

## УДК 621.31

Н. М. ТРИПУТЕНЬ – к. т. н., доцент, НТУ «Днепровская политехника»,  
nikolay.triputen@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-4523-927X

А. В. НИКОЛЕНКО, к. т. н., доцент, Национальная металлургическая академия Украины,  
nikolenkoETEP@i.ua, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3808-4249

Е. К. ВОСКОБОЙНИК – асистент, НТУ «Днепровская политехника»,  
EvgeniiVoskoboynik@i.ua, ORCID: http:// orcid.org/0000-0002-7653-2607

В. В. КУЗНЕЦОВ – к. т. н., доцент, Национальная металлургическая академия Украины,  
wit1975@i.ua, ORCID: http://orcid.org/0000-0002-8169-4598

Е. В. КУЗНЕЦОВА – ст. преп., Национальная металлургическая академия Украины,  
wit\_jane2000@i.ua, ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2224-8747

М. Н. ТРИПУТЕНЬ – студент, Днепропетровский национальный университет имени Олеся  
Гончара, maks.triputen@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-6915-8162

## ПРЕДИКАТНАЯ МОДЕЛЬ В ЗАДАЧЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

### Введение

Основными путями снижения отрицательного влияния некачественной электроэнергии на работу электродвигателя в производственных условиях, а, значит, и на эффективность производства в целом являются: применение «индивидуальных» LC-фильтров для защиты особо ответственных электроприводов; применение «групповых» устройств компенсации влияния некачественного питающего напряжения на уровне цеха; подавление искажений питающего напряжения в местах их возникновения. Допускается также отказ от принятия каких-либо мер, не считаясь с существенным уменьшением ресурса двигателя. Каждый из указанных вариантов характеризуется некоторой стоимостью внедрения и ожидаемым экономическим эффектом.

Известная методика выбора средств защиты асинхронного электродвигателя (АД) [1], работающего в условиях некачественной электроэнергии основана на его энергоэкономической модели. Данная методика реализует вычислительные алгоритмы с использованием стохастических моделей линейных напряжений в системе электропитания цеха, нелинейных электромаг-

нитной и тепловой модели АД, экономических моделей, получение которых предполагает проведение объёмных, длительных по времени промышленных экспериментов, а также привлечения к их обработке специалистов из различных областей знаний. Отдельной и не менее сложной задачей является выполнение вычислительных оптимизационных расчётов для выбора наилучшего способа защиты АД. Указанные особенности применения энергоэкономической модели являются сдерживающими факторами её широкого внедрения.

### Цель

Цель данной статьи - показать возможность использования методики выбора средств защиты АД непосредственно в производственных условиях на основе применения персонального компьютера с программным комплексом SCADA системы Zenon; предикатных моделей и алгоритма распознавания, ориентированного на реляционную модель данных.

### Методы и результаты исследований

Принятие решения об экономической целесообразности выбора конкретного тех-

нического варианта защиты (или отказ от него) зависит от значений нескольких величин (входных технических и экономических): коэффициента искажения синусоидальности  $K_U$ , коэффициентов отдельных гармонических составляющих  $K_{U(m)}$  ( $m = 7$ ), коэффициента обратной последовательности  $K_{2U}$ , коэффициента нулевой последовательности  $K_{20}$ , стоимостей технических средств защиты  $C_j$  ( $i = \overline{1, r}$ , где  $r$  – количество различных типов устройств защиты). При этом коэффициенты  $K_U$ ,  $K_{U(m)}$ ,  $K_{2U}$  и  $K_{20}$  зависят от закономерностей изменения линейных напряжений в электрической сети и режимов работы асинхронного двигателя.

Определить характеристики линейных напряжений и асинхронных двигателей в реальном масштабе времени можно на основе программного комплекса SCADA системы Zenon [2], размещённого на персональном компьютере (рис. 1). Датчики контроля текущих значений линейных напряжений и параметров двигателей подключены к контроллеру VIPA-314-6CG23. Связь между программируемым логическим контроллером и персональным компьютером с программным комплексом реализуется при помощи интерфейса Ethernet. Текущие значения линейных напряжений и параметров двигателей отображаются на экране персонального компьютера и сохраняются для дальнейшей обработки. Причём технические и программные средства комплекса позволяют одновременно проводить исследования всех двигателей, работающих в цеху.

