср} \cdot M_{ср}$	Мощность на валу
		$\eta$	$\eta = \frac{P_2}{P_1}$	КПД
$\cos\phi$	$\cos\phi = \frac{P_1}{S_1}$	Коэффициент мощности (с учетом искажений)		

		$THD_I$	$THD_I = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^N (I_{cpn})^2}$	Коэффициент гармонических искажений тока
		$THD_T$	то же для момента	То же для момента
3.	Тепловая модель АД	$\tau(t)$	$\tau_k = \tau_{(k-1)} + 1/C (\Delta P - A\tau_{(k-1)})$	Зависимость превышения температуры от времени
		$\tau_{cp}$	$\tau_{cp} = \frac{1}{M} \sum_k \tau_k$	Средняя температура изоляции
		$\alpha'$	$\alpha' = \frac{1}{T_{Ц}} \sum_n (\Delta\tau_n \cdot t_n)$	Эквивалентная продолжительность работы АД с перегревом
		T	$T = T_H \cdot e^{-\beta \cdot \alpha'}$	Срок службы изоляции
4.	Модель экономического ущерба	$E_{сумм}$	$E_{сумм} = \Delta P_{\Sigma доп} \cdot C \cdot T_{работы}$	Дополнительный ущерб
		$E_{год}$	$E_{год} = E_{сумм1} - E_{сумм2} - e \cdot K$	Годовой ущерб
5.	Определение параметров выбранного технического средства защиты	C1	задается 1 мФ	Емкость в заградительном фильтре
		L1	$L_1 = \frac{1}{\omega_r^2 C}$	Индуктивность заградительного фильтра
		C2	находится итеративно	Емкость в части "звезды" комбинированного фильтра
		$E_{ТС}$	вводится вручную	Стоимость технических средств
6.	Пересмотр вариантов технических средств	Повторение шагов 2-4 с учетом технических средств		Оценка уменьшения ущерба, оценка годового эффекта
7.	Принятие	Есумм < Сдвиг? Ти ~ Тном? => эксплуатация без ТС Есумм > Егод => внедрение ТС		Сопоставление ущерба, стоимости технических средств и годового эффекта

Таблица 2.

## Иллюстрация применения предложенного алгоритма

Предприятия		Колесопрокатный цех ОАО "Интерпайп НТЗ"	Сварочный цех ОАО "ЗТЗ"	Цех механической обработки "Завод монтажных изделий"
Расчетные параметры				
Значения ПКЭ	$\varepsilon_2, \%$	0	2	4
	$k_{НС}, \%$	0,1	3	5
Доля рабочего цикла с заданными ПКЭ	%	100	48	77
Энергетические и тепловые показатели АД	$\Delta P, \text{кВт}$	2,44	3,29	4,19
	$\cos \phi, \text{о.е.}$	0,87	0,84	0,79
	$\eta, \%$	90	87	84
	$\tau_{cp}, \text{°C}$	58	92	113
	$\tau_{max}, \text{°C}$	61	114	132
Дополнительный годовой ущерб	Егод, грн	42,00	5097,93	10560,00
Предложенные технические средства защиты	-	эксплуатация в штатном режиме	Заградительный фильтр; L=0,025 Гн, C=1 мФ	Комбинированный фильтр; L1=0,025 Гн, C1=100 мкФ, C2=0,55мФ

В том же случае, когда ПКЭ приближаются к предельно допустимым нормам для сетей 0,4 кВ, дополнительный годовой ущерб составляет 10560 грн. При этом экономически обоснована необходимость применения комбинированного фильтра, представляющего собой последовательное включение заградительного фильтра и соединенных в звезду емкостей. Такие фильтры обеспечивают одновременно резонанс

нанс токов, "запирая" наиболее весомую в спектре гармоническую составляющую, и резонанс напряжений на другой частоте, образуя для нее контур короткого замыкания (преимущественно 100 Гц).

Таким образом выбор экономически целесообразного средства защиты АД, работающего в условиях некачественной электроэнергии может быть выполнен с помощью предложенного алгоритма, построенного на базе комплексной техники – экономической модели этого двигателя. Данный алгоритм может использоваться как инструмент службы энергоменеджмента любого промышленного предприятия.

#### Список литературы

1. 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).
2. Energy distribution annual report 2009, U.S. Department of Energy data storage and statistic service. – Режим доступа: [www.doe.gov/stat/enreport\\_2009](http://www.doe.gov/stat/enreport_2009).
3. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / Жежеленко И.В. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 340 с.
4. Качан, Ю.Г. О методике выбора экономически целесообразных средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии [Текст] / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов – Електромеханічні і енергозберігаючі системи.// Щоквартальний науково – виробничий журнал. – Кременчук: КДПУ, 2011. – Випуск 4/2011(16). – С.56-59.
5. Качан, Ю.Г. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественного питания [Текст] / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов //Гірнична електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник.-2008.-Вип. 81. – с. 97-99.
6. Качан, Ю.Г. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания [Текст] / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов – Кременчук, 2009. – С. 56-58. – (Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: № 3).
7. Качан, Ю.Г. Оценка адекватности математической модели асинхронного двигателя в условиях некачественного питания [Текст] / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов – Харків: НТУ "ХП",2009. – С.67-69. – (Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал.: №3).
8. Качан, Ю.Г. Тепловая составляющая экономического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии [Текст] / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов – Дніпропетровськ, 2010. – С.113 – 118. – (Гірн. електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб.: Вип. 85)

*Рекомендовано до друку проф. Гріцай В.П.*