

УДК 621.313.333

**Ткаченко А. А., Коновалов В. А., Лагуnenков С. В.**

## **РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБРЫВОВ И МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В СТАТОРНЫХ ОБМОТКАХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Высокая повреждаемость асинхронных машин становится причиной значительных убытков. Ежегодно выходит из строя 29–30 % двигателей в горнодобывающей промышленности, 20 % – в машиностроительной, 13 % – в металлургической [1]. На долю электродвигателей приходится 25–30 % общего числа повреждений электрооборудования [2], а ущерб от повреждений электродвигателей в Украине составляет 1–1,5 млрд грн в год [3].

Своевременное выявление неисправностей позволяет сократить затраты на обслуживание и потери от внеплановых простоев, повысить эффективность работы двигателей и производственных механизмов. Таким образом, задача разработки средств диагностирования статорных обмоток асинхронных машин является актуальной.

Неисправности статорных обмоток асинхронных двигателей сопровождаются изменением электромеханических [4], электромагнитных [5] и тепловых [6, 7] процессов. В связи с этим выделяют ряд показателей, позволяющих выявить аномальный режим работы электродвигателей. Так в работе [8] с целью своевременного выявления неисправностей статорных обмоток предлагается контролировать фазные токи по величине и начальной фазе. На основе контроля симметрии токов по величине и фазе предложен метод диагностирования обрывов фазных обмоток, обрывов параллельных ветвей фазных обмоток и межвитковых замыканий в обмотках статора [9]. Признаком аномального режима работы предложено принять разность напряжений между нулевой точкой двигателя и искусственной нейтралью напряжений сети.

Целью работы является разработка системы диагностирования неисправностей статорных обмоток асинхронных машин на основе контроля симметрии токов фазных обмоток.

В соответствии с результатами исследований в работах [4–9] сформулированы принципы работы системы диагностирования, в соответствии с которыми разработана структурная схема (рис. 1).

Основными узлами системы диагностирования являются: БПД – блок формирования сигнала пуска диагностирования, БДТ – блок датчиков тока, выполняющий сбор и обработку сигналов токов фазных обмоток статора, МК1 – микроконтроллер, выполняющий алгоритм диагностирования [9], МК2 – микроконтроллер связи с устройствами диагностирования высшего уровня, БИ – блок индикации.

Запуск системы обнаружения неисправностей статорных обмоток выполняется по сигналу «начало обработки» блока формирования сигнала запуска диагностирования. Методика обнаружения асимметричного режима работы описана в работе [9].

Диагностирование выполняется путем контроля мгновенных значений токов фазных обмоток статора, которые система получает с датчиков тока ЛЕМ. Полученные значения обрабатываются блоком «Фильтр НЧ» с целью снижения помех. Преобразователь уровня напряжений при помощи компараторов и устройства ограничения преобразуют синусоиду к прямоугольному сигналу ТТЛ. Сигналы, соответствующие токам фаз А, В, С подаются на цифровые входы микроконтроллера МК1. Для оценки действующих значений токов фаз формируются постоянные напряжения, пропорциональные действующему значению тока.

Полученные сигналы подаются на входы АЦП МК1. Поскольку в установившихся режимах работы АД данные сигналы не изменяются, высоких требований к частоте дискретизации АЦП не предъявляется, при разработке опытного образца принята частота измерений в 100 Гц. Согласно структурной схеме разработана принципиальная электрическая схема устройства диагностирования рис. 2.

