

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

В статье рассмотрена схема включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную электрическую сеть. Схема позволяет обеспечить симметричную трехфазную систему напряжений на обмотке статора. Цель исследования заключалась в определении законов изменения токов двух реактивных фазосдвигающих элементов, обеспечивающих симметрию напряжения, в зависимости от скольжения асинхронного двигателя. В работе приведены расчетные выражения для определения проводимостей фазосдвигающих элементов по известным параметрам электрической машины. В результате расчета было определено, что ток одного фазосдвигающего элемента должен иметь емкостный характер во всем диапазоне изменения скольжения двигателя, другого — емкостный или индуктивный.

**Ключевые слова:** трехфазный асинхронный двигатель, однофазная сеть, фазосдвигающий элемент, трехфазное напряжение, реактивный ток.

Повышение энергетической эффективности различных производств является важным направлением научных исследований, поэтому повышению качества и экономичности работы электромеханических преобразователей в различных системах электропривода в настоящее время уделяется значительное внимание.

Существуют системы электропривода, которые должны быть подключены к однофазной электрической сети, например, бытовые столярные, деревообрабатывающие станки, насосы и другое бытовое электрооборудование.

В этом случае применяют однофазные асинхронные двигатели или трехфазные асинхронные двигатели стандартных серий, при включении которых используют специальные схемы подключения трехфазных обмоток статора к однофазной сети с конденсаторами. Известно большое количество таких схем. Наиболее распространенные схемы приведены в [1–3] (рис. 1).

Общим недостатком таких схем является получение несимметричной трехфазной системы напряжений для различных режимов работы двигателя от холостого хода до номинального [3, 4]. Мощность на валу двигателя при этом составляет 40–50 % от мощности в симметричном трехфазном режиме [1], несимметричная система трехфазных напряжений также является причиной других негативных последствий [1, 2].

В настоящее время для подключения трехфазных асинхронных двигателей к однофазной сети также используются полупроводниковые преобразователи с различными схемами соединения электронных элементов [4–8].

На рис. 2а приведена электрическая схема, позволяющая получить симметричную систему трехфазного напряжения на трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя.

Трехфазная обмотка статора включается в «треугольник», к одной фазе подключается однофазная сеть, параллельно двум другим фазам подключаются по одному фазосдвигающему реактивному элементу (ФЭ) 1 и 2. Приведенная электрическая схема позволяет обеспечить симметрию трехфазного напряжения на обмотке статора, но только при постоянном значении нагрузки асинхронного двигателя. Если нагрузка на валу двигателя изменяется, что обычно имеет место, то для поддержания симметрии трехфазного напряжения на обмотке необходимо регулировать токи реактивных элементов.

Выполним анализ работы трехфазного асинхронного двигателя, включенного в однофазную сеть по приведенной схеме на рис. 2б.

Каждая фаза асинхронного двигателя представлена с использованием Г-образной схемы замещения и ее эквивалентной схемы, состоящей из последовательно соединенных активного и индуктивного элементов.

Для расчета действительной и мнимой составляющих эквивалентной комплексной проводимости фазы асинхронного двигателя в зависимости от скольжения были использованы выражения:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\dot{Y}_{AD}(S)) = \\ = \frac{R_1 + R_\mu}{(R_1 + R_\mu)^2 + (X_1 + X_\mu)^2} + \frac{R_1 + \frac{R'_2}{S}}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}; \quad (1) \end{aligned}$$

