

ЗАЩИТА ТРЕХФАЗНЫХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ОТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОБМОТОК

Панкратов А. И.

Приведена классификация принципов идентификации неисправностей обмоток машин переменного тока, выявлены их общие недостатки. Рассмотрена новая структура устройства защиты трехфазных машин переменного тока от повреждений обмоток, позволяющей повысить помехоустойчивость за счет адаптивности к изменениям несимметрии токов и напряжений в трехфазной сети. Приведена структурная схема перцептронной нейронной сети, распознающей все виды повреждений, включая витковые замыкания в обмотках машин переменного тока. Разработанная структура устройства защиты трехфазных машин переменного тока от неисправностей в обмотках позволяет повысить помехоустойчивость за счет адаптивности к изменениям несимметрии токов и напряжений в трехфазной сети.

Наведено класифікацію принципів ідентифікації пошкоджень обмоток машин змінного струму, виявлено їхні загальні недоліки. Розглянута нова структура пристрою для захисту трифазних машин змінного струму від пошкоджень обмоток, яка дозволяє підвищити заводостійкість за рахунок адаптивності до змін несиметрії струмів та напруг у трифазній мережі. Наведена структурна схема перцептронної нейронної мережі, яка розпізнає усі види пошкоджень, включно виткові замикання в обмотках машин змінного струму. Розроблена структура пристрою захисту трифазних машин змінного струму від несправностей в обмотках дозволяє підвищити заводостійкість за рахунок адаптивності до змін несиметрії струмів і напруг у трифазній мережі.

Classification of identification principles of winding fault of AC machines has given. Their common weaknesses are identified. We consider a new structure of the device protecting three-phase AC machines from winding damage, which increases the noise immunity at the adaptability expent to changes in unbalance currents and voltages in a three-phase network. The structure of neural net that recognizes all the faults types with interterm closure of winding AC machines has been given. The structure of the device protecting three-phase AC machine from faults in the windings, can improve the noise immunity at the expense of adaptability to changes in the asymmetry of currents and voltages in a three-phase network.

Панкратов А. И.

канд. техн. наук, доц. кафедры АПП ДГМА
app@dgma.donetsk.ua

УДК 621.313.33

Панкратов А. И.

ЗАЩИТА ТРЕХФАЗНЫХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ОТ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОБМОТОК

При витковых замыканиях в обмотках статора ток в поврежденных фазах повышается незначительно (2–10 %) [1–3], поэтому этот аварийный режим не отключается максимальными токовыми защитами от перегрузок и коротких замыканий. Разработка устройств, распознающих этот аварийный режим в начальной стадии развития, является актуальной задачей.

Возникновению витковых замыканий сопутствуют изменения нескольких физических параметров:

- изменение частотного спектра вибраций ротора;
- изменение гармонического состава токов статора;
- изменение сопротивлений изоляции;
- изменение мгновенной мощности;
- изменение распределения магнитного поля в зазоре между статором и ротором;
- возникновение угловой и токовой несимметрии токов и напряжений.

Разработаны устройства защиты асинхронных двигателей от витковых замыканий, работа которых основана на контроле параметров вибраций [4, 5], на контроле гармонического состава токов статора [6, 7], на контроле изменения сопротивлений изоляции [8], на контроле изменения мгновенной мощности [9], на контроле распределение магнитного поля в зазоре между статором и ротором [10].

Достаточно перспективными являются системы оценки состояния электрических машин, основанные на математическом моделировании объекта [11, 12], сравнении параметров модели с параметрами реального объекта.

Недостатками этих устройств является необходимость использования специального дорогостоящего оборудования и низкая помехоустойчивость.

Целью статьи является рассмотрение новой структуры устройства защиты трехфазных машин переменного тока от повреждений обмоток, позволяющей повысить помехоустойчивость за счет адаптивности к изменениям несимметрии токов и напряжений в трехфазной сети.

В ДГМА разработано устройство диагностирования и защиты трехфазных электрических машин [13], структурная схема которого приведена на рис. 1. Устройство работает следующим образом.

