

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218>

УДК 621.313.33

## **Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя**

**И. В. Жежеленко<sup>1)</sup>, В. Е. Кривоносов<sup>1)</sup>, С. В. Василенко<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Азовский морской институт Национального университета «Одесская морская академия»  
(Мариуполь, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2021  
Belarusian National Technical University, 2021

**Реферат.** В электротехнических комплексах промышленных предприятий, морских портов, судов более 80 % оборудования составляют асинхронные двигатели. В ряде случаев они работают с резко переменной нагрузкой, в условиях агрессивной среды, при этом получают питание от сети с отклонениями показателей качества электроэнергии от нормативных, что приводит к высокой повреждаемости. Около 40 % случаев повреждения изоляции обмоток асинхронных двигателей составляют витковые замыкания. Несвоевременное выявление начального момента появления дефектов в асинхронных двигателях или нарушения режимов работы питающей сети и токовых цепей приводит к аварийным ситуациям электротехнического комплекса, простоем оборудования и ущербу. В статье рассмотрены вопросы диагностики неполнофазных режимов токовых цепей, напряжений сети и витковых замыканий в статорных обмотках асинхронных двигателей, получающих питание от сети в условиях несимметрии напряжений. Проведен анализ векторных диаграмм токов, напряжений и дополнительных фазовых углов сдвига фазных токов, возникающих при несимметрии напряжений сети и межвитковых замыканиях. Полученные результаты позволили сформулировать критерии выявления начального момента виткового замыкания и двухфазных режимов сети и токовых цепей при стационарных режимах. Разработаны способ неразрушающего контроля состояния асинхронного двигателя, а также устройство для его реализации. Способ основан на сравнении векторов измеренных фазных токов с их расчетными значениями. Приведены результаты моделирования изменения векторов фазных токов от количества замкнутых витков в обмотке асинхронного двигателя. Установлен мощностной ряд асинхронных двигателей, для которых чувствительность выявления начального момента межвиткового замыкания максимальная. Получены аналитические результаты зависимости коэффициента чувствительности при межвитковых замыканиях от абсолютного приращения модулей фазных токов и соответствующих фазовых углов.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, межвитковые замыкания, несимметрия напряжений сети, отклонения напряжений, векторная диаграмма, критерии диагностики, защита электродвигателя, моделирование, чувствительность защиты, неразрушающий контроль

**Для цитирования:** Жежеленко, И. В. Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя / И. В. Жежеленко, В. Е. Кривоносов, С. В. Василенко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 202–218. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218>

---

### **Адрес для переписки**

Кривоносов Валерий Егорович  
Азовский морской институт Национального  
университета «Одесская морская академия»  
ул. Черноморская, 19,  
87517, г. Мариуполь, Украина  
Тел.: +380 97 821-73-25  
inteh@ami.edu.ua

### **Address for correspondence**

Kryvonosov Valerii E.  
Azov Maritime Institute National  
University "Odessa Maritime Academy"  
19, Chornomors'ka str.,  
87517, Mariupol, Ukraine  
Tel.: +380 97 821-73-25  
inteh@ami.edu.ua

---

## Criteria for Detecting Turn-To-Turn Short Circuit in Stator Windings Using Vector Analysis of Electric Motor Phase Currents

I. V. Zhezhelenko<sup>1)</sup>, V. E. Kryvonosov<sup>1)</sup>, S. V. Vasilenko<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Azov Maritime Institute National University "Odessa Maritime Academy"  
(Mariupol, Ukraine)

**Abstract.** At industrial enterprises, seaports, ships, more than 80 % of all electrical engineering equipment is asynchronous motors. In a number of cases, asynchronous motors operate with a sharply variable load, in an aggressive environment; herewith they receive power from the network with deviations of the power quality indicators from the normative ones, which causes their high damageability. Turn circuits in the stator windings account for about 40 % of cases of damage to the insulation of the asynchronous motors windings. Untimely detection of the initial moment of the appearance of defects in the asynchronous motors or disruption of the operating modes of the supply network and current circuits result in emergency situations of the electrical complex, equipment downtime and damage. The article discusses the issues of diagnostics of non-full-phase modes of current circuits, mains voltages and turn circuits in the stator windings of the asynchronous motors that receiving power from the networks in conditions of voltage asymmetry. The analysis of the vector diagrams of currents, voltages and additional phase angles of the phase currents displacement arising from the asymmetry of the mains voltages and turn circuits in the stator windings has been fulfilled. The results obtained made it possible to formulate criteria for identifying the initial moment of the turn circuit and two-phase modes, both in the network and in current circuits, in stationary modes. A method for non-destructive testing of the asynchronous motors state as well as a device for its implementation has been developed. The method is based on comparing the vectors of the measured phase currents of the asynchronous motors with their calculated values. The article presents the results of modeling the change in the vectors of phase currents from the number of closed turns in the winding of the asynchronous motors. The power series of asynchronous motors was established, for which the sensitivity of detecting the initial moment of the turn-to-turn short circuit is maximum. Analytical results of the dependence of the sensitivity coefficient for turn-to-turn short circuit on the absolute increment of the modules of phase currents and the corresponding phase angles have been obtained.

**Keywords:** asynchronous motor, turn-to-turn short circuit, mains voltage unbalance, voltage deviations, vector diagram, diagnostic criteria, motor protection, simulation, protection sensitivity, non-destructive testing

**For citation:** Zhezhelenko I. V., Kryvonosov V. E., Vasilenko S. V. (2021) Criteria for Detecting Turn-To-Turn Short Circuit in Stator Windings Using Vector Analysis of Electric Motor Phase Currents. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 202–218. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218> (in Russian)

### Введение

Простота конструкции и эксплуатационные качества асинхронных двигателей (АД) позволяют применять их в электротехнических комплексах промышленных предприятий, морских портов, судов и других отраслях. При эксплуатации АД в условиях, отличных от нормативных, срок их службы снижается в 2–5 раз [1]. Как правило, это вызвано снижением диэлектрической прочности изоляции обмоток статора, влиянием окружающей среды, технологическими перегрузками и др. [2]. Так, 70–80 % аварийных выходов АД происходят в результате повреждения изоляции, из них до 40 % случаев пробоя изоляции обмотки статора АД связаны с витковыми замыканиями. Стоит отметить, что витковые замыкания на ранней стадии (1,5 % короткозамкнутых витков обмотки статора от общего числа), а также несимметричные отклонения напряжений питающей сети, значения которых не превышают величин, нормируемых ГОСТ 13109–97,

не приводят к значительным перекасам токов в фазах АД. При таких условиях АД продолжает работать в обычном режиме, но в местах межвитковых замыканий, когда индуктивность статорной обмотки снижается на 10–15 %, ток в поврежденной обмотке может как увеличиваться на 15–18 % от рабочей величины, так и снижаться, симметрируя остальные фазные токи АД. Увеличение токов в местах межвиткового замыкания приводит к дополнительному локальному нагреву изоляции соседних неповрежденных витков и развитию двух-, трехфазных замыканий и замыканий на корпус [3].

Выявление неполнофазных режимов (токовых и напряжений сети), начального момента образования виткового замыкания в статорной обмотке АД является сложной задачей [4–6], особенно когда АД получает питание от сети с изменяющимися показателями качества электроэнергии (ПКЭ). Своевременное диагностирование аномальных режимов работы АД позволяет безаварийно провести коммутационные переключения и планово вывести оборудование для проведения профилактического ремонта, а значит, снизить аварийность электротехнического комплекса в целом.