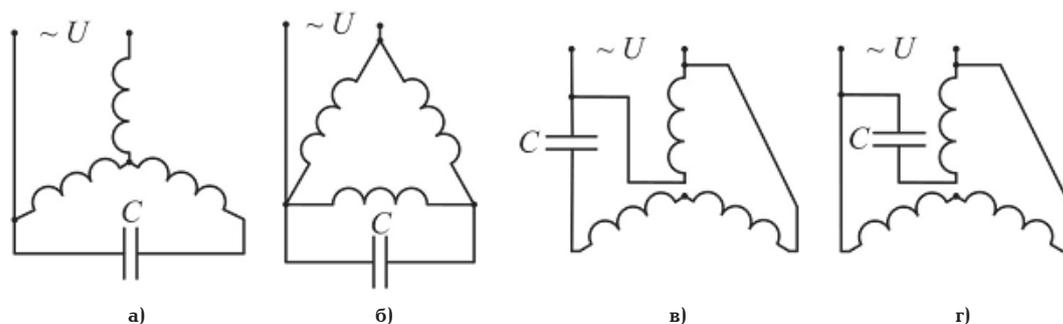


Рис. 1. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

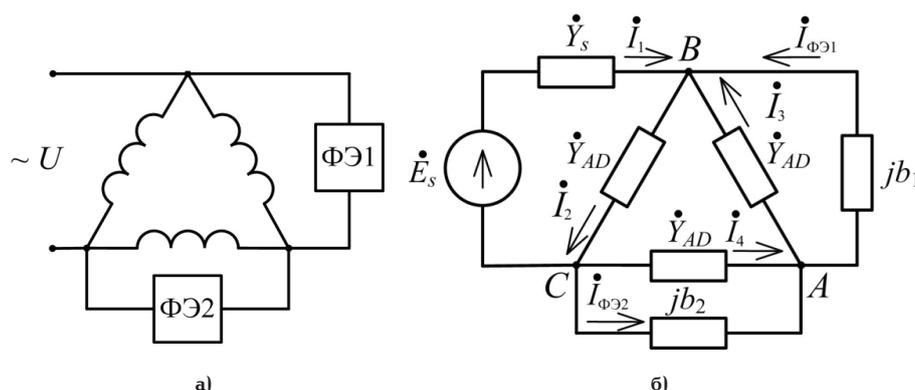


Рис. 2. Схема включения асинхронного двигателя в однофазную сеть с двумя ФЭ (а) и схема замещения (б)

$$\operatorname{Im}(\dot{Y}_{AD}(S)) = - \frac{X_1 + X_\mu}{(R_1 + R_\mu)^2 + (X_1 + X_\mu)^2} - \frac{X_1 + X'_2}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}. \quad (2)$$

Рассмотрим асинхронный двигатель 4А80В4У3 с номинальной мощностью 1,5 кВт, который необходимо подключить к однофазной сети. Номинальные параметры двигателя: напряжение обмотки статора — 220 В; КПД — 0,77; коэффициент мощности — 0,83; скольжение — 0,067. Параметры Г-образной схемы замещения [9]:  $R_\mu = 17,64 \text{ Ом}$ ;  $X_\mu = 117,54 \text{ Ом}$ ;  $R_1 = 7,42 \text{ Ом}$ ;  $X_1 = 4,83 \text{ Ом}$ ;  $R'_2 = 4,14 \text{ Ом}$ ;  $X'_2 = 7,42 \text{ Ом}$ .

Графики изменения активной и реактивной составляющих проводимостей фазы обмотки статора асинхронного двигателя типа 4А80В4У3 в зависимости от скольжения, рассчитанные по выражениям (1) и (2), приведены на рис. 3.

Для анализа законов изменения проводимостей двух ФЭ 1 и 2 (рис. 2) в зависимости от проводимостей фазы обмотки статора асинхронного двигателя получены математические выражения при условии обеспечения симметричного трехфазного напряжения на обмотке статора:

$$b_1 = \sqrt[3]{-(L + M + N) + |L + M + N|} + \sqrt[3]{-L}; \quad (3)$$

$$b_2 = \frac{-\sqrt{3}b_1^2 - Db_1 - G}{2\operatorname{Re}(Y_{AD})}, \quad (4)$$