Датчики 1, 2, 3 тока непрерывно контролируют токи в фазах А, В, С обмоток статора трехфазной машины М. На выходах фазочувствительных детекторов 4, 5, 6 электрические сигналы пропорциональны углам φ_{ab} , φ_{bc} , φ_{ca} сдвига между векторами токов соответствующих фаз. Аналоговые сигналы, пропорциональные углам сдвига между векторами токов в фазах А, В, С и сигналы, пропорциональные этим токам, а также сигнал с выхода датчика напряжения 8, пропорциональный разности напряжений смещения нейтрали проводимостей 9, 10, 11 (точка «0», рис. 1) и статорной обмотки 12 (точка «n», рис. 1) последовательно с определенной частотой через коммутационные ключи мультиплексора 7 поступают на вход аналогово-цифрового преобразователя 13 и далее через устройство сопряжения 14, например, последовательный порт USB в цифровом коде в оперативную память ЭВМ 15. Поступающая информация по предварительно записанной программе непрерывно обрабатывается, а результаты выводятся на экран монитора ЭВМ или при возникновении аварийных режимов на устройство отключения машины М и устройство звуковой сигнализации.

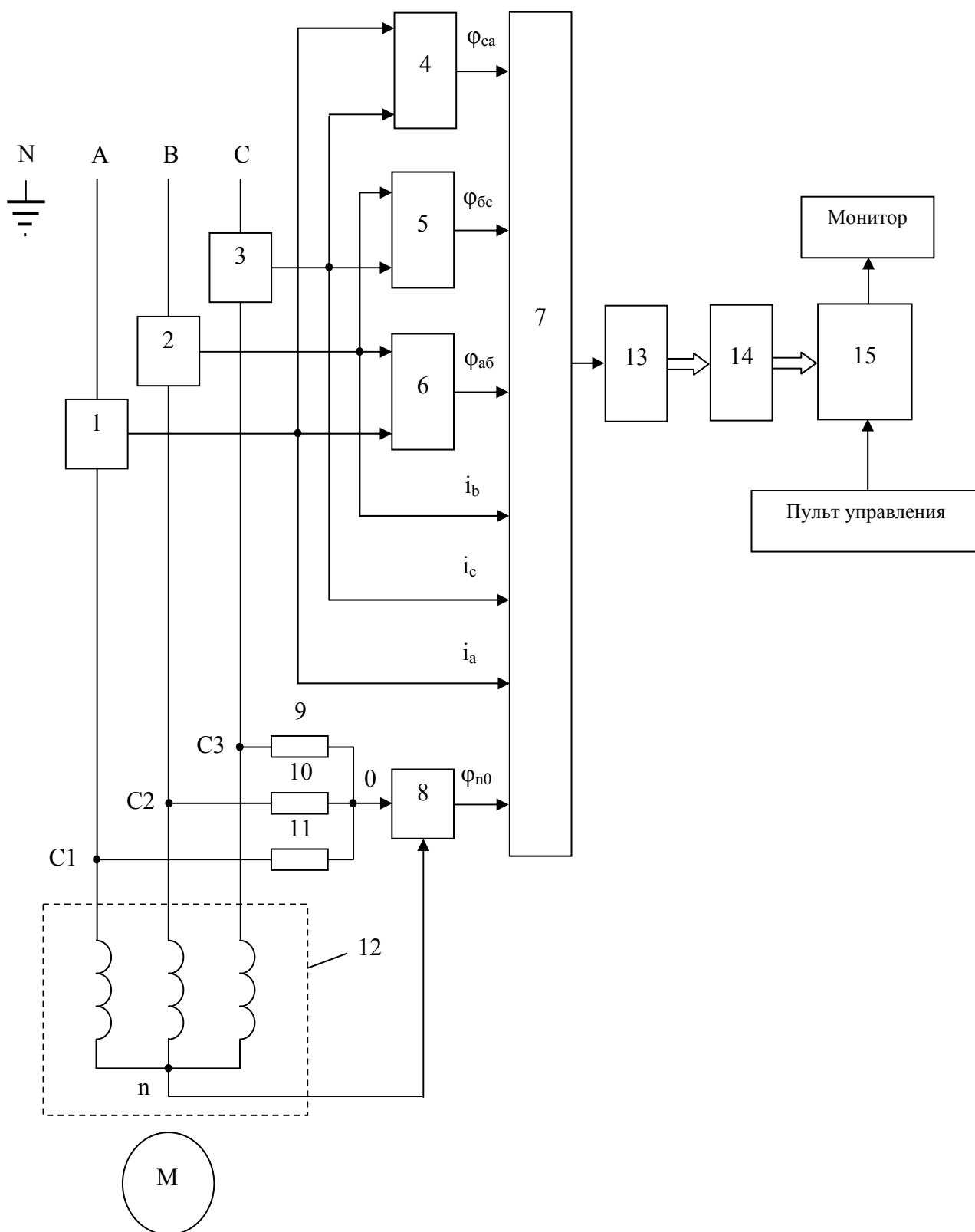


Рис. 1. Структурная схема устройства защиты трехфазной асинхронной машины

При исправной машине и возникновении угловой или амплитудной несимметрии напряжений питающей сети возникает несимметрия линейных токов i_a, i_b, i_c и несимметрия электрических сигналов пропорциональных углам $\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}$ сдвига между векторами токов соответствующих фаз. При этом система диагностики может ложно сработать.

Для исключения ложной работы системы диагностики в устройство введены три проводимости 9, 10, 11, (точка «0», рис. 1) подключенные по схеме «звезда» к зажимам С1, С2, С3 статорной обмотки 12 и датчик напряжения 8, подключенный первым входом к нейтрали проводимостей 9, 10, 11, вторым входом к нейтрали статорной обмотки (точка «п», рис. 1).