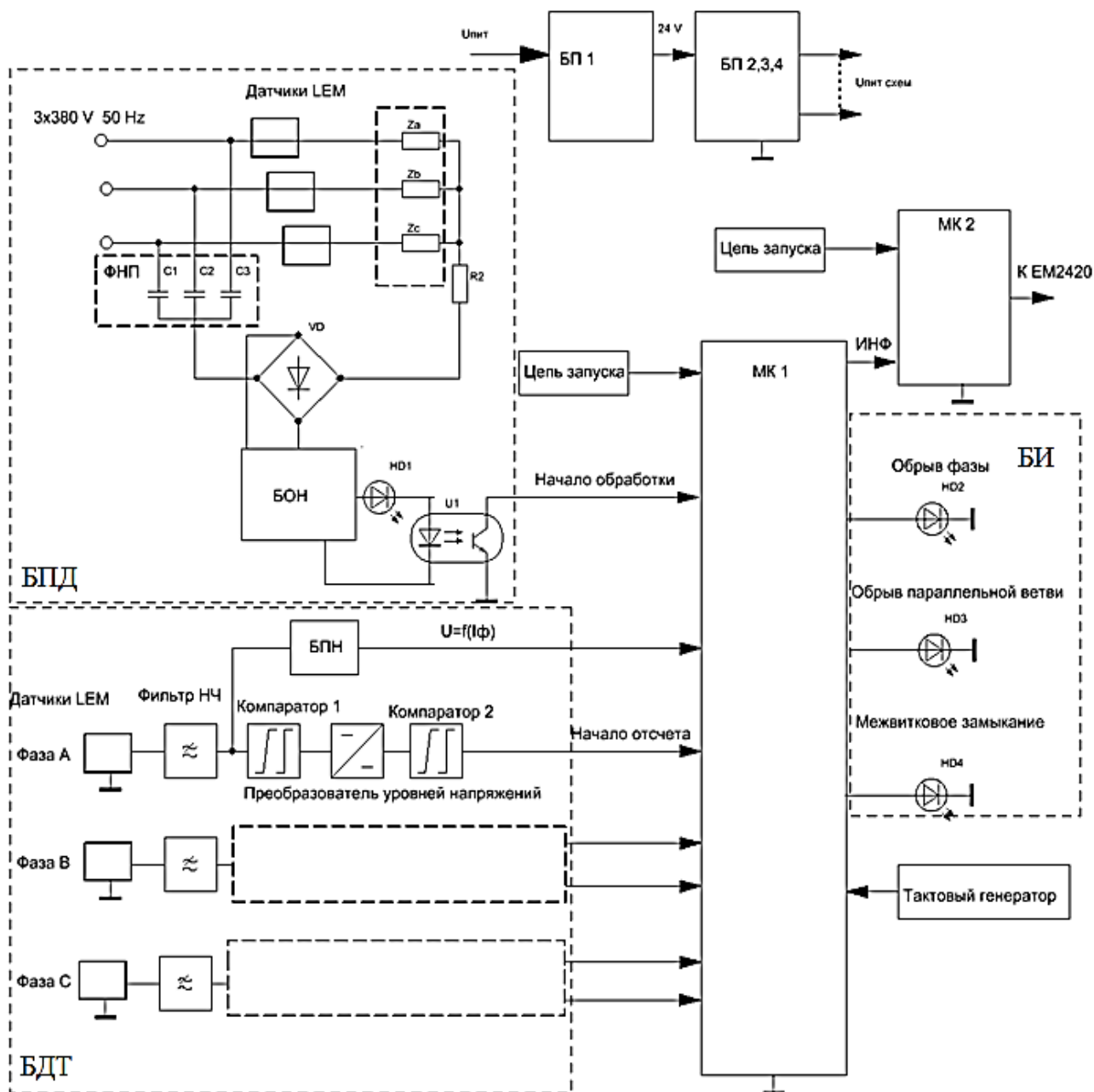


Рис. 1. Структурная схема устройства диагностирования

Сигналы токов измеряются с помощью датчиков LEM (ЕС1.1, ЕС2.1, ЕС3.1), максимальное значение тока – 100 А, подключение осуществляется аналогично трансформаторам тока (проводники продеваются через окно, при необходимости коэффициент преобразования изменяется пропорционально числу витков через окно датчика). Для реализации алгоритмов диагностирования выбран контроллер АТmega8-16Pw. Входы XTAL1, XTAL2 подключены к тактовому генератору, входы ADC0 – ADC2 АЦП микроконтроллера подключены к выходам преобразователя уровней напряжения с сигнала.

