

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБРЫВОВ И МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В СТАТОРНЫХ ОБМОТКАХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ткаченко А. А., Шульга А. А., Полупан И. И., Беш А. Н.

Предложен метод диагностирования статорных обмоток асинхронных двигателей на основе контроля угла сдвига фаз между токами фазных обмоток статора. Описан принцип работы устройства обнаружения аномального режима работы. Сформулированы принципы построения и составные части системы диагностирования. Описаны требования и меры обеспечения точности системы с учетом величины минимального отклонения диагностического параметра. Приведена блок-схема алгоритма обнаружения неисправностей статорных обмоток асинхронных двигателей.

Запропоновано метод діагностування статорних обмоток асинхронних двигунів на основі контролю кута зсуву фаз між струмами фазних обмоток статора. Описано принцип роботи пристрою виявлення аномального режиму роботи. Сформульовано принципи побудови та складові частини системи діагностування. Описано вимоги та заходи забезпечення точності системи з урахуванням величини мінімального відхилення діагностичного параметра. Наведено блок-схему алгоритму виявлення несправностей статорних обмоток асинхронних двигунів.

The method of diagnosing stator windings of induction motors based on control phase shift between the currents of phase stator windings is proposed. Article also describes the principle of abnormal operation detection device. The principles of construction and components of the system diagnostics were developed. In the paper were described the requirements and measures to ensure the accuracy of the system taking into account the value of the minimum deviation of the diagnostic parameter. The flow chart of faults detection in stator windings process was shown in the article.

Ткаченко А. А.

канд. техн. наук, ст. преп. кафедры ЭСА ДГМА

Tkachenko.aat@gmail.com

Шульга А. А.

ассистент кафедры ЭСА ДГМА

Полупан И. И.

ассистент кафедры МСИ ДГМА

Беш А. Н.

ст. преп. кафедры ЭСА ДГМА

УДК 621.313.333

Ткаченко А. А., Шульга А. А., Полупан И. И., Беш А. Н.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
ОБРЫВОВ И МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В СТАТОРНЫХ ОБМОТКАХ  
АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Высокая повреждаемость асинхронных машин становится причиной значительных убытков. Ущерб от повреждений электродвигателей в Украине составляет 1–1,5 млрд. грн в год [1]. Своевременное выявление неисправностей позволяет не допустить более серьезного повреждения двигателей, уменьшить время восстановления, сократить затраты на обслуживание и потери от внеплановых простоев, повысить эффективность работы двигателей и производственных механизмов. Таким образом, разработка методов и средств диагностирования неисправностей является актуальной задачей.

В настоящее время существует множество подходов к построению систем технического диагностирования неисправностей асинхронных двигателей. Значительное количество диагностических систем используют данные о мгновенных значениях токов статора. Анализ процессов, происходящих в электродвигателях [2–4] показал, что один из возможных вариантов обнаружения неисправностей обмотки – контроль симметрии фазных токов по величине и начальной фазе. Результаты исследований позволили сделать выводы о целесообразности использования в качестве признака наличия неисправностей зависимости углов сдвига фаз между токами обмоток статора ( $\hat{y}_j$ ):  $\Delta\Psi_{AB}$  – фаз А и В,  $\Delta\Psi_{BC}$  – фаз В и С,  $\Delta\Psi_{CA}$  – фаз С и А соответственно от величины относительного тока ( $X$ ) в фазной обмотке. В качестве базовой величины принято номинальное значение тока

Для случая с обрывом параллельной ветви одной из фазных обмоток зависимость представить [5] в виде функции регрессии:

$$\hat{y}_j = b_{0j} + b_{1j}X. \tag{1}$$

При межвитковых замыканиях зависимость угла сдвига фаз между токами фазных обмоток статора от действующих величин токов могут быть описаны [5] регрессионной зависимостью:

$$Y_j = 120 + a_1X^2 + a_2X_1X_2 + a_3X_2. \tag{2}$$

Зависимости (1, 2) и величины коэффициентов [5] могут стать основой для построения системы диагностирования неисправностей статорных обмоток.

Целью работы является разработка методики и алгоритма диагностирования неисправностей статорных обмоток асинхронных машин.

Следует отметить, что использование величин углов  $\Delta\Psi$  как диагностического показателя усложняется тем, что их изменение может быть вызвано как неисправностью двигателя, так и несимметрией питающих напряжений. С целью уменьшения количества ложных срабатываний системы диагностирования необходимо предусмотреть средство обнаружения аномального режима работы двигателя в условиях возможной несимметрии сети. Как таковое предлагается использовать устройство контроля разности потенциалов между искусственной нулевой точкой для питающих напряжений и нейтралью двигателя. Принцип работы устройства предложен Панкратовым А. И. [6].

