

# Электромеханические комплексы и системы Electromechanical complexes and systems

Научная статья

УДК 621.313.13; 621.316.925

DOI: 10.14529/power220107

## СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОРОТКОЗАМКНУТОЙ ОБМОТКИ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ВЫБЕГА

**Александра Олеговна Потапенко**<sup>1</sup>, [alxopty@gmail.com](mailto:alxopty@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-9523-5333>

**Асель Оразовна Юсупова**<sup>1</sup>, [aselasp@mail.ru](mailto:aselasp@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5516-3024>

**Сергей Ильдусович Латыпов**<sup>2</sup>, [slatypov@mail.ru](mailto:slatypov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4947-0666>

<sup>1</sup> Торайгыров университет, Павлодар, Республика Казахстан

<sup>2</sup> Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева, Петропавловск, Республика Казахстан

**Аннотация.** Предлагаемая работа предназначена для углубления теоретических основ построения систем диагностики повреждений короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя в режиме выбега. В ней представлен способ диагностики повреждения стержней короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя по ЭДС, индуцируемой в обмотке статора затухающими токами в короткозамкнутой обмотке ротора. Устройство по этому способу реализуется на базе персонального компьютера, в котором в качестве АЦП используется звуковая карта, данные обрабатываются в специально созданном программном обеспечении. Представлены две блок-схемы устройства диагностики АД, в которых информацию о повреждении ротора получают из ЭДС статора, а начало выбега определяют по разности ее амплитуд или по замыканию блок-контактов выключателя. В последнем случае при размыкании блок-контактов выключателя нагрузки формируется сигнал на измерение ЭДС обмотки статора и осуществляется запись этой ЭДС. Рассмотренная система диагностики позволяет достаточно просто осуществлять диагностику АД напряжением до 1000 В. Однако необходимость подключения для диагностики к блок-контактам высоковольтных АД, например, в ячейках КРУ значительно усложняет процесс диагностики и по технологическим причинам может применяться не на всех АД. Этого в значительной мере можно избежать, если начало режима выбега АД определять по разности амплитуд. Опытный образец системы диагностики обрыва стержней ротора показал, что такая ее реализация способна достаточно эффективно выявлять обрыв стержня ротора в режиме выбега АД. При этом экспериментальные данные были проведены как с использованием звуковой карты компьютера, так и внешнего сертифицированного модуля АЦП, установлено, что погрешность измерений звуковой картой допустима. При этом стоимость всего устройства невысока и определена в основном стоимостью ПК и программного обеспечения, что делает ее доступной для практически любого промышленного предприятия и некоммерческих организаций.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, системы диагностики повреждения ротора, режим выбега, обрыв стержней ротора, ЭДС в обмотках статора

**Для цитирования:** Потапенко А.О., Юсупова А.О., Латыпов С.И. Способ диагностики повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя в режиме выбега // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 1. С. 62–70. DOI: 10.14529/power220107

Original article

DOI: 10.14529/power220107

## METHOD FOR DIAGNOSING DAMAGE TO SQUIRREL-CAGE ROTOR OF INDUCTION MOTOR IN RUN-DOWN MODE

**Aleksandra O. Potapenko**<sup>1</sup>, [alxopty@gmail.com](mailto:alxopty@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-9523-5333>

**Assel O. Yussupova**<sup>1</sup>, [aselasp@mail.ru](mailto:aselasp@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5516-3024>

**Sergey I. Latypov**<sup>2</sup>, [slatypov@mail.ru](mailto:slatypov@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4947-0666>

<sup>1</sup> Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup> Manash Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan

**Abstract.** The proposed work is intended to deepen the theoretical foundations of constructing systems for diagnosing damage to the squirrel-cage rotor of an induction motor in run-down mode. It presents a method for diagnosing damage to the rods of a squirrel-cage rotor of an induction motor by means of EMF induced in the stator winding

by damped currents in the squirrel-cage winding of the rotor. According to this method, the device is designed on the basis of a personal computer in which a sound card is used as an ADC, and the data is processed in specially created software. Two block diagrams of the device for diagnostics of blood pressure are presented. Information about the damage to the rotor is obtained from the EMF of the stator, and the start of the run-down is determined by the difference in its amplitudes or by the closure of the switch block-contacts. In the latter case, when the block-contacts of the load switch are opened, a signal is generated to measure the EMF of the stator winding and this EMF is recorded. This diagnostic system makes it quite easy to diagnose blood pressure with voltage up to 1000 V. However, the need to connect high-voltage AMs to the block-contacts for diagnostics, for example, in switchgear cells, significantly complicates the diagnostic process and so for technological reasons it cannot be used on all AMs. This can be largely avoided, if the beginning of the IM run-out mode is determined by the amplitude difference. The prototype of the rotor bar breakage diagnostics system has shown that its implementation is capable of quite efficiently detecting the rotor bar breakage in the IM run-down mode. In this case, experimental data was obtained both with the use of a computer sound card and an external certified ADC/DAC module. It was found that the measurement error with a sound card is permissible. At the same time, the cost of the entire device is low and is mainly determined by the cost of the PC and software making it affordable for almost any industrial enterprise and non-profit organizations.