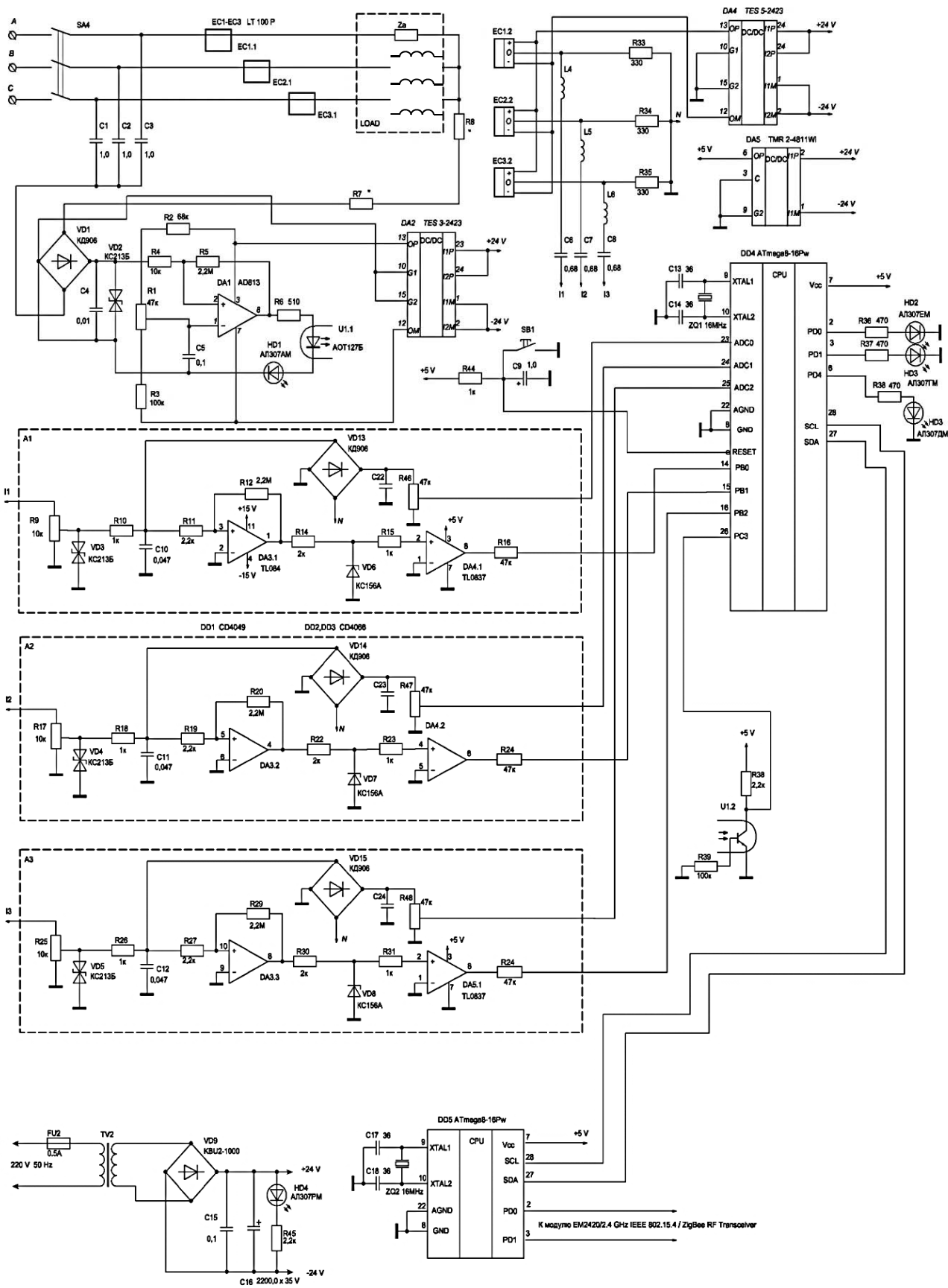


Рис. 2. Устройство диагностирования обрывов и межвитковых замыканий обмотки статора асинхронных двигателей. Схема электрическая принципиальная

Система диагностирования реализована в виде испытательного образца. Оценка эффективности системы диагностирования выполнена для электродвигателя АО2-61, специально подготовленного для исследования режимов работы с неисправностями статорных обмоток [6]. Работа системы диагностирования сопровождалась дополнительным осциллографированием сигналов токов и напряжений. Испытания проводились в следующей последовательности.

1. Электродвигатель подготовлен к проведению исследований. Выводы катушек обмотки статора соединены на коммутационной панели двигателя, для имитации обрыва фазы последовательно с одной из параллельных ветвей включен автоматический выключатель (исходное положение – выключатель замкнут, обрыва нет), для имитации межвиткового замыкания к одной из катушек параллельно подключен автоматический выключатель (исходное положение – разомкнут, межвиткового замыкания нет).