Известно аналогичное устройство – фильтр нулевой последовательности, который используется для блокировки срабатывания устройств защиты при повреждениях питающей сети [7]. Напряжение между нейтралами измеряется блоком преобразования напряжений (БПН, рис.1) и определяется как:

$$\underline{U}_{Nn} = \underline{U}_N - \underline{U}_n, \tag{1}$$

где  $\underline{U}_N$  – напряжение нейтрали статорной обмотки относительно земли;  $\underline{U}_n$  – напряжение искусственной нейтрали относительно земли.

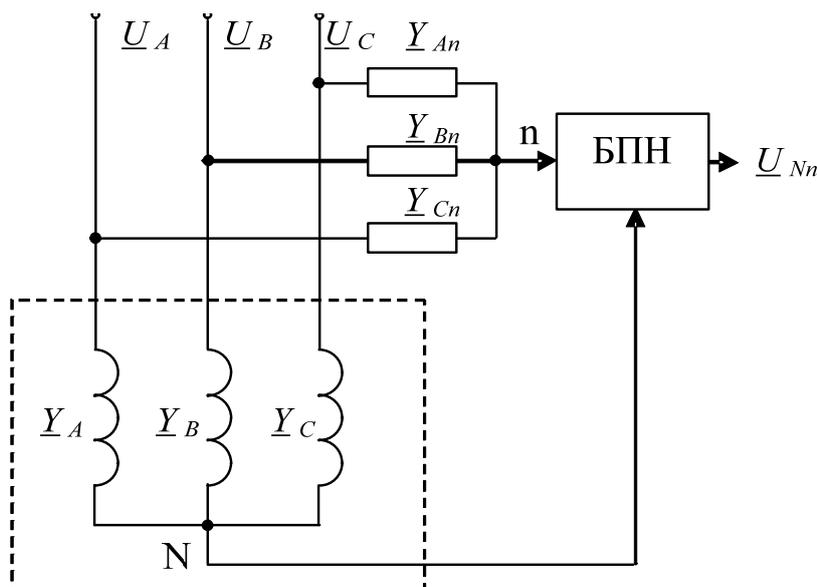


Рис. 1. Функциональная схема блока обнаружения аномального режима работы двигателя в условиях возможной несимметрии сети

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{Y}_A \underline{U}_A + \underline{Y}_B \underline{U}_B + \underline{Y}_C \underline{U}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \tag{2}$$

где  $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$  – проводимости фазных обмоток статора;  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  – фазные напряжения сети.

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{Y}_{An} \underline{U}_A + \underline{Y}_{Bn} \underline{U}_B + \underline{Y}_{Cn} \underline{U}_C}{\underline{Y}_{An} + \underline{Y}_{Bn} + \underline{Y}_{Cn}}, \tag{3}$$

где  $\underline{Y}_{An}, \underline{Y}_{Bn}, \underline{Y}_{Cn}$  – величины проводимостей искусственной нейтрали. Значения проводимостей  $\underline{Y}_{An}, \underline{Y}_{Bn}, \underline{Y}_{Cn}$  принимаются равными:

$$\underline{Y}_{An} = \underline{Y}_{Bn} = \underline{Y}_{Cn}. \tag{4}$$

При симметрии двигателя значения проводимостей  $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$  равны:

$$\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C. \tag{5}$$

При возникновении несимметрии напряжений:

$$\underline{U}_A \neq \underline{U}_B \neq \underline{U}_C . \quad (6)$$

Принимая во внимание (3–4), (6) напряжение между нейтралью при любой несимметрии напряжений питательной сети равняется нулю (7).

$$\begin{aligned} \bar{U}_{n0} &= \frac{\underline{Y}_A \underline{U}_A + \underline{Y}_B \underline{U}_B + \underline{Y}_C \underline{U}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} - \frac{\underline{Y}_{An} \underline{U}_A + \underline{Y}_{Bn} \underline{U}_B + \underline{Y}_{Cn} \underline{U}_C}{\underline{Y}_{An} + \underline{Y}_{Bn} + \underline{Y}_{Cn}} = \frac{\underline{Y}_A}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \underline{U}_A + \\ &+ \frac{\underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \underline{U}_B + \frac{\underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \underline{U}_C - \frac{\underline{Y}_{An}}{\underline{Y}_{An} + \underline{Y}_{Bn} + \underline{Y}_{Cn}} \underline{U}_A + \frac{\underline{Y}_{Bn}}{\underline{Y}_{An} + \underline{Y}_{Bn} + \underline{Y}_{Cn}} \underline{U}_B + \\ &+ \frac{\underline{Y}_{Cn}}{\underline{Y}_{An} + \underline{Y}_{Bn} + \underline{Y}_{Cn}} \underline{U}_C = \frac{1}{3} [\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C] - \frac{1}{3} [\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C] = 0 . \quad (7) \end{aligned}$$