#### **Анализ последних исследований и публикаций**

Методы диагностики межвитковых замыканий как в моменты технологических пауз, так и в процессе эксплуатации АД рассмотрены во многих отечественных и зарубежных работах.

Многочисленными и наиболее изученными являются методы тестовой диагностики [7]: в обмотке статора АД возбуждают магнитное поле, с помощью датчика выявляют его неоднородность, которая выступает критерием определения места виткового замыкания.

В [8] измерена электродвижущая сила и зафиксирована скорость ее затухания, проведено сравнение этих данных со значениями, полученными после отключений электродвигателя от сети.

Анализ методов тестовой диагностики проведен в [9]. Показано, что основная погрешность связана с нестабильностью работы измерительной аппаратуры. Для повышения достоверности выявления дефектов в обмотках АД с помощью указанных методов необходимо проводить измерения характерных частотных составляющих измеряемого сигнала.

Известен метод непрерывной диагностики, основанный на контроле потребляемого тока [10], в котором измеряют линейные напряжения питающей сети и фазные токи АД, определяют величины коэффициентов несимметрии напряжения и тока, а также температуру статора двигателя. По максимальному значению коэффициента несимметрии напряжения судят о неполнофазном режиме питающей сети, по максимальному значению коэффициента несимметрии тока – об обрыве токовой цепи. Разница значений величин коэффициентов несимметрии тока и напряжений и повышенная температура обмотки статора АД указывают на витковое замыкание.

В [11] разработан способ защиты АД от витковых замыканий: одновременно измеряют амплитуды первой и резонансных гармоник тока и измеряют их частоты, существующие в диапазоне изменения индуктивности АД от пуска до установившегося режима.

В [12] представлен метод, основанный на формировании годографа вектора вращающегося магнитного поля и сравнении его с годографами векторов вращающихся магнитных полей исправного АД.

Методы тестовой диагностики нашли широкое применение при анализе до- и послеремонтных состояний АД. Оборудование для проведения тестов получает только симметричное питающее напряжение, что обеспечивает заданные чувствительность и достоверность выявления межвитковых замыканий.

Известные методы диагностики витковых замыканий в статорных обмотках АД не позволяют определить начальный момент их появления при изменяющихся ПКЭ питающей сети. В устройствах, реализующих эти способы, наличие несимметрии напряжения питающей сети требует снижения чувствительности за счет увеличения зоны доверительных интервалов, а в ряде случаев достоверно выявить начальный момент образования межвиткового замыкания невозможно.

Для изучения влияния ПКЭ питающей сети на диагностику межвитковых замыканий в обмотках статора АД проведены измерения уровней напряжения, частоты, изменения коэффициента несимметрии сети на шинах трансформаторных подстанций мощностью 136 и 250 кВт Мариупольского морского торгового порта.

Графики изменения усредненных на интервале в одну минуту действующих значений фазных напряжений на шинах 0,4 кВ подстанции ТП-4А приведены на рис. 1. Минимальные и максимальные действующие значения напряжения составили: 225,1 и 235,24 В – для фазы А; 225,92 и 236,98 В – для фазы В; 225,1 и 236,12 В – для фазы С. Математические ожидания фазных напряжений 230,86, 231,38, 230,75 В для фаз А, В и С соответственно. С вероятностью 95 % фазные напряжения находились в пределах: 227,4–233,9 В – для фазы А; 227,8–234,5 В – для фазы В; 227,5–233,7 В – для фазы С.

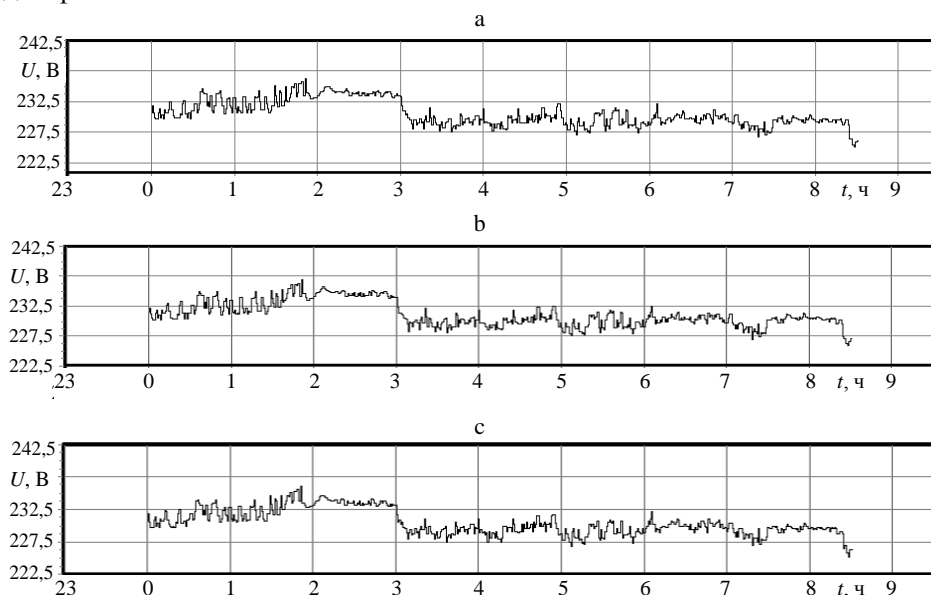


Рис. 1. Графики действующих значений фазных напряжений 0,4 кВ подстанции ТП-4А: а – фаза А; б – фаза В; с – фаза С

Fig. 1. The graphs of the effective values of the phase voltages of 0.4 kV of the TP-4A substation: a – phase A; b – phase B; c – phase C

Графики изменения частоты и коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ подстанции ТП-4А приведены на рис. 2. Математическое ожидание частоты сети составило 49,968 Гц, что не превышает нормируемого значения. Размах коэффициента несимметрии питающей сети 0,08–0,33 %.

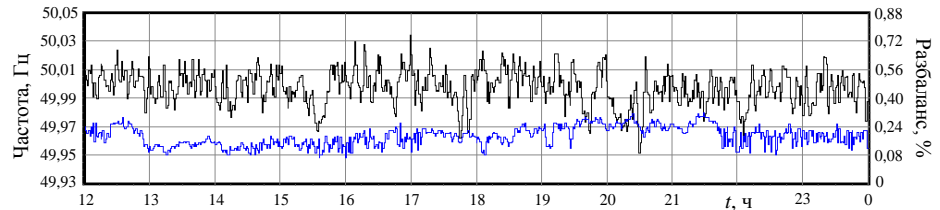


Рис. 2. Графики изменений частоты (черная кривая) и коэффициента несимметрии напряжений (синяя кривая) на шинах 0,4 кВ подстанции ТП-4А

Fig. 2. Graphs of changes in frequency (black) and voltage unbalance coefficient (blue) on 0.4 kV buses of the TP-4A substation

Графики (рис. 1, 2) показывают, что промышленные сети успешно работают с отклонениями ПКЭ, не превышающими значений, установленных ГОСТ 13109–97, и незначительно, но влияют на распределение фазных токов в обмотках АД [13]. Анализ результатов научных публикаций в области диагностики межвитковых замыканий в статорных обмотках АД показал, что влияние ПКЭ питающей сети на достоверность и чувствительность выявления начального момента межвиткового замыкания изучено недостаточно.

Цель данного исследования – усовершенствование метода выявления начального момента появления виткового замыкания в обмотках статора АД на основании векторного анализа фазных токов, контроля неполнофазных режимов тока и напряжений питающей сети в условиях изменяющихся ПКЭ питающей сети.