Напряжение между нейтралью «п» и «0»:

$$\bar{U}_{n0} = \bar{U}_{Nn} - \bar{U}_{N0}, \quad (1)$$

где \bar{U}_{Nn} – напряжение смещения нейтрали «п» статорной обмотки 12 относительно земли (точка «N», рис. 1);

\bar{U}_{N0} – напряжение смещения нейтрали «0» проводимости 9, 10, 11 относительно земли (точка «N», рис. 1);

$$\bar{U}_{Nn} = \frac{Y_A \bar{U}_A + Y_B \bar{U}_B + Y_C \bar{U}_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (2)$$

где Y_A, Y_B, Y_C – проводимости фазных обмоток статора;

$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$ – фазные напряжения питающей сети.

$$\bar{U}_{N0} = \frac{Y_{A0} \bar{U}_A + Y_{B0} \bar{U}_B + Y_{C0} \bar{U}_C}{Y_{A0} + Y_{B0} + Y_{C0}}, \quad (3)$$

где Y_{A0}, Y_{B0}, Y_{C0} – значения проводимостей 9, 10, 11.

Значения проводимостей Y_{A0}, Y_{B0}, Y_{C0} принимаются равными:

$$Y_{A0} = Y_{B0} = Y_{C0}. \quad (4)$$

При исправной электрической машине значения проводимостей Y_A, Y_{B0}, Y_{C0} равны между собой:

$$Y_A = Y_B = Y_C. \quad (5)$$

При возникновении, например, амплитудной несимметрии напряжений питающей сети:

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

С учетом (3), (4), (6) напряжение между нейтралью «п» и «0» при любой несимметрии напряжений питающей сети равно нулю:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{n0} &= \frac{Y_A \bar{U}_A + Y_B \bar{U}_B + Y_C \bar{U}_C}{Y_A + Y_B + Y_C} - \frac{Y_{A0} \bar{U}_A + Y_{B0} \bar{U}_B + Y_{C0} \bar{U}_C}{Y_{A0} + Y_{B0} + Y_{C0}} = \\ &= \frac{[Y_A + Y_B + Y_C] \cdot \bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C}{Y_A + Y_B + Y_C} - \frac{[Y_{A0} + Y_{B0} + Y_{C0}] \cdot \bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C}{Y_{A0} + Y_{B0} + Y_{C0}} = \\ &= [\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C] - [\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C] = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