При возникновении несимметрии напряжений питательной сети и неисправностей в обмотках статора дополнительно к условию (6) прибавляется несимметрия проводимостей статора:

$$\underline{Y}_A \neq \underline{Y}_B \neq \underline{Y}_C . \quad (8)$$

Принимая во внимание (3), (4), (6) и (8), напряжение между нейтралью «n» и «0» при любой несимметрии напряжений и неисправностях в обмотке статора не равняется нулю:

$$\bar{U}_{n0} = \frac{\underline{Y}_A \underline{U}_A + \underline{Y}_B \underline{U}_B + \underline{Y}_C \underline{U}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} - \frac{1}{3} [\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C] \neq 0 . \quad (9)$$

Таким образом, признаком возникновения любых неисправностей в обмотках статора есть условие:

$$\underline{U}_{Nn} \neq 0 . \quad (10)$$

Для отстройки от конструктивной несимметрии двигателя пороговое значение напряжения устанавливается на этапе оснащения двигателя устройством диагностирования.

Согласно результатам исследования особенностей работы АД при обрывах и межвитковых замыканиях в статорных обмотках сформулированы следующие принципы построения системы диагностирования:

1. Обнаружение аномального режима работы двигателя выполняется путем контроля разности напряжений между нулевой точкой двигателя и искусственной нейтралью напряжений сети. Превышение напряжением порогового значения служит сигналом к началу диагностирования.

2. Выявление обрывов и межвитковых замыканий осуществляется путем контроля величин и сдвигов по фазе токов обмоток статора.

3.1. Признаками обрыва фазы являются отсутствие тока в одной из фаз, токи работающих фаз имеют сдвиг по фазе в  $180^\circ$ .

3.2. Признаком обрыва параллельных ветвей фазных обмоток является сдвиг по фазе токов обмоток статора в соответствии с табл. [5].

3.3. Выявление межвитковых замыканий осуществляется путем контроля действующих величин и сдвигов по фазе токов обмоток статора в соответствии с [5].

4. Диагностирование неисправностей статорных обмоток АД выполняется автоматически с помощью микроконтроллера в процессе эксплуатации двигателя. Период диагностирования определяется быстродействием микроконтроллера и составляет величину порядка 0,25–0,5 с.

5. С целью повышения точности обнаружения неисправностей предусмотрены фильтрация сигналов напряжений и токов, измерение сигналов в течение десяти периодов и последующее осреднение.

6. В случае необходимости система может быть дополнительно расширена контроллером и беспроводным передатчиком (например, модуль EM2420/2.4, ZigBee RF Transceiver), для связи с устройствами высшего уровня.

В соответствии с принципами построения система диагностирования включает в себя следующие составные части:

1. Схема выделения искусственной нейтрали (рис. 1) и блок обработки напряжений для формирования цифрового сигнала на запуск алгоритма диагностирования.
2. Датчики токов, обеспечивающие измерение мгновенных значений фазных токов.
3. Фильтры выделения основной гармонической составляющей.
4. Преобразователь уровней напряжений для подготовки сигналов токов к виду, пригодному к обработке микроконтроллером.
5. Микропроцессорное устройство, выполняющее обнаружение неисправностей по величинам углов сдвига фаз и действующим величинам токов фазных обмоток.
6. Блок питания устройств системы диагностирования.
7. Устройство индикации.

Требования к точности системы диагностирования определяются величиной минимального отклонения диагностического параметра, вызванного выявляемой неисправностью. На основании анализа результатов исследований принято решение о том, что суммарная погрешность измерительного канала и погрешность вычисления диагностического параметра не должна превышать одного процента. Отклонение угла сдвига фаз от  $120^{\circ}$  при замыкании трех витков и номинальной нагрузке составляет 1,57 %.

Для обеспечения требуемой точности необходимо принять следующие меры:

1. С целью снижения влияния помех на измерительный канал системы необходимо обеспечить экранирование проводников и использовать датчики с токовым выходом.
2. Датчики токов и напряжений должны обладать погрешностью не более 0,5 %
3. Для повышения точности определения разницы фаз между токами статорных обмоток необходимо осуществить выделение основных гармонических составляющих (фильтрацию) сигналов напряжений и токов.
4. Необходимо обеспечить синхронность сбора информации о углах сдвига фаз токов, поскольку поочередный ввод информации о мгновенных значениях приводит к увеличению погрешности измерений.