### Проведение исследований

Изменяющиеся уровни фазных напряжений питающей сети и межвитковые замыкания приводят к изменению уровней токов и фазовых углов в обмотке статора АД. Векторные диаграммы (без учета масштаба) фазных токов, напряжений питающей сети, фазовых углов между токами и напряжениями и дополнительных углов сдвига фазных токов, вызванных несимметрией напряжений сети, витковыми замыканиями и их совместным воздействием, приведены на рис. 3.

Обозначения на рис. 3:  $U_a, U_b, U_c$  – симметричные фазные напряжения;  $I_a, I_b, I_c$  – рабочие фазные токи при симметричном напряжении;  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$  – фазовые углы между напряжениями  $U_a, U_b, U_c$  и токами  $I_a, I_b, I_c$ ;  $U'_a, U'_b, U'_c$  – фазные напряжения при несимметричном питающем напряжении;  $I'_{bU}, I'_{cU}$  – фазные токи, вызванные несимметрией фазных напряжений;  $\Delta\varphi_n, \Delta\varphi_m$  – дополнительные углы сдвига фазных напряжений при несимметрии;  $\varphi'_{bU}, \varphi'_{cU}$  – фазовые углы между фазными напряжениями  $U'_b, U'_c$  и токами  $I'_{bU}, I'_{cU}$ ;  $\Delta\varphi_{bU}, \Delta\varphi_{cU}$  – дополнительные углы сдвига фазных токов, вызванные несимметрией и отклонением напряжений, равные  $\Delta\varphi_m, \Delta\varphi_n$  соответственно;  $I'_{aR}$  – фазный ток, вызванный витковым замыканием в параллельных проводниках катушки обмотки фазы А;  $\varphi'_{aR}$  – фазовый угол между  $U_a$  и  $I'_{aR}$ ;  $\Delta\varphi_{aR} = \varphi_a - \varphi'_{aR}$  – дополнительный угол сдвига фазного тока при витковых замыканиях в парал-

лельных проводниках;  $I'_{aZ}$  – фазный ток, вызванный витковым замыканием в обмотке фазы  $A$ , намотанной одним проводником;  $\varphi'_{aZ}$  – фазовый угол между  $U_a$  и  $I'_{aZ}$  ( $\varphi'_{bZ}, \varphi'_{cZ}$  для фаз  $B, C$  соответственно);  $\Delta\varphi_{aZ} = \varphi_a - \varphi'_{aZ}$  – дополнительный угол сдвига фазного тока при витковых замыканиях в обмотке фазы  $A$ ;  $I'_a, I'_b, I'_c$  – фазные токи при несимметричных напряжениях и витковом замыкании в одной из фаз;  $\varphi'_b, \varphi'_c$  – фазовые углы между фазными напряжениями  $U'_b, U'_c$  и токами  $I'_b, I'_c$ ;  $\Delta\varphi_b = \Delta\varphi_m + \Delta\varphi_{bZ}$  – дополнительный угол сдвига фазного тока при совместном воздействии отклонения напряжений и витковых замыканий в фазе  $B$ .

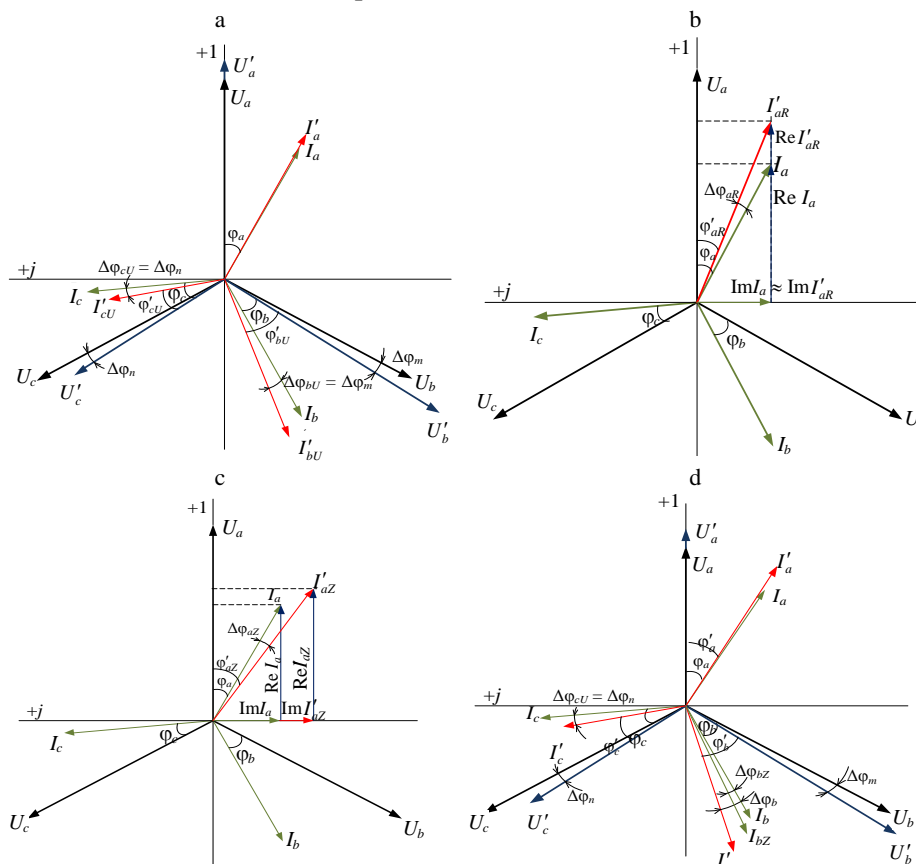


Рис. 3. Векторные диаграммы фазных токов асинхронных двигателей и напряжений в условиях симметрии и несимметрии напряжений сети для различных видов межвитковых замыканий в обмотках: а – отсутствие межвиткового замыкания при несимметричных напряжениях питающей сети; б – замыкание в параллельных проводниках катушки статорной обмотки фазы  $A$  при симметричных напряжениях питающей сети; в – межвитковое замыкание в однопроводной катушке статорной обмотки асинхронного двигателя при симметричных напряжениях питающей сети; д – межвитковое замыкание в катушке при несимметричных напряжениях сети

Fig. 3. Vector diagrams of asynchronous motors phase currents and voltages in conditions of symmetry and asymmetry of the mains voltages for various types of turn-to-turn short circuits in the stator windings of the asynchronous motor: а – absence of turn-to-turn short circuit at asymmetrical supply voltage; б – short circuit in parallel conductors of the stator winding coil of phase  $A$  in conditions of symmetrical supply voltage; в – turn-to-turn short circuit in a single-phase winding of the asynchronous motor, under conditions of symmetrical supply voltage; д – turn-to-turn short circuit in the coil at unbalanced mains voltages

Анализ векторов токов и напряжений (рис. 3):

– увеличение или уменьшение уровней фазных токов  $I'_{bU}$ ,  $I'_{cU}$  и фазовых углов  $\varphi'_{bU}$ ,  $\varphi'_{cU}$  обусловлено изменением уровней фазных (или линейных) напряжений сети  $U'_a$ ,  $U'_b$ ,  $U'_c$  (рис. 3а);

– замыкание параллельных проводников в катушке статорной обмотки АД, например фазы  $A$ , приводит к увеличению активной составляющей фазного тока  $I'_{aR}$  и, соответственно, фазового угла  $\varphi'_{aR}$  (рис. 3б);

– витковое замыкание в однослойной обмотке, выполненной одним проводом, приводит к изменению вектора фазного тока  $I'_{aZ}$  и дополнительного фазового угла  $\Delta\varphi'_{aZ}$  (рис. 3с);

– витковое замыкание в катушке, в данном случае в обмотке фазы  $B$ , при изменяющихся уровнях напряжений  $U'_a$ ,  $U'_b$ ,  $U'_c$  неоднозначно изменяет величины векторов фазных токов  $I'_a$ ,  $I'_b$ ,  $I'_c$  и дополнительных углов  $\Delta\varphi_b$ ,  $\Delta\varphi_{cU}$  (рис. 3д). При максимальном значении уровней напряжений, поданных на обмотку с межвитковым замыканием, фазные токи могут увеличиваться ( $I'_a$ ,  $I'_b$ ), при минимальном – уменьшаться ( $I'_c$ ).