При возникновении, например, амплитудной несимметрии напряжений питающей сети и неисправностей в обмотках статора дополнительно к условию (6) добавляется несимметрия проводимостей статора:

$$Y_A \neq Y_B \neq Y_C. \quad (8)$$

С учетом (3), (4), (6) и (8) напряжение между нейтралью «n» и «0» при любой несимметрии напряжений питающей сети и неисправностях в обмотке статора не равно нулю:

$$\bar{U}_{n0} = \frac{Y_A \bar{U}_A + Y_B \bar{U}_B + Y_C \bar{U}_C}{Y_A + Y_B + Y_C} - [\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C] \neq 0. \quad (9)$$

Таким образом, признаком возникновения любых неисправностей в обмотках статора является условие

$$\bar{U}_{n0} \neq 0. \quad (10)$$

Оценка степени и места и вида повреждения производится по количественным характеристикам:

$$\Delta i_{ab} \neq \Delta i_{bc} \neq \Delta i_{ca}, \quad (11)$$

и с помощью нейронной сети:

$$\varphi_{ab} \neq \varphi_{bc} \neq \varphi_{ac}. \quad (12)$$

Обработка поступающей от всех датчиков информации проводится по нейросетевой технологии.

На рис. 2 показана структура перцептронной нейронной сети, реализованная в ЭВМ программно, которая распознает входные векторы, соответствующие каждой из перечисленных неисправностей трехфазной электрической машины М.

Однослойная нейронная сеть состоит из входного слоя $J1 \dots J7$, нейроны которого выполняют функции распределения входных сигналов $\varphi_{ab}, \varphi_{bc}, \varphi_{ca}, \Delta i_{ab}, \Delta i_{bc}, \Delta i_{ca}, U_{n0}$. Активный слой нейронной сети состоит из 6 нейронов, связанных между собой передачами w_{ij} , $i = 1, 2 \dots 7, j = 1, 2 \dots 7$.

Выходные сигналы нейронов определяются зависимостями:

$$NET1 = \varphi_{ab} w_{11} + \varphi_{bc} w_{21} + \varphi_{ca} w_{31} + \Delta i_a w_{41} + \Delta i_b w_{51} + \Delta i_c w_{61} + U_{n0} w_{71};$$

$$NET2 = \varphi_{ab} w_{12} + \varphi_{bc} w_{22} + \varphi_{ca} w_{32} + \Delta i_a w_{42} + \Delta i_b w_{52} + \Delta i_c w_{62} + U_{n0} w_{72};$$

$$NET3 = \varphi_{ab} w_{13} + \varphi_{bc} w_{23} + \varphi_{ca} w_{33} + \Delta i_a w_{43} + \Delta i_b w_{53} + \Delta i_c w_{63} + U_{n0} w_{73};$$

$$NET4 = \varphi_{ab} w_{14} + \varphi_{bc} w_{24} + \varphi_{ca} w_{34} + \Delta i_a w_{44} + \Delta i_b w_{54} + \Delta i_c w_{64} + U_{n0} w_{74};$$

$$NET5 = \varphi_{ab} w_{15} + \varphi_{bc} w_{25} + \varphi_{ca} w_{35} + \Delta i_a w_{45} + \Delta i_b w_{55} + \Delta i_c w_{65} + U_{n0} w_{75};$$

$$NET6 = \varphi_{ab} w_{16} + \varphi_{bc} w_{26} + \varphi_{ca} w_{36} + \Delta i_a w_{46} + \Delta i_b w_{56} + \Delta i_c w_{66} + U_{n0} w_{76}.$$