5. Погрешность в определении разницы фаз в 0,5 гр. эл. (0,42 %) может быть обеспечена при тактовой частоте АЦП не менее 12 кГц.

6. Расчет углов сдвига фаз токов и действующих значений напряжений и токов выполняется на протяжении десяти периодов, диагностирование выполняется по усредненным значениям.

Блок-схема алгоритма обнаружения неисправностей обмотки статора приведена на рис. 2. Запуск алгоритма выполняется по сигналу аномального режима работы с устройства рис. 1, завершение работы – по отсутствию сигнала.

После запуска алгоритма параллельный процесс ввода десяти величин действующих значений токов (блок 4, рис. 2) через входы АЦП и опрос цифровых входов с частотой 100 кГц.

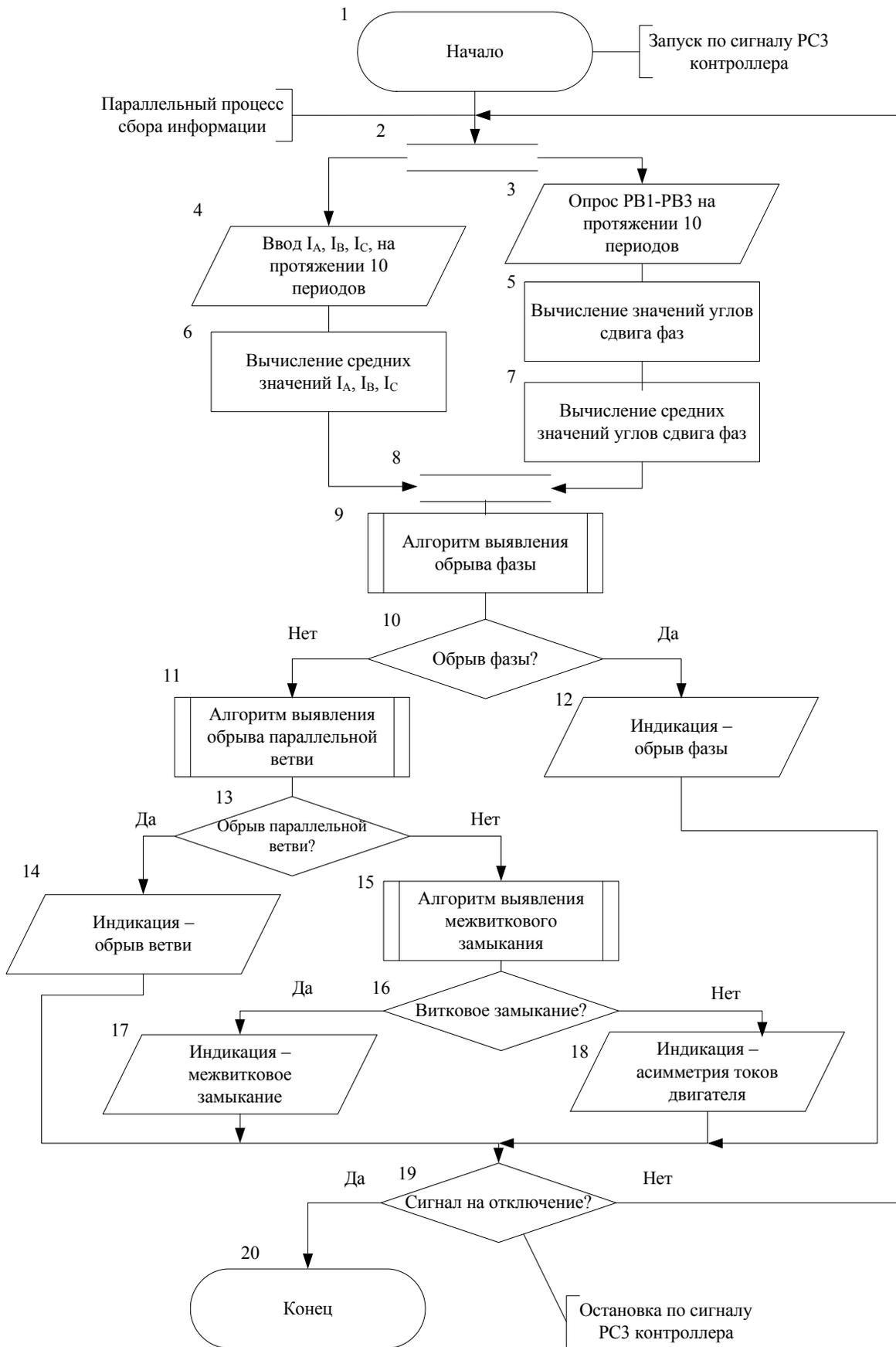


Рис. 2. Блок-схема алгоритма диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в бмотках статора

Величины действующих значений токов суммируются, происходит вычисление средних значений (блок 6, рис. 2). Величины сдвигов фаз оцениваются по времени между соседними фронтами сигналов (блок 5, рис. 2), вычисляется среднее значение (блок 7, рис. 2).