2. Зафиксированы параметры двигателя: номинальный ток статора, кратность пускового тока, величина питающего напряжения.

4. Установлен уровень порогового напряжения, при котором на контроллер поступает сигнал на включение алгоритма диагностирования.

5. Выполнен запуск двигателя.

6. Нагрузка на валу электродвигателя сформирована с помощью генератора постоянного тока, вал которого соединен через муфту с двигателем. В цепи якоря установлено необходимое сопротивление, подано напряжение на обмотку возбуждения.

7. Выключен автоматический выключатель для имитации обрыва параллельной ветви, после установления скорости осциллографированы токи двигателя при обрыве параллельной ветви обмотки статора. Затем выключатель переведен в исходное положение. Зафиксирован результат работы системы обнаружения неисправностей.

8. На время в 5 с замкнут выключатель, замыкающий участок обмотки накоротко, зафиксированы осциллограммы токов при наличии замыкания в цепи статора. Выключатель возвращен в исходное положение. Зафиксирован результат работы системы обнаружения неисправностей.

9. Электродвигатель отключен.

10. Оценены результаты работы опытного образца системы диагностирования.

Результаты работы системы диагностирования, а так же параметры режимов, полученные в результате измерений, приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

Параметры рабочего режима АД АО2-61 при обрыве одной из двух параллельных ветвей фазы А

2p = 6						
№ п/п	$\Delta\Psi_{AB}$	$\Delta\Psi_{BC}$	$\Delta\Psi_{CA}$	$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$
1	109,3	136,5	114,2	1,5	2,4	2,2
2	110,0	137,0	113,0	3,5	5,1	4,8
3	109,8	137,1	113,1	5,0	7,7	7,5
2p = 4						
№ п/п	$\Delta\Psi_{AB}$	$\Delta\Psi_{BC}$	$\Delta\Psi_{CA}$	$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$
4	109,1	138,0	112,9	4,3	7,0	7,1
5	109,0	139,5	111,5	6,0	9,1	10,0
6	108,5	139,3	112,2	8,1	12,1	12,1

Таблица 2

Параметры рабочего режима АД АО2-61 при межвитковом замыкании в обмотке фазы А

2p = 12							
№ п/п	$\Delta\Psi_{AB}$	$\Delta\Psi_{BC}$	$\Delta\Psi_{CA}$	$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$	$I_{ф.ср.}, A$
1	121,5	116,0	122,5	5,6	5,4	5,4	5,5
2	124,4	115,9	119,7	5,6	5,5	5,3	5,5
3	126,0	112,5	121,5	6,3	5,9	5,7	6
2p = 6							
№ п/п	$\Delta\Psi_{AB}$	$\Delta\Psi_{BC}$	$\Delta\Psi_{CA}$	$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$	$I_{ф.ср.}, A$
1	123,3	126,0	110,7	6,1	7,4	6,4	6,6
2	124,2	125,1	110,7	7,1	8,4	7,3	7,6
3	123,3	124,2	112,5	7,8	9,1	8,1	8,3

Согласно алгоритма работы системы диагностирования на основании параметров рабочего режима табл. 1, 2 выполнена фиксация сигналов системы обнаружения неисправностей обмоток статора. Результаты работы системы диагностирования приведены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Результаты работы системы диагностирования в лабораторных условиях

Обрыв параллельной ветви, 2p = 6			
№ п/п	Максимальное отклонение $\Delta\Psi$ от $120^0$	Обнаружение аномального режима работы	Обнаружение неисправности
1	16,5	обнаружен	обнаружена
2	17	обнаружен	обнаружена
3	17,1	обнаружен	обнаружена
Обрыв параллельной ветви, 2p = 4			
4	18	обнаружен	обнаружена
5	19,5	обнаружен	обнаружена
6	19,3	обнаружен	обнаружена

Из табл. 3 следует, что разработанный алгоритм и структура системы диагностирования позволяют обнаружить обрыв одной из двух параллельных ветвей фазной обмотки статора. Следует отметить, что данная неисправность была успешно обнаружена на двух независимых обмотках двигателя, что говорит о возможности использования методики диагностирования на двигателях различного типоразмера.