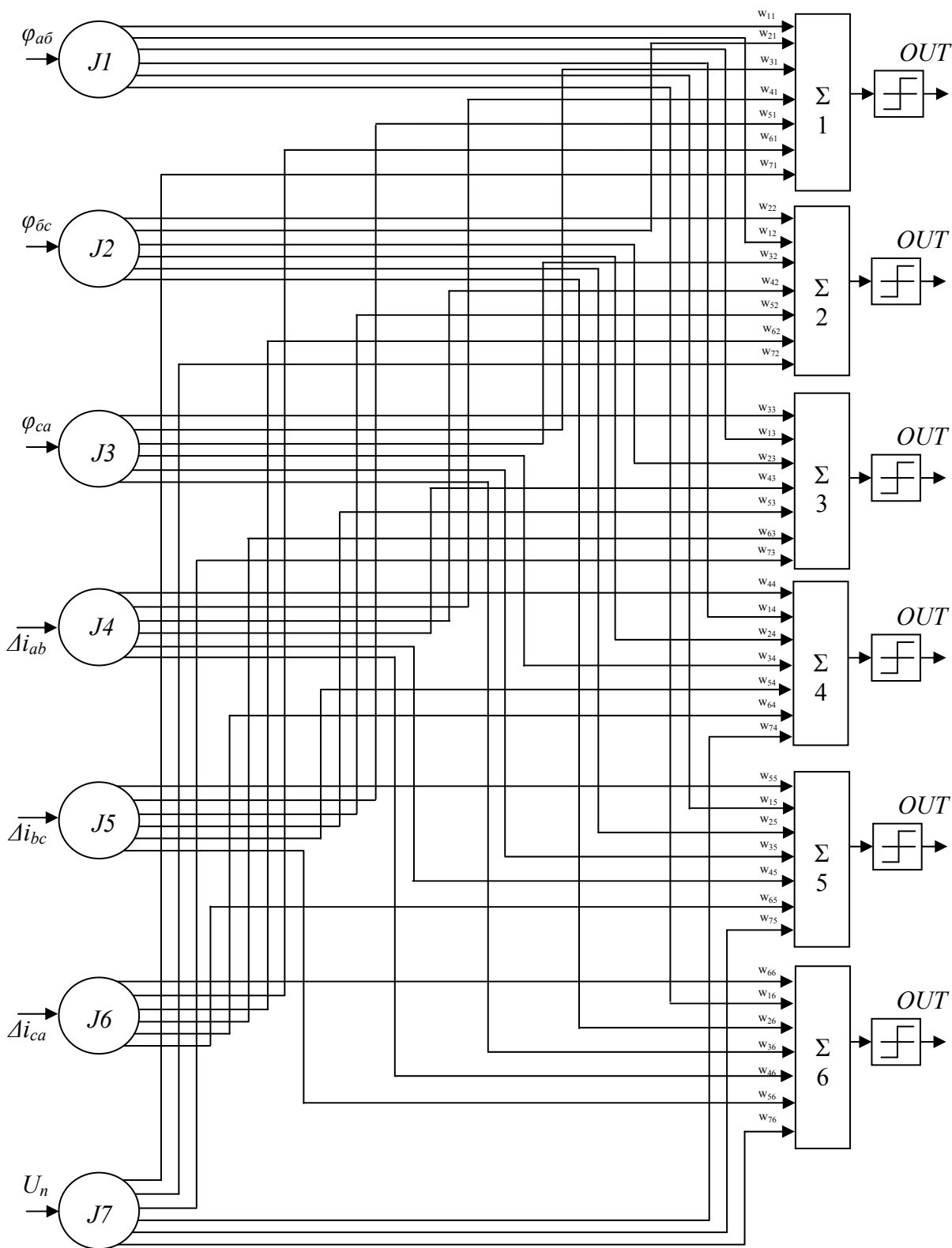


Рис. 2. Структурная схема перцептронной нейронной сети, распознающей витковые замыкания в обмотках машин переменного тока

Шесть выходных сигналов нейронной сети определяются свойствами бинарных активационных функций и соответствуют шести видам неисправностей машины М:

$OUT1 \dots OUT6 = 0$, если машина М исправна;

$OUT1 = 1$, если произошло витковое замыкание в обмотках статора или ротора;

$OUT2 = 1$, если произошел обрыв любой из фаз обмотки статора или ротора;

$OUT3 = 1$, если плохой контакт в цепях обмотки статора или ротора;

$OUT4 = 1$, если произошел обрыв параллельной ветви обмотки статора;

$OUT5 = 1$, если произошло междуфазное короткое замыкание;

$OUT6 = 1$, если произошла токовая перегрузка;

Каждому из этих неисправностей соответствует определенное сочетание значений входных векторов.

Так, например, исправному состоянию машины М соответствуют значения углов между векторами токов в фазах $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = 2\pi/3$.

При витковом замыкании в обмотке фазы А $\varphi_{ab} < \varphi_{bc} < \varphi_{ca}$, $\Delta i_a < \Delta i_b = \Delta i_c$.