где  $C, D, G, L, M, N$  — коэффициенты, которые определяются по выражениям:

$$C = \frac{3}{2}(\operatorname{Re}(Y_{AD})^2 + \operatorname{Im}(Y_{AD})^2); \quad (5)$$

$$D = 2\sqrt{3}\operatorname{Im}(Y_{AD}) - 2\operatorname{Re}(Y_{AD}); \quad (6)$$

$$G = \sqrt{3}(\operatorname{Re}(Y_{AD})^2 + \operatorname{Im}(Y_{AD})^2); \quad (7)$$

$$L = - \frac{(2\operatorname{Re}(Y_{AD}) - 2\sqrt{3}\operatorname{Im}(Y_{AD}) - 2D)^3}{(6\sqrt{3})^3}; \quad (8)$$

$$M = - \frac{(2\operatorname{Re}(Y_{AD}) - 2\sqrt{3}\operatorname{Im}(Y_{AD}) - 2D)}{36} \rightarrow \frac{(4\operatorname{Re}(Y_{AD})\operatorname{Im}(Y_{AD}) - D\operatorname{Im}(Y_{AD}) - G)}{36}; \quad (9)$$

$$N = - \frac{2C\operatorname{Re}(Y_{AD}) - G\operatorname{Im}(Y_{AD})}{2\sqrt{3}}, \quad (10)$$

где  $\operatorname{Re}(Y_{AD})$  ( $\operatorname{Im}(Y_{AD})$ ) — активная (реактивная) составляющая комплексной проводимости фазы асинхронного двигателя, См.

При выводе выражений (3)–(10) принято допущение о равенстве комплексных проводимостей трех фаз обмотки статора асинхронного двигателя при различной нагрузке на валу.

С использованием выражений (3)–(10) определены законы регулирования реактивных составляющих проводимостей каждого из двух ФЭ (рис. 2), при которых будет сохраняться симметричная система трехфазного напряжения (рис. 4).

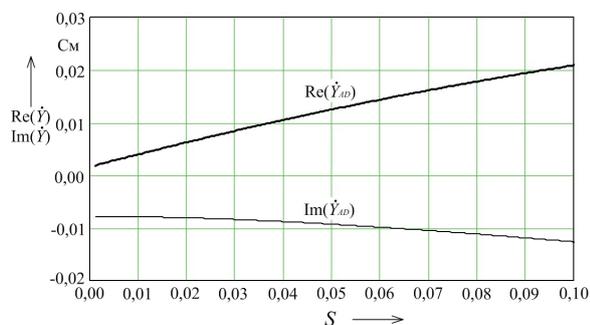


Рис. 3. Изменение активной и реактивной составляющих проводимостей фазы обмотки статора асинхронного двигателя типа 4А80В4УЗ в зависимости от скольжения

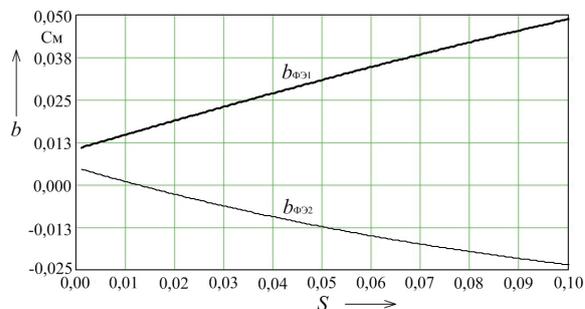


Рис. 4. Изменение реактивных составляющих проводимостей ФЭ в зависимости от скольжения

Таблица 1

Расчетные комплексные значения напряжений и токов схемы замещения

	Сеть	АВ	ВС	СА	ФЭ1	ФЭ2
$U, В$	220	$-109,9 + j190,5$	$220 - j0,1$	$-110 - j190,5$	$-109,9 + j190,5$	$-110 - j190,5$
$I, А$	$8,2 - j2$	$0,4 + j3,4$	$2,7 - j2$	$-3,1 - j1,4$	$-5,9 - j3,4$	$-2,4 + j1,4$

Как видно из рис. 4, для обеспечения симметричной трехфазной системы напряжений на трехфазной обмотке статора один ФЭ должен иметь емкостной характер проводимости во всем диапазоне изменения механической нагрузки, характер и величина проводимости другого элемента должны изменяться в зависимости от нагрузки.

Для рассматриваемого примера при увеличении нагрузки на валу асинхронного двигателя, включенного в однофазную сеть, проводимость первого ФЭ (обозначен 1 на рис. 2а) должна увеличиваться с 0,01 См до 0,0372 См при номинальной нагрузке, ток этого ФЭ — емкостной. Проводимость второго ФЭ (обозначен 2 на рис. 2а) должна уменьшаться от 0,0046 См (емкостной характер) до нуля при  $S < 0,014$ , далее проводимость этого элемента должна увеличиваться до 0,0166 См (индуктивный характер).