Технические и экономические величины имеют некоторые отклонения, обусловленные либо точностью измерения (для технических величин), либо экономической ситуацией (для стоимостей) и изменяются в некотором диапазоне. Это позволяет представить энергоэкономическую модель АД в

виде суммы предикатов (дискретном виде) [3]:

$$Z_{эм}[\bar{X}, \bar{C}] = V_{p=1}^q V_l^{\lambda_p} Z_{p,l}[\bar{X}, \bar{C}], \quad (1)$$

где

$$Z_{эм}[\bar{X}, \bar{C}] = 2^{-n} \prod_{j=1}^n \{1 + \text{sgn}[(X_j - X_{j\min}^{pl})(X_{j\max}^{pl} - X_j)]\} + 2^{-r} \prod_{j=1}^r \{1 + \text{sgn}[(C_j - C_{j\min}^{pl})(C_{j\max}^{pl} - C_j)]\},$$

где  $V$  – логическая операция дизъюнкции.

Здесь:  $q$  – количество классов (диапазонов) суммарного ущерба от внедрения средства защиты или их комбинаций;  $\lambda_p$  – количество предикатов, определяющих  $p$  – диапазон;  $n$  и  $r$  – количество технических и стоимостных величин соответственно;  $X_{j\min}^{pl}$ ,  $X_{j\max}^{pl}$ ,  $C_{j\min}^{pl}$ ,  $C_{j\max}^{pl}$  – константы модели.

Формирование параметров предикатов и объединение их в классы может быть осуществлено в ходе обучения модели по критерию минимума экономических потерь от использования технических средств защиты АД (или их отсутствия):

$$\mathcal{E}_{пот} \rightarrow \min, \quad (2)$$

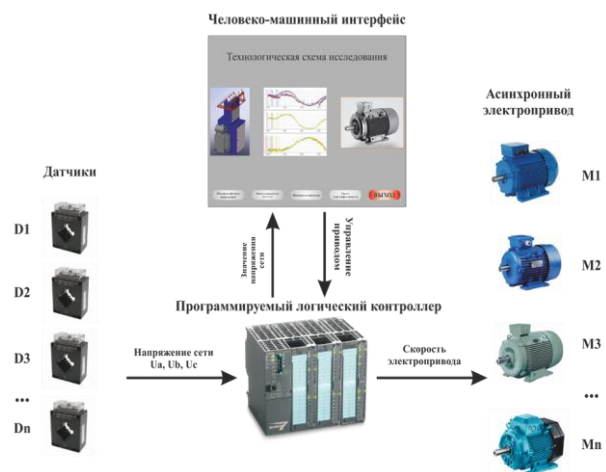


Рис. 1 – Структурная схема системы для исследования электрической сети и асинхронных двигателей

Тогда в процессе обучения распознаванию по элементам выборочной совокупности входных величин необходимо, задавая различные критерии управления  $\mathcal{E}_{nom}$  в интервале  $\mathcal{E}_{nom.max} \div \mathcal{E}_{nom.min}$ , разбивать факторное пространство на два класса:  $M_1$ , если  $\mathcal{E}_S < \mathcal{E}_{nom}$  и  $M_2$ , если  $\mathcal{E}_S > \mathcal{E}_{nom}$ . Если при этом значение критерия изменять с интервалом  $\Delta\mathcal{E}_{nom} = (\mathcal{E}_{nom.max} - \mathcal{E}_{nom.min}) / q$ , то будет получено  $q$  разделяющих классы гиперповерхностей, которые в соответствии с методикой аналитического описания методами, допускающими разбиение факторного пространства на элементарные подобласти, могут быть заданы в виде предикатных уравнений (1). Здесь:  $\Delta\mathcal{E}_{nom}$  – допустимое отклонение экономических потерь от рассчитанного значения.

Обучение модели выполняется на основе вычислительного эксперимента, структурная схема которого приведена на рис. 2. В ходе эксперимента в блоке формирования реализаций (БФР) случайным образом генерируются технические величины в заданных пределах.

В блоке «Энергоэкономическая модель» осуществляется расчёт экономических потерь от применения (или отказа от применения) защитных средств электроприводов в электросетях с некачественной электроэнергией согласно [4].