Для выявления начального момента межвиткового замыкания в обмотке и защиты АД от неполнофазных режимов сети и обрыва токовых цепей разработан метод, основанный на сравнении величин измеренных фазных токов  $I'_a$ ,  $I'_b$ ,  $I'_c$  и фазовых углов  $\varphi'_a$ ,  $\varphi'_b$ ,  $\varphi'_c$  с расчетными значениями соответствующих токов  $I_{ap}$ ,  $I_{bp}$ ,  $I_{cp}$  и углов  $\varphi_{ap}$ ,  $\varphi_{bp}$ ,  $\varphi_{cp}$ .

Величины рабочего и расчетного токов АД зависят от мощности, уровней напряжений и частоты сети, схемы соединения обмоток и их конструкции, точности определения параметров схемы замещения. Проведенные исследования показали, что изменения величин токов при наличии межвиткового замыкания в статорной обмотке зависят от паспортной мощности и конструкции АД. Определить область использования метода позволяет анализ зависимости коэффициентов чувствительности изменений фазного тока  $\Delta I'_{aZ}$  при витковом замыкании в фазе  $A$  и фазового угла сдвига  $\Delta\varphi'_{aZ}$  от количества замкнутых витков в катушке обмотки.

Коэффициенты чувствительности по току  $k_{\Delta I}$ , фазовому углу  $k_{\Delta\varphi}$  и коэффициент изменения числа витков в пазу  $k_{\Delta w}$  определяются по выражениям:

$$k_{\Delta I} = \frac{\Delta I'_{aZ}}{I'_a}; \quad (1)$$

$$k_{\Delta\varphi} = \frac{\Delta\varphi'_{aZ}}{\varphi'_a}; \quad (2)$$

$$k_{\Delta w} = \frac{w_k}{S_n}, \quad (3)$$

где  $w_k$  – количество замкнутых витков в пазу;  $S_n$  – количество витков в пазу обмотки.

Графики зависимости коэффициентов чувствительности  $k_{\Delta\varphi}$ ,  $k_{\Delta I}$  от коэффициента  $k_{\Delta w}$  для двигателей мощностью 0,75; 1,1; 5,5; 15; 22; 55; 75 кВт приведены на рис. 4.

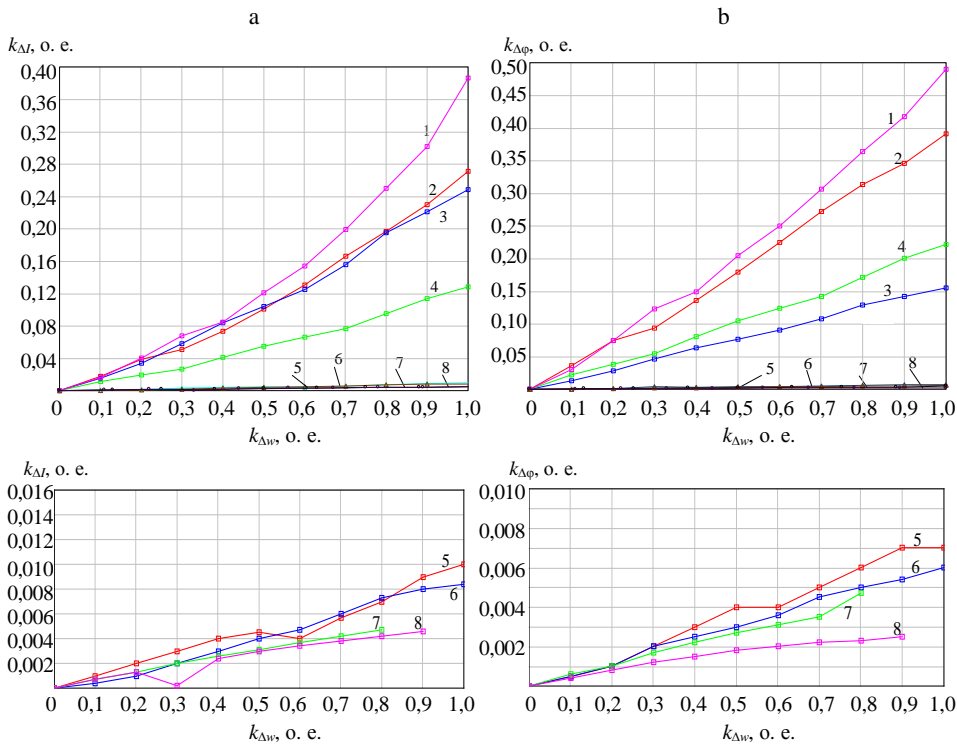


Рис. 4. Зависимости от  $k_{\Delta w}$  коэффициентов:  
 а – чувствительности фазного тока  $k_{\Delta I}$ ;  
 б – чувствительности сдвига фазового угла  $k_{\Delta\varphi}$ ;  
 1 – 4А160М6У3 15 кВт; 2 – 4А71А4У3 0,75 кВт; 3 – 4А112М4У3 5,5 кВт;  
 4 – 4А80А4У3 1,1 кВт; 5 – 4А160S4У3 15 кВт; 6 – 4А180S4У3 22 кВт;  
 7 – 4А250М6У3 55 кВт; 8 – 4А250S4У3 75 кВт

Fig. 4. Dependencies on  $k_{\Delta w}$  of coefficients:  
 а – current sensitivity  $k_{\Delta I}$ ; б – phase angle sensitivity  $k_{\Delta\varphi}$ ;  
 1 – 4A160M6U3 15 kW; 2 – 4A71A4U3 0,75 kW; 3 – 4A112M4U3 5,5 kW;  
 4 – 4A80A4U3 1,1 kW; 5 – 4A160S4U3 15 kW; 6 – 4A180S4U3 22 kW;  
 7 – 4A250M6U3 55 kW; 8 – 4A250S4U3 75 kW

Анализ графиков (рис. 4) показывает, что для АД мощностью 15 кВт и выше, имеющих одно- и двухслойные обмотки с параллельными проводниками, изменение приращений векторов фазных токов, даже при 90 % замкнутых витков в пазу, – аварийный режим, коэффициенты чувствительности стремятся к нулю, что не позволяет применять метод, основанный на анализе векторных величин.

Для АД мощностью 15 кВт и ниже с обмотками, выполненными намотанными одним проводом катушками, изменение коэффициентов чувствительности от 2 % при замыкании 10 % витков пазы (что соответствует 2–8 виткам) позволяет использовать предложенный метод.



Блок-схема устройства, реализующего метод диагностики и защиты АД от аномальных режимов сети и токовых цепей, а также позволяющего выявлять начальный момент межвиткового замыкания в статорной обмотке, приведена на рис. 5.

В устройстве непрерывно контролируются параметры питающей сети и АД. Отсутствие одного из фазных токов и наличие трех линейных напряжений выявляет неполнофазный режим токовых цепей. Отсутствие одного из линейных напряжений указывает на неполнофазный режим питающей сети. Выявленный неполнофазный режим сопровождается сигнализацией, и с выдержкой времени 2–2,5 постоянного нагрева АД отключается от сети или блокируется от подключения к сети. Выявление начального момента появления межвиткового замыкания сопровождается сигнализацией. При достижении критической величины замкнутых витков в пазу (более 10 %) АД отключается от сети.