Для пояснения «эффекта» получения симметричной трехфазной системы напряжений при питании от однофазной сети с использованием двух ФЭ в табл. 1 приведены значения напряжений и токов электрической схемы (рис. 2б). Вектора напряжений и токов рассчитаны и построены на диаграмме при нагрузке двигателя, соответствующей скольжению 0,05, для которой комплексная проводимость фазы двигателя равна  $(0,0125 - j0,0093)$  См. По выражениям (3) и (4) определены реактивные составляющие проводимостей ФЭ (первого  $+j0,03095$  См; второго элемента  $-j0,01235$  См). Комплексная проводимость сети принята равной  $(25 - j110)$  См. По данным табл. 1 была построена векторная диаграмма (рис. 5).

Напряжение однофазной сети приложено к фазе обмотки статора ВС (рис. 2б), на векторной диаграмме (рис. 5) — вектор  $\dot{U}_{BC}$ . ФЭ 1 создает емкостной ток (вектор  $\dot{I}_{ФЭ1}$ ). ФЭ 2 создает индуктивный ток (вектор  $\dot{I}_{ФЭ2}$ ). Геометрическая сумма векторов токов фазы АВ и ФЭ 1 (вектора  $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{ФЭ1}$ ) равна геометрической сумме векторов токов фазы СА

и ФЭ 2 (вектора  $\dot{I}_{CA}, \dot{I}_{ФЭ2}$ ), на векторной диаграмме вектор обозначен как  $\sum \dot{I}$ .

Геометрическая сумма векторов напряжений  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{CA}$  равна вектору напряжения  $\dot{U}_{BC}$  (напряжение однофазной сети). Поэтому для заданных одинаковых значений полных проводимостей фаз двигателя можно задать значения токов ФЭ 1 и ФЭ 2, при которых модули напряжений между узлами АВ, ВС и СА будут равны и смещены относительно друг друга на 120 градусов.

Активные составляющие эквивалентных комплексных проводимостей фаз АВ, ФЭ 1 и фазы СА, ФЭ 2 равны, а реактивные — равны по модулю, но у фазы АВ и ФЭ 1 — емкостной характер, у фазы СА и ФЭ 2 — индуктивный характер. При протекании тока  $\sum I$  (рис. 5) вектора напряжений  $\dot{U}_{AB}$  и  $\dot{U}_{CA}$  будут равны по модулю и смещены относительно друг друга на 120 градусов.

Таким образом, два ФЭ создают реактивные токи, обеспечивающие систему симметричного трехфазного напряжения на обмотке статора электродвигателя (вектора  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  на рис. 5), при включении схемы к однофазной сети.

В результате расчета получены зависимости изменения тока однофазной сети, фазных токов обмотки статора асинхронного двигателя и токов ФЭ от холостого хода до номинального скольжения асинхронного двигателя (рис. 6), действующие значения токов трех фаз одинаковые.

На рис. 7 приведена зависимость коэффициента мощности двигателя  $\cos(\varphi_{AD})$  и коэффициента мощности эквивалентной нагрузки однофазной сети  $\cos(\varphi_s)$  от скольжения (эквивалентная нагрузка однофазной сети имеет активно-индуктивный характер).

В качестве ФЭ с плавным регулированием индуктивного тока можно использовать дроссель с дополнительной обмоткой для подмагничивания сердечника постоянным магнитным потоком. Для

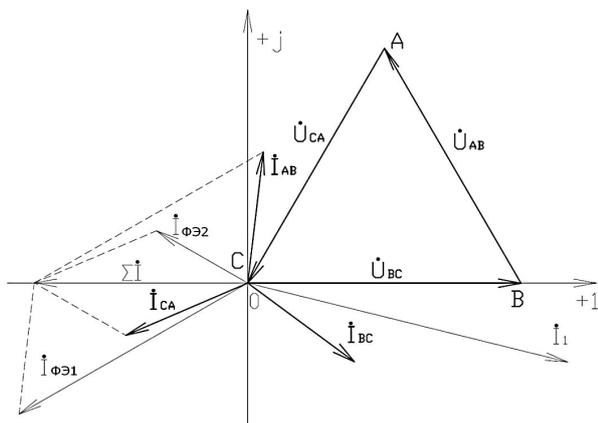


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжений и токов электрической схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