Формирование элементов предикатной модели осуществляется в блоке «Обучение и адаптация» согласно [3]. При этом количество предикатов полностью определённой модели зависит от параметров входных величин и определяется по формуле [5]:

$$K_q = \prod_{i=1}^n \frac{d_i}{\Delta x_i}, \quad (3)$$

Здесь  $d_i; \Delta x_i$  – диапазон изменения и шаг вариации  $i$  – входной величины. В табл. 1 приведены данные о параметрах входных величин при исследовании работы АД мощностью 7500 Вт, работавшего в условиях некачественной электроэнергии. Как следует из табл.1 и (3)  $K_q = 1,664 \cdot 10^{13}$ . Расчёт такого количества предикатов в приемлемые временные интервалы затруднителен.

Для преодоления данного затруднения, именуемого «проклятием размерностей», в ходе обучения предикатной модели применён алгоритм ускоренного обучения [5]. Данный алгоритм позволяет включать в предикатную модель необученные области факторного пространства, если выполняются простые условия для двух предикатов из некоторого класса:

$$\begin{cases} X_{u \min}^1 \leq X_{u \min}^2 \\ X_{u \max}^1 \geq X_{u \max}^2 \end{cases}, \text{ при } u = \overline{1, n}; u \neq 1, \quad (4)$$

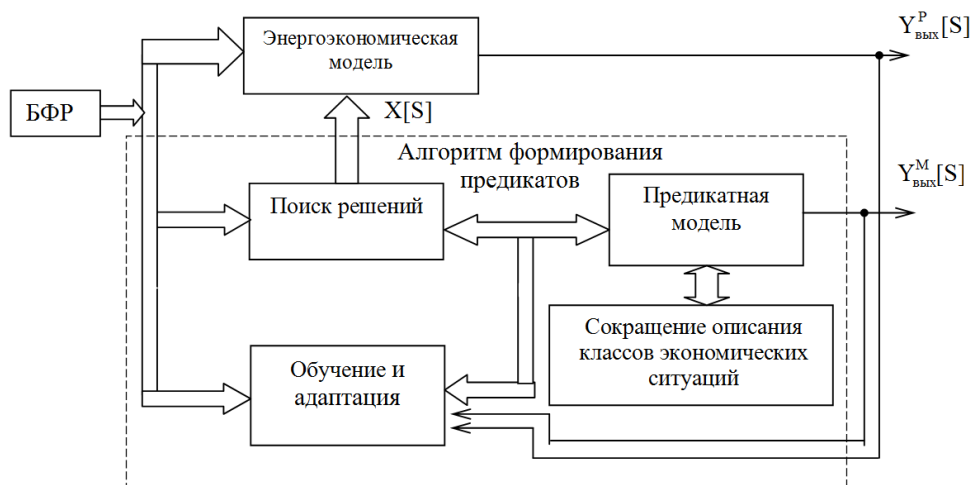


Рис. 2 – Структурная схема модели формирования предикатов

где  $X_{u\min}^1, X_{u\max}^1, X_{u\min}^2, X_{u\max}^2$  – параметры проекций объединяемых областей;  $u$  – номер признаковой оси факторного пространства, в направлении которой происходит объединение подобластей.

В блоке "Предикатная модель" по сформированным значениям параметров технических и экономических величин и рассчитанным по энергоэкономической модели экономическим потерям от применения защитных устройств формируется экономическая ситуация в виде предикаты и включается в  $p$  – класс. Номер класса экономической ситуации определяется по формуле:

$$p = \text{entier} \left| \mathcal{E}_{nom} \times \Delta \mathcal{E}_{nom}^{-1} \right| + 1, \quad (5)$$

Следует также отметить, что для предикатной модели разработан алгоритм адаптации, позволяющий осуществлять её уточнение вследствие расширения парка технических средств и изменения их стоимостей [5]. Уточнённый  $p$  – класс экономических ситуаций определяется следующим предикатным уравнением:

$$Z_p \left[ \vec{X}, \vec{C} \right] = \left[ V_{i=1}^q V_l^{L_1+\lambda_p} Z_{p,l} \left[ \vec{X}, \vec{C} \right] \right] \Lambda$$

$$\Lambda \left[ V_{v=1}^{L_2} Z_{t,v} \left[ \vec{X}, \vec{C} \right] \right], \quad (6)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – число полученных в результате распознавания противоречий первого и второго рода (соответственно),  $\Lambda$  – логическая операция конъюнкции.