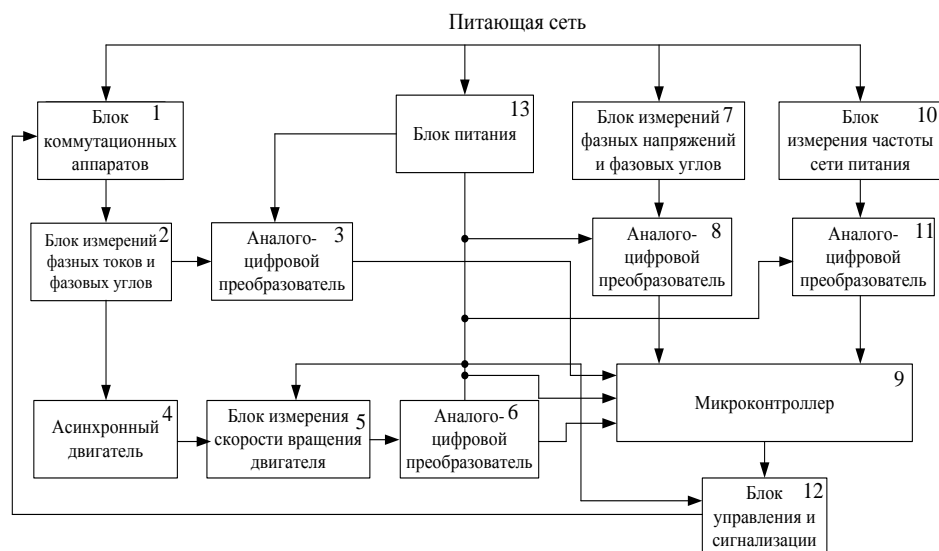


Рис. 5. Блок-схема устройства диагностики и защиты асинхронного двигателя

Fig. 5. Block diagram of the device for diagnostics and protection of asynchronous motor

Для работы устройства важно установление критериальных зависимостей между измеряемыми и расчетными величинами параметров сети и АД. В данном случае целесообразно использовать теорию множеств случайных событий и элементы Булевой алгебры. Рассматриваются следующие множества значений:

– измеряемых векторов рабочих фазных токов

$$\underline{I}_a \in \{\underline{I}_a\}; \underline{I}_b \in \{\underline{I}_b\}; \underline{I}_c \in \{\underline{I}_c\}; \quad (4)$$

– измеряемых векторов фазных (линейных) напряжений

$$\underline{U}_a \in \{\underline{U}_a\}; \underline{U}_b \in \{\underline{U}_b\}; \underline{U}_c \in \{\underline{U}_c\}; \quad (5)$$

– частоты сети

$$f_{\text{П.С.}} \in \{f_{\text{П.С.}}\}; \quad (6)$$

– скорости вращения ротора АД

$$n_{\text{рот}} \in \{n_{\text{рот}}\}; \quad (7)$$

– коэффициента, определяющего изменение числа витков в пазу обмотки статора при витковых замыканиях

$$k_{\Delta w} \in \{k_{\Delta w}\}. \quad (8)$$

Критериальные зависимости определены для установившегося режима, условиями которого являются:  $f_{\text{П.С.}} = \text{const}$ ;  $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c = \text{const}$ ;  $n_{\text{рот}} = \text{const}$ .

Критерием нормальной работы АД являются функции:

а)  $F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c) = \{1, 1, 1\} = \underline{U}_a / \underline{U}_b / \underline{U}_c$ , при  $\underline{U}_a \neq 0$ ,  $\underline{U}_b \neq 0$ ,  $\underline{U}_c \neq 0$  соответствует истинному значению – логическая «1»;

б)  $F(\{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\}, \{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\}, \{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\}) = \{1, 1, 1\} = \{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\} / \{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\} / \{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\}$ , при  $\{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\}$ ,  $\{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\}$ ,  $\{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\}$  соответствует истинному значению – логическая «1», где  $\underline{I}_{ap}$ ,  $\underline{I}_{bp}$ ,  $\underline{I}_{cp}$  – расчетные значения векторов фазных токов АД,

$$\underline{I}_{ap}, \underline{I}_{bp}, \underline{I}_{cp} = F(\{\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c\}, n_{\text{рот}}, f_{\text{П.С.}}, \{Z_{wi}\}), \quad (9)$$

где  $Z_{wi}$  – полное комплексное сопротивление схемы замещения АД в  $i$ -й фазе.

Критерием неполнофазного режима напряжений питающей сети является функция

$$F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c) = \{0, 0, 0\} = \{\underline{U}_a / \underline{U}_b\} \vee \{\underline{U}_a / \underline{U}_c\}.$$

Критерием обрыва, недовключения одной из фаз токовых цепей, повреждения кабельной линии и других ситуаций является выполнение условия

$$F_1\{F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c), F(\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c)\} = (\underline{U}_a / \underline{U}_b / \underline{U}_c) / (\{\underline{I}_a / \underline{I}_b\} \vee \{\underline{I}_a / \underline{I}_c\}),$$

где  $F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c) = \{1, 1, 1\} = \underline{U}_a / \underline{U}_b / \underline{U}_c$  соответствует наличию ненулевых значений фазных напряжений;  $F(\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c) = \{0, 0, 0\} = \{\underline{I}_a / \underline{I}_b\} \vee \{\underline{I}_a / \underline{I}_c\}$  соответствует отсутствию тока в одной из фаз;  $\underline{I}_a \neq 0$ ,  $\underline{I}_b \neq 0$ ,  $\underline{I}_c \neq 0$  соответствуют истинному значению – логическая «1».

Критерии выявления начального момента межвиткового замыкания в обмотке статора АД:

а)  $F(\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c) = \{1, 1, 1\} = \underline{U}_a / \underline{U}_b / \underline{U}_c$ ;

б)  $F(\{\underline{I}_a \setminus \underline{I}_{ap}\}, \{\underline{I}_b \setminus \underline{I}_{bp}\}, \{\underline{I}_c \setminus \underline{I}_{cp}\}) = \{0, 0, 0\} = \{\underline{I}_a \setminus \underline{I}_{ap}\} \setminus \{\underline{I}_b \setminus \underline{I}_{bp}\} \setminus \{\underline{I}_c \setminus \underline{I}_{cp}\}$ ,  
при  $\{\underline{I}_a \cap \underline{I}_{ap}\}, \{\underline{I}_b \cap \underline{I}_{bp}\}, \{\underline{I}_c \cap \underline{I}_{cp}\}$  соответствует истинному значению – логическая «1».

Критериальные зависимости позволили разработать программное обеспечение для работы микроконтроллера устройства, реализующего способ [14].

На достоверность и чувствительность выявления межвиткового замыкания влияет точность определения  $\underline{I}_{ap}$ ,  $\underline{I}_{bp}$ ,  $\underline{I}_{cp}$ , величины которых зависят от достоверности определения параметров схемы замещения (ПСЗ) АД.