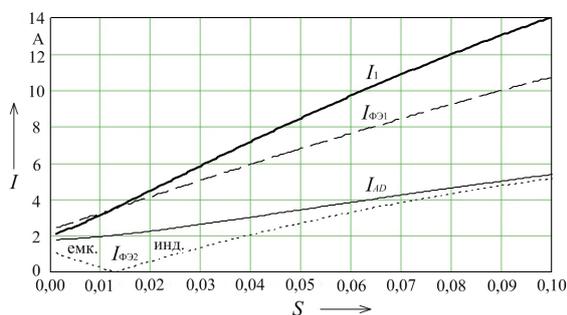


Рис. 6. Изменение действующего значения тока однофазной сети, фазного тока асинхронного двигателя и токов ФЭ в зависимости от скольжения

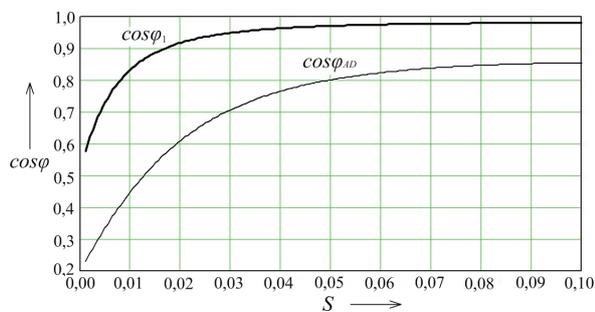


Рис. 7. Зависимость коэффициента мощности эквивалентной однофазной нагрузки и коэффициента мощности двигателя от скольжения

реализации ФЭ с плавным регулированием емкостного тока можно использовать цепь с последовательным соединением дросселя и конденсатора, при расчете такого устройства необходимо учитывать, что резонансная частота контура не должна совпадать с частотой сети переменного тока и частотами высших гармоник.

Необходимо отметить: в [10] приведена схема включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть, в которой используются конденсатор как ФЭ 1 и катушка индуктивности и ФЭ 2 (рис. 2а). Как видно из рис. 6, для обеспечения трехфазной симметричной системы напряжений

на обмотке статора ФЭ 2 должен обеспечивать протекание емкостного или индуктивного тока в зависимости от нагрузки на валу асинхронного двигателя.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

- 1) для обеспечения симметричного напряжения на трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя, включенного в однофазную сеть, необходимо использовать два ФЭ;
- 2) значения проводимостей ФЭ можно определить с использованием приведенных расчетных выражений по известным параметрам асинхронного двигателя;
- 3) при изменении нагрузки на валу асинхронного двигателя для обеспечения симметричной системы напряжений токи ФЭ должны изменяться;
- 4) предложенный подход рассмотрен на примере асинхронного двигателя с номинальной мощностью 1,5 кВт, для которого определены законы изменения проводимостей и токов двух ФЭ; при этом проводимость одного реактивного элемента должна иметь емкостной характер, проводимость другого элемента должна быть емкостной или индуктивной в зависимости от нагрузки на валу;
- 5) для реализации плавного регулирования тока ФЭ можно использовать дроссель с подмагничиванием сердечника постоянным магнитным потоком или дроссель, соединенный последовательно с конденсатором.