Под противоречием первого рода понимается принадлежность некоторой предикаты классу  $p$  хотя данная предиката по значению экономических потерь (вследствие изменений технических и экономических условий) должна быть включена в класс  $t$ , а под противоречием второго рода понимается принадлежность некоторой предикаты классу  $t$  хотя данная предиката по значению экономических потерь должна быть включена в класс  $p$ .

Реализация алгоритмов адаптации согласно (6) приводит к постепенному структурному усложнению предикатной модели и практическому затруднению её использования. Преодолеть структурное усложнение модели возможно применением алгоритмов, применённых в блоке «Сокращение описания классов экономических ситуаций». Сокращение описания классов предусматривает укрупнение подобластей путём их объединения и последующим кодированием параметров предикатного уравнения, которое определяет укрупнённую область [6].

Таблица 1

Параметры входных величин АД

№ п/п	Входная величина	Диапазон изменения	Шаг вариации	Примечание
1	Коэффициент искажения синусоидальности	2...15 %	0,5 %	
2	Коэффициенты отдельных гармонических составляющих	0...10%	0,5 %	7 первых гармоник
3	Коэффициент обратной последовательности	0...5%	0,1 %	
4	Коэффициент нулевой последовательности	0...5%	0,1 %	
5	Стоимость технических средств защиты	0...200000 грн.	20000 грн.	10 вариантов технических решений

Объединение подобластей осуществляется при выполнении условий равенства в правой и левой частях выражений в (5). Тогда результирующая подобласть будет иметь минимальное и максимальное значение  $u$  – признака, определяемого как

$$X_{u \min}^{12} = \min \{ X_{u \min}^1, X_{u \min}^2 \};$$

$$X_{u \max}^{12} = \max \{ X_{u \max}^1, X_{u \max}^2 \}.$$

Очевидно, что при укрупнении подобластей возможна перестановка предикатов из одного класса в другой, а, следовательно, и разрешение противоречий первого и второго родов.

Кодирование параметров предикатных уравнений предполагает определение их номеров на признаковых осях в виде некоторого вектора  $\vec{B}$  и сворачиванию его к некоторому скаляру по формуле [6]:

$$K = \sum_{u=1}^{2(n+r)} b_j q^{(2(n+r)-j)}, \quad (7)$$

где  $b_j$  – составляющая сворачиваемого вектора  $\vec{B}$ , соответствующая  $j$  – признаковой оси;  $q$  – основание системы.

Переход от кодирующих чисел  $K_\gamma$  к вектору  $\vec{B}_\gamma$  осуществляется по формуле:

$$b_{j\gamma} = \text{mod} \left( \left[ K_\gamma / q^{(2(n+r)-j)} \right], q \right), j = 1, \overline{(n+r)}.$$

Определение наилучшего технического варианта защиты АД по предикатной модели осуществляется на основе алгоритма распознающей статической оптимизации в блоке «Поиск решений» следующим образом. Для текущих значений технических величин рассчитывается  $Z_{ЭМ}[\vec{X}, \vec{C}]$ , начиная с первого класса экономических  $p=1$ , что соответствует минимальному значению экономических потерь. Если  $Z_{l1}[\vec{X}, \vec{C}] = 0$ , для всех  $l = \overline{1, \lambda_1}$ , то анализируется второй класс экономических ситуаций и т.д. Данная процедура выполняется до тех пор, пока для некоторого  $p = c$  и

$l = Z_{cg}[\vec{X}, \vec{C}] = 1$ . Тогда по значению констант выбранной предикаты определяются финансовые затраты и, соответственно, выбранный технический вариант защиты.

В [7] показано, что предикатные уравнения (1) могут быть представлены в виде реляционной модели данных. Это позволяет описывать процедуры обучения, адаптации, минимизации и поиска оптимальных решений на основе единого математического аппарата –  $\alpha$  – алгебры. А учитывая, что реляционные модели поддерживаются СУБД, данный подход к определению наилучшего технического средства защиты АД при его работе в условиях некачественной электроэнергии легко реализуется в производственных условиях.