Для анализа режимов работы АД, тепловых моделей используется Т-образная схема замещения. Существуют различные методики определения ПСЗ АД: по каталожным данным; методом идентификации; методом использования опыта холостого хода и короткого замыкания [15, 16]. В [17] выполнен сравнительный анализ погрешностей при определении ПСЗ по каталожным данным и методом идентификации, показавший следующее: для АД мощностью до 1 кВт погрешность составляет 17 % для сопротивлений рассеяния и активных сопротивлений и не выше 18 % для ветви намагничивания; для АД от 1 до 15 кВт погрешность составляет 13 % для сопротивлений рассеяния и активных сопротивлений и не выше 15 % для ветви намагничивания. В [18] представлен метод онлайн-идентификации электромагнитных параметров АД, позволяющий выполнять анализ установившегося режима работы АД без использования Т-образной схемы замещения, для чего необходимо решить систему алгебраических уравнений четвертого порядка.

В [19] проведен сравнительный анализ известных, часто применяемых методов расчета ПСЗ АД с уточненной методикой. Значения погрешности величин ПСЗ АД колеблются в пределах 8–12 % для АД мощностью 5–10 кВт и 15–22 % для АД мощностью 0,55–5 кВт.

Комплексное сопротивление каждой фазы АД, имеющей однослойную обмотку, намотанную одним проводником, определяется выражением

$$\underline{Z}_{wi} = (1 - k_z)^2 \left[ \left( \frac{r_1}{1 - k_z} + jx_1 \right) + \frac{\left( \frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) \left( \frac{r_\mu}{(1 - k_z)^2} + jx_\mu \right)}{\left( \frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + \left( r_\mu + j(1 - k_z)^2 x_\mu \right)} \right], \quad (10)$$

где  $k_z = \frac{k_{\Delta w}}{q_1}$  – коэффициент отношения замкнутых витков в пазу к общему числу витков в обмотке;  $q_1$  – количество пазов фазовой обмотки;  $r_1$ ,  $x_1$  – активное и индуктивное сопротивления рассеяния статорной обмотки;  $r'_2$ ,  $x'_2$  – приведенные к статорной обмотке активное и индуктивное

сопротивления рассеяния роторной обмотки;  $s = \frac{n_o - n_{изм}}{n_o}$  – скольжение

АД;  $n_o$  – скорость вращения магнитного поля статора;  $n_{изм}$  – измеренная скорость ротора АД;  $r_\mu$ ,  $x_\mu$  – активное и индуктивное сопротивления намагничивающего контура.

Комплексное сопротивление каждой фазы АД с одно- и двухслойными обмотками, с параллельными проводниками определяется выражением

$$\underline{Z}_{wi} = \left( \frac{r_1}{1 + \frac{k_Z}{m_1 - n}} + jx_1 \right) + \frac{\left( \frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) (r_\mu + jx_\mu)}{\left( \frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + (r_\mu + jx_\mu)}, \quad (11)$$

где  $m_1$  – число параллельных проводников в катушке обмотки статора;  $n$  – число замкнутых параллельных проводников.

Фазное напряжение при наличии отклонения напряжения сети

$$\underline{U}_{\phi i} = (1 + \Delta U_{\phi i}) e^{j\Delta\phi_i} \underline{U}_{\phi n}, \quad (12)$$

где  $U_{\phi i}$  – измеренное напряжение в  $i$ -й фазе;  $\Delta U_{\phi i}$  – отклонение напряжения в  $i$ -й фазе;  $\Delta\phi_i$  – дополнительный угол сдвига фазного напряжения при несимметрии;  $\underline{U}_{\phi n}$  – комплексное номинальное фазное напряжение.

Величины фазных токов АД определяются как

$$\underline{I}_{ip} = \frac{\underline{U}_{\phi i}}{\underline{Z}_{wi}} = \frac{(1 + \Delta U_{\phi i}) e^{j\Delta\phi_i} \underline{U}_{\phi n}}{(1 - k_Z)^2 \left[ \left( \frac{r_1}{1 - k_Z} + jx_1 \right) + \frac{\left( \frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) \left( \frac{r_\mu}{(1 - k_Z)^2} + jx_\mu \right)}{\left( \frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right) + (r_\mu + j(1 - k_Z)^2 x_\mu)} \right]}, \quad (13)$$

где  $\underline{I}_{ip}$  – расчетное значение фазного тока в  $i$ -й фазе при несимметрии напряжений и витковых замыканиях.

На основании полученных выражений произведены расчеты изменений значений комплексных сопротивлений АД по (10), приращения фазных токов согласно уравнению (13), дополнительного угла сдвига фазного тока, коэффициентов чувствительности для АД различной мощности при симметричном питающем напряжении. Расчеты параметров схем замещения проведены по методике [19] для рабочего тока  $I_p = 0,8 I_{ном}$ .

Результаты расчетов параметров для АД мощностью 1,1 и 15,0 кВт (обмотка однослойная,  $m_1 = 0$ ), 22,0 кВт (обмотка однослойная,  $m_1 = 3$ ), 75,0 кВт (обмотка двухслойная,  $m_1 = 4$ ) приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры асинхронных двигателей  
при различном количестве замкнутых витков**

**Parameters of asynchronous motors with a different number of closed turns**

Наименование параметра	Значение параметра									
	при количестве замкнутых витков $w_k$ в пазу обмотки									
	асинхронного двигателя 4А80А4У3 ( $P = 1,1$ кВт, $n = 1500$ об/мин, $m_1 = 0$ , $S_n = 60$ , $I_{ном} = 2,65$ А, $I_p = 0,8 I_{ном}$ )									
	0	5	15	20	25	30	35	40	50	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Приращение угла $\Delta\varphi_{aZ}$ , градус	0	0,54	1,63	2,18	2,74	3,30	3,85	4,41	5,53	6,63
Приращение тока $\Delta I_{aZ}$ , А	0	0,032	0,102	0,140	0,179	0,221	0,265	0,312	0,414	0,527
Комплексное сопротивление $ Z_{w} $ , Ом	104,3	102,7	99,4	97,8	96,1	94,3	92,6	90,8	87,1	83,4
Коэффициент чувствительности по фазному углу $k_{\Delta\varphi}$ , о. е.	0	0,013	0,038	0,051	0,064	0,077	0,091	0,103	0,129	0,155
Коэффициент чувствительности по току $k_{\Delta I}$ , о. е.	0	0,015	0,048	0,066	0,084	0,104	0,125	0,147	0,195	0,248
	асинхронного двигателя 4А160М6У3 ( $P = 15$ кВт, $n = 1000$ об/мин, $m_1 = 0$ , $S_n = 34$ , $I_{ном} = 26,4$ А, $I_p = 0,8 I_{ном}$ )									
	0	3	7	11	15	20	25	27	30	34
Приращение угла $\Delta\varphi_{aZ}$ , градус	0	0,97	2,45	4,04	5,79	8,19	10,83	11,95	13,69	16,11
Приращение тока $\Delta I_{aZ}$ , А	0	0,34	0,85	1,46	2,18	3,28	4,67	5,33	6,44	8,24
Комплексное сопротивление $ Z_{w} $ , Ом	10,32	10,15	9,92	9,65	9,36	8,94	8,46	8,25	7,92	7,44
Коэффициент чувствительности по фазному углу $k_{\Delta\varphi}$ , о. е.	0	0,030	0,075	0,123	0,176	0,250	0,330	0,364	0,417	0,490
Коэффициент чувствительности по току $k_{\Delta I}$ , о. е.	0	0,016	0,040	0,068	0,102	0,154	0,219	0,250	0,302	0,386
	асинхронного двигателя 4А180S4У3 ( $P = 22$ кВт, $n = 1500$ об/мин, $m_1 = 3$ , $S_n = 23$ , $I_{ном} = 38,2$ А, $I_p = 0,8 I_{ном}$ )									
	0	3	5	7	9	13	15	17	21	23
Приращение угла $\Delta\varphi_{aZ}$ , градус	0	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10	0,11	0,12	0,14	0,14
Приращение тока $\Delta I_{aZ}$ , А	0	0,045	0,073	0,099	0,124	0,168	0,188	0,206	0,240	0,256
Комплексное сопротивление $ Z_{w} $ , Ом	7,29	7,28	7,28	7,27	7,26	7,25	7,25	7,24	7,23	7,23
Коэффициент чувствительности по фазному углу $k_{\Delta\varphi}$ , о. е.	0	0,0010	0,0020	0,0025	0,0030	0,0040	0,0045	0,0050	0,0054	0,0060