После сбора и вычисления средних величин токов и углов сдвига фаз выполняется алгоритм обнаружения неисправностей.

В блоке 9, рис. 2 происходит проверка логического условия: если ток одной из фаз равен нулю, то обнаружен обрыв фазы, выполняется индикация аварийного режима, алгоритм диагностики повторяется до отключения микроконтроллера.

Если обрыв фазы не обнаружен, выполняется обнаружение обрыва параллельной ветви (блок 11, рис. 2) путем проверки логического условия: если сдвиги по фазе между токами удовлетворяют условию  $109,6 \leq \Delta\psi_1 < 111,9$  и  $109,9 \leq \Delta\psi_2 < 113,4$  и  $137,38 \leq \Delta\psi_1 < 137,38$  [5], то обнаружен обрыв параллельной ветви. Условие составлено согласно [5], принято отклонение  $\pm 1,50$  для компенсации погрешностей измерения. При обнаружении неисправности производится индикация обнаружения неисправности, алгоритм повторяется до сигнала на отключение микроконтроллера.

Если обрыв параллельной ветви не обнаружен, выполняется алгоритм обнаружения межвиткового замыкания на основе логической проверки условий, полученных из уравнений [5].

При обнаружении неисправности производится индикация обнаружения неисправности, алгоритм повторяется до сигнала на отключение микроконтроллера.

Метод и алгоритм диагностирования реализованы с использованием микроконтроллера ATmega8-16Pw. Проверка эффективности системы диагностирования сопровождалась параллельным осциллографированием и обработкой диагностической информации на персональном компьютере для дополнительной проверки алгоритмов диагностирования.

Проверка эффективности метода выполнена с использованием исследовательского стенда, описанного в [3]. Лабораторные испытания показали, что разработанный метод и алгоритм и системы диагностирования позволяют обнаружить неисправности статорных обмоток асинхронных двигателей с достаточной точностью.

## ВЫВОДЫ

Предложен метод диагностирования статорных обмоток асинхронных двигателей на основе контроля действующих величин и угла сдвига фаз между токами фазных обмоток статора. Разработаны структура и алгоритм системы диагностирования неисправностей АД.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черный А. П. Применение показателей качества преобразования электроэнергии для оценки состояния и надежности электромеханических систем / А. П. Черный, А. П. Клинов, Д. Г. Мамчур // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Днепропетровск, 2006. – С. 245.
2. Федоров М. М. Режимы работы асинхронных электродвигателей при неисправностях обмотки статора / М. М. Федоров, О. И. Толочко, А. А. Ткаченко // Сборник научных трудов УкрНИИВЭ: Взрывозащищенное электрооборудование. – Донецк : Юго-Восток, Лтд, 2006. – С. 320–325.
3. Федоров М. М. Особенности электромеханических и тепловых процессов в асинхронных электродвигателях при аномальных режимах работы / М. М. Федоров, А. А. Ткаченко // Научные труды Донецкого национального технического университета. – 2006. – № 112. – С. 29–32.
4. Математическое моделирование асинхронных электродвигателей в несимметричных режимах работы / Е. А. Вареник, М. М. Федоров, О. И. Толочко, А. А. Ткаченко // Электротехника и электромеханика. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2006. – С. 29–36.
5. Федоров М. М. Метод диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных обмотках асинхронных двигателей / М. М. Федоров, А. А. Ткаченко // Сборник научных трудов УкрНИИВЭ: Взрывозащищенное электрооборудование. – Донецк : Юго-Восток, Лтд, 2011. – С. 168–174.
6. А. с. 39750 UA, МПК H02H7/00. Пристрій діагностування трифазних електричних машин / А. І. Панкратов, А. О. Ткаченко. – Заяв. 07.10.08; опубл. 10.03.09, Бюл. № 5. – 6 с.
7. Коковин В. Е. Фильтры симметричных составляющих в релейной защите / В. Е. Коковин. – М. : Энергия, 1968. – 88 с.

Статья поступила в редакцию 31.10.2011 г.