#### Библиографический список

1. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Питер, 2010. 350 с. ISBN 978-5-469-01381-5.
2. Копылов И. П. Электрические машины. В 2 т. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Юрайт, 2016. Т. 2. 408 с. ISBN 978-5-9916-7436-2, 978-5-9916-7437-9.
3. Торошчев Н. Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 95 с. ISBN 5-283-01052-X.
4. Murthy S. S., Berg G. J., Singh B. [et al.]. Transient analysis of a three phase induction motor with single phase Supply // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1983. Vol. PAS-102. P. 28–37. DOI: 10.1109/TPAS.1983.317994.
5. El-Barbary Z. M. S. Single-to-three phase induction motor sensorless drive system // Alexandria Engineering Journal. 2012. Vol. 51, Issue 2. P. 77–83. DOI: 10.1016/j.aej.2012.05.003.
6. Patil S. B., Aspalli M. S. Operating Three Phase Induction Motor Connected to Single Phase Supply // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2012. Vol. 2, Issue 11. P. 523–528.
7. Malyar V. S., Malyar A. V. Mechanical characteristics of three-phase induction motors with single-phase power supply // Electrical Engineering & Electromechanics. 2016. No. 3. P. 21–24. DOI: 10.20998/2074-272X.2016.3.03.
8. Badr M. A., Alolah A. I., Abdel-halim M. A. A capacitor start three phase induction motor // IEEE Transaction on Energy Conversion. 1995. Vol. 10, Issue 4. P. 675–680. DOI: 10.1109/60.475838.
9. Кравчик А. Э., Шлаф М. М., Афонин В. И. [и др.]. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.
10. Бирюков С. Н. Три фазы — без потери мощности // Радио. 2000. № 7. С. 37–39.

**ХАРЛАМОВ Виктор Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафе-

дрой «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 5093-8463

AuthorID (РИНЦ): 465264

**МОСКАЛЕВ Юрий Владимирович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 1422-1951

AuthorID (РИНЦ): 657144

**ЛЫСЕНКО Виктор Сергеевич**, аспирант кафедры «Электрические машины и общая электротехника».

SPIN-код: 7433-7885

AuthorID (РИНЦ): 978018

Адрес для переписки: emoe@omgups.ru

#### Для цитирования

Харламов В. В., Москалев Ю. В., Лысенко В. С. Повышение эффективности использования трехфазных асинхронных электродвигателей при питании от однофазной сети // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 27–31. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-27-31.

Статья поступила в редакцию 05.03.2018 г.

© В. В. Харламов, Ю. В. Москалев, В. С. Лысенко

УДК 621.311.001.57:519.25

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-31-36

**А. А. КОМЯКОВ**  
**А. В. ПОНОМАРЕВ**  
**В. В. ЭРБЕС**

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ УСТРОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПРОЦЕССЕ ПРЕДПРИЯТИЯ

Статья посвящена разработке программного модуля, позволяющего выполнять непрерывный мониторинг энергоэффективности производственного процесса, а также определять фактическую эффективность применения внедряемых электроустановок, современных энергосберегающих устройств и технологий на основе нечетких нейросетевых моделей производственного процесса. Программный модуль реализует статистическую обработку данных об электропотреблении и объемах выполненной работы, и удобные механизмы по работе с нейросетевыми моделями технологического процесса.

**Ключевые слова:** энергоэффективность производственного процесса, энергосбережение, нечеткие нейронные сети, корреляционный анализ.

В современных условиях производства продукции и услуг между российскими предприятиями растет уровень конкуренции. Для обеспечения конкурентоспособности предприятиям приходится снижать издержки производства. К одной из основных категорий издержек на производстве относится потребление электроэнергии. Для снижения потребления данного вида ресурса предприятия внедряют современные устройства с повышенной энергетической эффективностью и технологии, направленные на снижение потребления электроэнергии. Однако эффективность внедрения данных устройств и технологий на предприятиях в условиях эксплуатации не оценивается, а принимается из данных, заявленных производителем. В боль-

шинстве случаев заявленная эффективность внедрения энергосберегающих устройств и технологий может отличаться от реальности, так как на работу электрооборудования влияет большое количество факторов, как производственных, так и климатических. Также нельзя забывать о человеческом факторе, когда режим работы электроустановок и объем электропотребления на единицу выполненной работы зависит от специалиста, использующего оборудование [1].

Для решения данного типа задач на предприятии требуется специалист со знаниями в области обработки статистических данных, современных методов моделирования процесса электропотребления и производства, что в большинстве случаев