Окончание табл. 1

End of Table 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Коэффициент чувствительности по току $k_{\Delta I}$ , о. е.	0	0,0010	0,0020	0,0030	0,0040	0,0054	0,0060	0,0067	0,0080	0,0084
	асинхронного двигателя 4А250S4У3 ( $P = 75$ кВт, $n = 1500$ об/мин, $m_1 = 4$ , $S_n = 9 + 9$ , $I_{ном} = 126,8$ А, $I_p = 0,8 I_{ном}$ )									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Приращение угла $\Delta\varphi_{aZ}$ , градус	0	0,011	0,021	0,030	0,038	0,044	0,050	0,055	0,059	0,062
Приращение тока $\Delta I_{aZ}$ , А	0	0,069	0,134	0,195	0,251	0,303	0,351	0,397	0,439	0,478
Комплексное сопротивление $ Z_{\text{вл}} $ , Ом	2,113	2,111	2,110	2,109	2,108	2,107	2,106	2,105	2,104	2,103
Коэффициент чувствительности по фазному углу $k_{\Delta\varphi}$ , о. е.	0	0,0004	0,0008	0,0012	0,0015	0,0018	0,0020	0,0220	0,0230	0,0025
Коэффициент чувствительности по току $k_{\Delta I}$ , о. е.	0	0,0007	0,0013	0,0020	0,0024	0,0030	0,0034	0,0038	0,0042	0,0046

По данным табл. 1 построена векторная диаграмма токов и симметричных напряжений при 5, 11, 20 и 30 замкнутых витках в пазу обмотки фазы А (рис. 6).

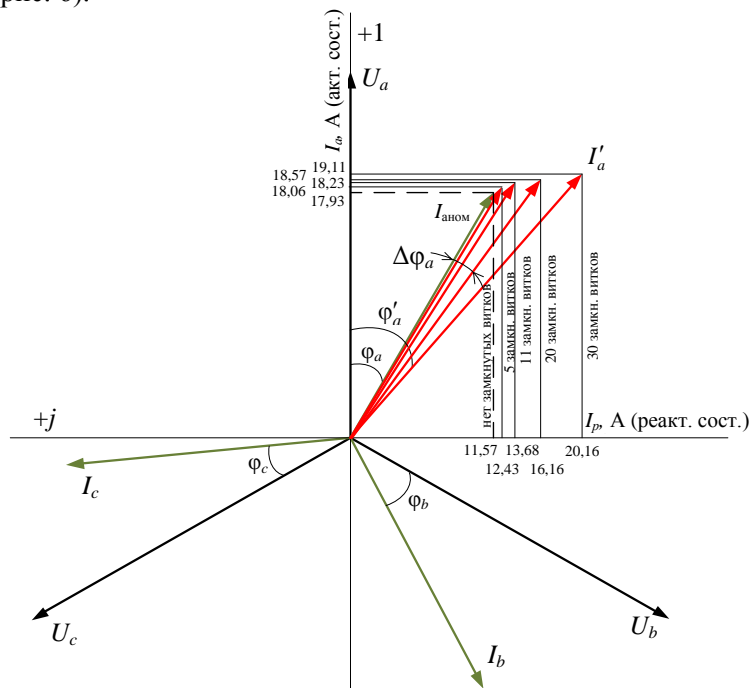


Рис. 6. Векторная диаграмма токов и симметричных фазных напряжений при различных значениях замкнутых витков в фазе А для асинхронного двигателя типа 4А160М6У3 мощностью 15 кВт

Fig. 6. Vector diagram of currents and symmetrical phase voltages at different values of closed turns in phase A for type 4A160M6U3 asynchronous motor with a power of 15 kW

### ВЫВОДЫ

1. Для асинхронных двигателей мощностью 15 кВт и выше, имеющих одно- и двухслойные обмотки с параллельными проводниками, изменение приращений векторов фазных токов, даже при 90 % замкнутых витков, – аварийный режим, и коэффициенты чувствительности стремятся к нулю, что не позволяет применять метод, основанный на анализе векторных величин фазных токов при выявлении витковых замыканий в параллельных проводниках.

2. Для асинхронных двигателей мощностью 15 кВт и ниже с обмотками, выполненными намотанными одним проводом катушками, изменения коэффициентов чувствительности  $k_{\Delta I}$  и  $k_{\Delta \varphi}$  от 2 % при замыкании 10 % витков в пазу позволяют использовать метод, основанный на анализе векторных величин фазных токов, для диагностики витковых замыканий.

3. Установленные критериальные зависимости между контролируемыми параметрами сети и асинхронного двигателя позволили разработать устройство диагностики и защиты асинхронных двигателей и программное обеспечение.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Хомутов, С. О. Система поддержания надежности электрических двигателей на основе комплексной диагностики и эффективной технологии восстановления изоляции [Электронный ресурс] / С. О. Хомутов. Барнаул: ООО МЦ «ЭОР», 2015. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. Разработка метода и алгоритма диагностирования обрывов и межвитковых замыканий в статорных обмотках асинхронных двигателей / А. А. Ткаченко [и др.] // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: сб. науч. тр. 2011. № 2 (8-Е). С. 154–160.
3. Кривоносов, В. Е. Срок службы изоляции при отклонениях напряжений и учете отклонений активных сопротивлений обмоток статора асинхронного двигателя / В. Е. Кривоносов, И. Т. Карполюк, С. В. Василенко // 36. ст. наук.-информ. центру «Знання» за матеріалами ЛІІ Міжнар. наук.-практ. конф. «Розвиток науки в ХХІ столітті», Харків, 15 окт. 2019 г. Харків, 2019. С. 57–65.
4. Попович, О. М. Розробка засобів проектування системи діагностування пошкоджень обмотки статора / О. М. Попович, М. С. Гуторова // Гідроенергетика України. 2017. № 3–4. С. 47–52.
5. Петухов, В. В. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока [Электронный ресурс] / В. В. Петухов, В. А. Соколов // Новости Электротехники. 2005. Т. 31, № 1. Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php>.
6. Гуторова, М. С. Моделирование магнитного поля в промежутке асинхронных двигателей за витковых замыканий обмотки статора / М. С. Гуторова // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України: зб. наук. пр. 2015. Вип. 40. С. 90–94.
7. Спосіб виявлення короткозамкнутих витків в обмотках електричних машин та пристрій для його здійснення: пат. 36791 UA, G01R31/06 / В. М. Манько. Опубл. 16.04.2001.
8. Спосіб оцінки стану міжвиткової ізоляції електродвигуна: пат. 88707 UA, МПК G01R 31/00, G01R 31/06 / М. П. Барбинягра. № a200800902. Опубл. 10.11.2009.
9. Шейников, А. А. Использование динамических свойств спектров последовательностей радиоимпульсов для обеспечения высокой чувствительности тестового контроля обмо-