Таблица 4

Результаты работы системы диагностирования в лабораторных условиях

Межвитковое замыкание, 2p = 12			
№ п/п	Максимальное отклонение $\Delta\Psi$ от $120^0$	Обнаружение аномального режима работы	Обнаружение неисправности
1	4,0	обнаружен	обнаружена
2	4,1	обнаружен	обнаружена
3	7,5	обнаружен	обнаружена
Обрыв параллельной ветви, 2p = 6			
4	6,0	обнаружен	обнаружена
5	5,0	обнаружен	обнаружена

Из табл. 4 следует, что разработанная методика диагностирования позволяет с достаточной точностью обнаружить межвитковые замыкания обмотки статора.

Система диагностирования неисправностей статорных обмоток электродвигателей также использовалась для обследования технического состояния асинхронных двигателей компрессоров ООО «Краматорский холод».

Проведена оценка состояния электродвигателей: 4A225M4У3, двух двигателей 4АМС10034У3, двигателя 4АМ160М4. В ходе диагностирования выявлена несимметрия питающих напряжений с  $K_{2u} = 2-3\%$ . Результаты исследований показали, что несимметрия питающих напряжений привела к несимметрии фазных токов по начальной фазе. Однако ложного срабатывания системы диагностирования не выявлено.

Таким образом, опытный образец системы технического диагностирования показал высокую эффективность выявления неисправностей в обмотках статора. С целью дальнейшего совершенствования методик диагностирования планируется проведение дополнительных испытаний в производственных условиях.

## ВЫВОДЫ

Разработана система диагностирования неисправностей статорных обмоток асинхронных двигателей в рабочем режиме. В качестве диагностического показателя предложено использовать характер несимметрии величин токов и углов сдвига фаз между напряжениями и токами фазных обмоток статора. Как признак наличия неисправности с целью исключения ложных срабатываний при несимметрии питающей сети использована разность потенциалов между нулевой точкой обмоток статора и искусственно выделенной нейтралью питающей сети. Эффективность алгоритмов диагностирования подтверждена путем проведения испытаний в лабораторных условиях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родькин Д. И. К определению послеремонтной работоспособности асинхронных двигателей / Д. И. Родькин, А. П. Черный // Вісник Кременчуцького Державного політехнічного Університета. – 2001. – № 2. – С. 40–47.
2. Федоров М. М. Особенности теплового состояния асинхронных двигателей при несимметричном питающем напряжении / М. М. Федоров, О. Г. Пинчук // Вісник Кременчуцького Державного політехнічного Університета. – 2004. – № 2. – С. 122–125.
3. 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.
4. Вареник Е. А. Режимы работы асинхронных двигателей при неисправностях в обмотке статора / Е. А. Вареник, М. М. Федоров, А. А. Ткаченко // Сборник научных трудов УкрНИИВЭ : Взрывозащищенное электрооборудование. – Донецк : ООО «Юго-Восток, Лтд», 2010. – С. 143–147.
5. Федоров М. М. Особенности распределения магнитного поля асинхронного электродвигателя при неисправностях в обмотках статора / М. М. Федоров, А. А. Ткаченко // Вісник Кременчуцького Державного політехнічного Університета. – 2006. – № 3(38), ч. 2. – С. 96–98.
6. Федоров М. М. Особенности электромеханических и тепловых процессов в асинхронных электродвигателях при аномальных режимах работы / М. М. Федоров, А. А. Ткаченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – 2006. – №112. – С. 29–32. – (Серія «Електротехніка і енергетика»).
7. Федоров М. М. Тепловое состояние асинхронных двигателей при обрыве параллельной ветви фазной обмотки статора / М. М. Федоров, А. А. Ткаченко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету, Кременчук : КДПУ імені Михайла Остроградського, 2009. – № 4 (57) – С. 51–54.
8. Вареник Е. А. Математическое моделирование асинхронных электродвигателей в несимметричных режимах работы / Е. А. Вареник, М. М. Федоров, О. И. Толочко, А. А. Ткаченко // Електротехніка і електро-механіка. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2006.
9. Разработка метода и алгоритма диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных обмотках асинхронных двигателей [Электронный ресурс] / А. А. Ткаченко, А. А. Шульга, И. И. Полупан, А. Н. Беш // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – 2011. – № 2 (8Е). – С. 154–160. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_yesnik/2\\_8e\\_2011/article/11TAAWIM.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_yesnik/2_8e_2011/article/11TAAWIM.pdf).