### Выводы

Предложенный подход к определению наилучшего варианта защиты реализован применительно к эксплуатации асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт. В результате вычислительных экспериментов получено множество оптимальных решений для различных условий его работы. Полученные решения могут храниться на электронных элементах памяти. Для практического использования полученных результатов достаточно оценить качество электроэнергии на конкретном предприятии и техническое состояние двигателя, а затем, используя средства СУБД (локальной или распределённой) выбрать наиболее экономически целесообразный способ защиты АД.

### Библиографический список

1. Качан, Ю. Г. Средства эффективного использования электрической энергии: монография / Ю. Г. Качан, В. В. Дьяченко, В. В. Кузнецов; Запорож. гос. инженер. акад. – Запорожье : ЗГИА, 2016. - 156 с.
2. Бойко, О. А. Возможности взаимодействия SCADA системы zepop с внешним программным обеспечением / О. А. Бойко, А. А. Голинько, С. Н. Проценко – сайт ком-

- паниі СВ АЛЬТЕРА, URL: <http://www.svaltera.ua/press-center/articles/8773.php>, 2014. – с. 28.
3. Кузнецов, В. В. Алгоритм распознавания в задачах повышения энергоэффективности асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии / В. В. Кузнецов, А. В. Николенко, В. П. Иващенко, Н. М. Трипутень. Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» Харьков. 2017. Вып. 27 (1249). – С. 95-98.
  4. Кузнецов, В. В. Засоби підвищення енергоефективності асинхронних двигунів, що працюють в мережах з неякісною електроенергією: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.09.03/ М-во освіти і науки України, Державний ВНЗ «НГУ». – Д., 2013.
  5. Трипутень, Н. М. Методика и результаты вычислительных исследований алгоритма идентификации предикатной модели/ Н. М. Трипутень, А. С. Коба // Гірнична електромеханіка та автоматика.-2000.-№64.-с.106-108.
  6. Трипутень, Н. М. Исследование алгоритма адаптации предикатной модели / Н. М. Трипутень, Д. В. Носкин // Інформаційні технології. Безпека та зв'язок: Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. – Д.: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет». – 2011. – С.9-11.
  7. Трипутень, Н. М.  $\alpha$  - алгебра в задачах керування технологічними процесами / Н. М. Трипутень, Д. О. Бешта // Науковий вісник НГА України. – 2001. –№2.-с.80-83.
  8. Serdiuk T., Feliziani M., Serdiuk K. «About electromagnetic compatibility of track circuits with the traction supply system of railway», Published in: 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE); Date of Conference: 27-30 Aug. 2018; Date Added to IEEE Xplore: 08 October 2018. Publisher: IEEE. Conference Location: Amsterdam, Netherlands. 2018. – P 242–247.
  9. Serdiuk, T. About Electromagnetic Compatibility of Rail Circuits With the Traction Supply System of Railway [Text] / T. Serdiuk,

V. Kuznetsov and Ye. Kuznetsova // Conference proceedings of 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS) (September 10 - 14, 2018, Kharkiv, Ukraine). – Institute of Power Engineering, Electronics and Electromechanics, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine. – 2018.– P.59-63.

**Ключові слова:** засоби захисту, асинхронні двигуни, неякісна електрична енергія, промислові підприємства, ідентифікаційна та предикатна моделі, технічна та економічна цінність, електромеханічне обладнання, електрична мережа, нелінійні об'єкти, математичний апарат, системи керування баз даних.

**Ключевые слова:** средства защиты, асинхронные двигатели, некачественная электрическая энергия, промышленные предприятия, идентификационная и предикатная модели, техническая и экономическая ценность, электромеханическое оборудование, электрическая сеть, нелинейные объекты, математический аппарат, система управления базами данных.

**Keywords:** means of protection, induction motors, poor-quality electrical energy, industrial enterprises, programmable logical controller, identification and predicative model, technical and economic values, electromechanical equipment, electrical networks, non-linear objects, mathematical apparatus, data base control systems.

**Рецензенты:**

д. т. н., проф. Г. К. Гетьман,  
д. т. н., проф. Ф. П. Шкрабец.

Поступила в редколлегию 01.11.2018.  
Принята к печати 09.11.2018.