- ток асинхронных двигателей / А. А. Шейников, Ю. В. Суходолов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 36–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-36-46>.
10. Устройство для контроля и защиты электродвигателя от неполнофазных режимов и витковых замыканий: а. с. 1584028 СССР, Н02Н 7/085, 7/08 / В. Е. Кривоносов, И. В. Жежеленко, Б. Ф. Рыбалко. Опубл. 07.08.1990.
  11. Спосіб захисту асинхронного електродвигуна від виткових замикань: пат. 105420 UA, МПК Н02Н7/08, G01R31/00, G01R31/06 / В. І. Чернишев. Опубл. 12.05.2014.
  12. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в процессе его функционирования / Р. Г. Мугалимов [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. 2018. Т. 40, № 3. С. 70–78.
  13. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
  14. Пристрій діагностики неповнофазних режимів мережі, струмових ланцюгів, початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках і захисту електродвигуна: комп'ютерна програма: а. с. 96405 Україна / В. Є. Кривоносов [та ін.]. Опубл. 27.02.2020. 1 с.
  15. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / И. А. Сыромятников. М.: Энергия, 1984. 240 с.
  16. Расчет параметров и характеристик асинхронных двигателей [Электронный ресурс] / В. М. Гридин. М.: МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2011. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
  17. Кувшинов, А. И. Идентификация параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя на основе экспертных оценок / А. И. Кувшинов, Н. И. Муха, О. А. Онищенко // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сб. 2007. Вып. 12. С. 78–85.
  18. Онлайн-идентификация электромагнитных параметров асинхронного двигателя / В. А. Тыгюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 5. С. 423–440. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-423-440>.
  19. Kryvonosov, V. E. Comparative Analysis of Methods for Calculating the Parameters of Asynchronous Engines for Reference Data / V. E. Kryvonosov, S. V. Vasilenko // Österreichisches Multiscience Journal. 2019. Vol. 1, No 18. P. 36–42.
- Поступила 25.11.2020    Подписана в печать 02.03.2021    Опубликована онлайн 31.05.2021

## REFERENCES

1. Khomutov S. O. (2015) *The System for Maintaining the Reliability of Electric Motors on the Basis of Complex Diagnostics and Effective Technology of Insulation Restoration*. Barnaul, LLC MC “EOR”. 1 Electron. Opt. Disk (CD-ROM) (in Russian).
2. Tkachenko A. A., Shul'ga A. A., Polupan I. I., Besh A. N. (2011) Development of a Device for Diagnosing Breaks and Interturn Short-Circuits in Stator Windings of Asynchronous Motors. *Nauchnyi Vestnik Donbasskoï Gosudarstvennoï Mashinostroitel'noi Akademii: Sb. Nauch. Tr. = Scientific Herald of the Donbass State Engineering Academy*, 8-E (2), 154–160 (in Russian).
3. Kryvonosov V. E., Karpolyuk I. T., Vasilenko S. V. (2019) Insulation Service Life under Conditions of Voltage Deviations and Taking into Account Deviations of Active Resistances of Stator Windings of an Induction Motor. *Zbirnik Statei Naukovo-Informatsiinogo Tsentru “Znannya” za Materialami LIII Mizhnarodnoï Naukovo-Praktichnoï Konferentsii: “Rozvitok Nauki v XXI Stolitti”, Kharkiv, 15 Okt. 2019 g.* [Collected Articles of the Science and Information Center “Knowledge” Based on Materials of the LIII International Scientific and Practical Conference on the “Development of Science in the XXI Century”, Kharkiv, 15 Oct. 2019]. Kharkiv, 57–65 (in Russian).



4. Popovich O. M., Gutorova M. S. (2017) Development of the Design of and Diagnostics for the Stator Winding. *Gidroenergetika Ukraini* [Hydropower Science in Ukraine], (3–4), 47–52 (in Ukrainian).
5. Petukhov V. V., Sokolov V. A. (2005) Diagnostics of the Condition of Electric Motors. Method of Spectral Analysis of Current Consumption. *Novosti Elektrotehniki* [Electrical Engineering News], 31 (1). Available at: <http://news.elteh.ru/arh/2005/31/11.php> (in Russian).
6. Gutorova M. S. (2015) Model of the Magnetic Field in the Gap between Asynchronous Motors for the Orbit Looping of the Stator Winding. *Pratsi Institutu Elektrodinamiki Natsional'noi Akademii Nauk Ukraini* [Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine], (40), 90–94 (in Ukrainian).
7. Man'ko V. M. (2001) *Method of Detecting Short-Circuited Turns in Windings of Electric Machines and Device for its Implementation*. Patent No 36791 Ukraine (in Ukrainian).
8. Barbinyagra M. P. (2009) *Method of Assessing the State of the Interturn Insulation of the Motor*. Patent No 88707 Ukraine (in Ukrainian).
9. Sheinikov A. A., Sukhodolov Yu. V. (2018) The Use of the Dynamic Properties of Spectra of Sequences of Radio Pulses to Ensure High Sensitivity of the Test Control Windings of Asynchronous Motors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institution and Power Engineering Associations*, 61 (1), 36–46. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-36-46> (in Russian).
10. Kryvonosov V. E., Zhezhelenko I. V., Rybalko B. F. (1990) *Device for Monitoring and Protecting the Electric Motor from Incomplete Phase Modes and Turn Circuits*. Certificate of Authorship No 1584028 (in Russian).
11. Chernyshev V. I. (2014) *The Method of Protection of an Induction Motor from Turn Circuits*. Patent No 105420 Ukraine (in Ukrainian).
12. Mugalimov R. G., Mugalimova A. R., Kalugin U. A., Odintsov K. E. (2018) Methods for Diagnostics and Identification of Faults in the Windings of an Induction Motor in the Process of its Functioning. *Elektrotehnicheskie Sistemy i Kompleksy = Electrotechnical Systems and Complexes*, 40 (3), 70–78 (in Russian).
13. Zhezhelenko I. V., Sayenko Y. L. (2000) *Electrical Power Quality Indicators and their Control at Industrial Enterprises*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 252 (in Russian).
14. Kryvonosov V. E., Hryb O. G., Karpalyuk I. T., Kryvonosov V. V., Boryakin A. O., Vasilenko S. V. (2020) *Computer Program "Device for Diagnostics of Incomplete Phase Modes of the Network, Current Circuits, the Initial Moment of the Short Circuit in the Stator Windings and Motor Protection"*. Certificate of Authorship No 96405 (in Ukrainian).
15. Syromyatnikov I. A. (1984) *Modes of Operation of Asynchronous and Synchronous Motors*. Moscow, Energiya Publ. 240 (in Russian).
16. Gridin V. M. (2011) *Calculation of Parameters and Characteristics of Asynchronous Motors*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ. 1 electron. opt. disc (CD-ROM) (in Russian).
17. Kuvshinov A. I., Mukha N. I., Onishchenko O. A. (2007) Identification of the Parameters of the Equivalent Circuit of an Asynchronous Electric Motor Based on Expert Evaluations. *Avtomatizatsiya Sudovykh Tekhnicheskikh Sredstv: Nauch.-Tekhn. Sb.* [Automation of Ship Technical Means: Collection of Scientific and Technical Papers], (12), 78–85 (in Russian).
18. Tytiuk V. K., Baranovskaya M. L., Chornyi O. P., Burdilnaya E. V., Kuznetsov V. V., Bogatyriov K. N. (2020) Online-Identification of Electromagnetic Parameters of an Induction Motor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institution and Power Engineering Associations*, 63 (5), 423–440. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-423-440> (in Russian).
19. Kryvonosov V. E., Vasilenko S. V. (2019) Comparative Analysis of Methods for Calculating the Parameters of Asynchronous Engines for Reference Data. *Österreichisches Multiscience Journal*, 1 (18), 36–42.