При обрыве фазы В обмотки статора ток $\Delta i_b = 0$, $\Delta i_a = \Delta i_c$.

При междуфазных коротких замыканиях и токовых перегрузках значения токов значительно превышают номинальные токи.

ВЫВОДЫ

Разработанная структура устройства защиты трехфазных машин переменного тока от неисправностей в обмотках, позволяет повысить помехоустойчивость за счет адаптивности к изменениям несимметрии токов и напряжений в трехфазной сети.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкратов А. И. Проблемы диагностики асинхронных машин / А. И. Панкратов, А. А. Ткаченко, Н. В. Изченко // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2004. – № 43. – С. 182–183.
2. Singh G.K. Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research – a survey / G. K. Singh, A. S. K. Sa'ad // Electric Power Systems Research. – 2003. – Vol. 64. – P. 145–158.
3. Федоров М. М. Режимы работы асинхронных электродвигателей при неисправностях обмотки статора / М. М. Федоров, О. И. Толочко, А. А. Ткаченко // Взрывозащищенное электрооборудование : сборник научных трудов УкрНННВЭ. – Донецк : ООО «Юго-Восток, ЛТД», 2006. – С. 320–325.
4. А. с. 2287142 РФ, МПК G01M 15/04. Способ диагностики и прогнозирования технического состояния двигателей / А. А. Зобенко, В. А. Хабузов, В. Ф. Худяков. – № 2005118135/06; заявлено 10.06.2005; опубл. 20.09.2005, Бюл. № 31. – 5 с.
5. А. с. 2005118135 РФ, МПК G01M 1/00. Способ диагностики и прогнозирования технического состояния двигателей / А. А. Зобенко, В. А. Хабузов, В. Ф. Худяков. – № 2005118135/06; заявлено 10.06.2005; опубл. 20.09.2005, Бюл. № 26. – 2 с.
6. Diagnosis of the electrical motors of a train using self-organised maps / Sanz-Bobi M. A., Besada J., Palacios R., Muñoz A., García-Escudero R., Pérez Alonso M., Matesanz A. L. // 3rd IEEE International symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives. – 2001. – P. 345–349.
7. Sanz Bobi M. A. Condition monitoring of a hydraulic pump using a self-organising map / M. A. Sanz Bobi, J. Gilmartin // Proceedings of the Scientific Conference Artificial Intelligence in Industry. – High Tatras, Slovakia, 1998. – P. 267.
8. Bin Huo Stator Fault Detector for AC Motors Based on the TMS320F243 DSP Controller / Huo Bin, A. M. Trzgnadlowski // Electric Machines and Drives Conference IEMDC. – IEEE International. – 2001. – P. 192–194.
9. Черный А. П. Особенности нагрева и охлаждения проводников обмоток электрических двигателей / А. П. Черный, А. Артеменко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2002. – № 1 (12). – С. 205–207.
10. А. с. 2150711 РФ, МПК G01R 31/34. Устройство контроля витковых замыканий в обмотке якоря и индуктора синхронной машины / А. В. Епремян, С. В. Семергей, Н. В. Руденко, Н. К. Колесников, А. М. Оробинский, Р. И. Лесниченко, М. В. Вербов, Д. А. Егоров, М. А. Бондаренко. – № 99108173/09; заявлено 16.04.1999; опубл. 10.06.2000. – 2 с.
11. Su Hua A novel method for high-performance fault detection of induction machine / Su Hua, Yeong-Min K., Kil C // ICMIT 2005. Information Systems and Signal Processing. – 2005. – Vol. 6041. – P. 493–498.
12. Толочко О. И. Векторные модели асинхронных электродвигателей в среде пакета MatLab / О. И. Толочко, Г. С. Чекавский, Д. М. Мирошник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2003. – № 2. – С. 92–99.
13. Пат. 39750 Україна, МКП(2006) H02H 7/00. Пристрій діагностики трифазних електричних машин / Панкратов А. І., Ткаченко А. О. – Заявлено 07.10.2008, опубл. 10.03.2009, Бюл № 5.

Статья поступила в редакцию 17.10.2011 г.