**Keywords:** induction motor, squirrel-cage rotor, rotor damage diagnostics systems, run-down mode, breakage of rotor bars, EMF in the stator windings

**For citation:** Potapenko A.O., Yussupova A.O., Latypov S.I. Method for diagnosing damage to squirrel-cage rotor of induction motor in run-down mode. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(1): 62–70. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220107

## Введение

В промышленности, а также на электрических станциях и подстанциях развитых стран, асинхронные двигатели (АД) являются самой распространенной электрической машиной. Они потребляют свыше 80 % всей вырабатываемой электроэнергии. В то же время на их долю приходится до 30 % отказов всего электрического оборудования. При этом доля отказов по причине обрыва стержней короткозамкнутого ротора, по мнению различных авторов, может достигать порядка 5–10 %. Однако экспериментальные исследования на ряде заводов и электрических станций в Павлодарской области (Республика Казахстан) показали, что повреждаемость короткозамкнутого ротора «беличьей клетки» АД значительно выше. В основном ущерб от эксплуатации такого АД выражается в повышенном расходе электроэнергии. Причем год его работы приводит к перерасходу электроэнергии сопоставимому со стоимостью самого АД.

Известные системы диагностики обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора [1–3], которые в качестве источника информации о повреждении используют вибрацию [4–7] и температуру элементов АД, ток в обмотке статора [8–22] и магнитные поля лобового рассеяния в торцевой зоне в эксплуатационных режимах работы АД [8, с. 60], не способны надежно распознавать повреждение обмотки ротора из-за значительных колебаний параметров питающей сети и приводного механизма. В этом отношении более перспективны те системы, на работу которых не способны влиять эти факторы. Например, системы, которые осуществляют диагностику АД в режиме выбега [23–25]. Таким образом, разработка системы диагностики повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя по ЭДС обмотки статора в режиме выбега является актуальной задачей.

После отключения АД от сети ток в обмотке статора становится равным нулю, а токи в обмотке вращающегося ротора в первый момент времени остаются такими же, какими были до отключения. Затем эти токи начинают затухать по экспоненте, параметры которой определены величиной активного индуктивного сопротивления обмотки ротора. В свою очередь затухающие токи вращающегося ротора индуцируют в обмотке статора ЭДС. И если АД присоединен кабелем, то в обмотке статора также появится ток. В результате в режиме выбега АД источником информации о повреждении обмотки короткозамкнутого ротора может быть ЭДС, индуцируемая в обмотке статора затухающими токами в короткозамкнутой обмотке ротора [26–29].

## Постановка задачи

Способ диагностики обрыва стержня короткозамкнутой обмотки ротора АД в режиме выбега, в котором источником информации о повреждении ротора является ЭДС, индуцируемая в обмотке статора затухающими токами в короткозамкнутой обмотке ротора, основан на том что:

1) по размыканию блок-контактов выключателя нагрузки определяется начало выбега АД, в результате чего формируется сигнал на измерение ЭДС обмотки статора и осуществляется запись этой ЭДС в виде зависимости  $e_1(t)$  в течение заданного времени  $t_4$  (рис. 2);

2) по зависимости  $e_1(t)$  и заданным критериям рассчитывается время  $t_1$  и  $t_2$  начала и конца зоны диагностирования;

3) из зависимости  $e_1(t)$  в зоне диагностирования выделяется первая гармоника величиной  $E_p$  с частотой  $f_p = f_c(1-s)$  и гармоническая величина

ной  $E_{p-1}$  с частотой  $f_{p-1} = f_c(1-s)(1-1/p)$ , где  $s$  – скольжение ротора,  $p$  – количество пар полюсов;

4) рассчитывается их отношение в виде  $\sigma_{p-1} = E_{p-1}/E_p$ , среднее значение этого отношения  $\sigma_{cp}$  и среднее скорректированное значение этого отношения  $\sigma_{cp}^*$  в интервале времени от  $t_1$  до  $t_2$ . И если  $\sigma_{cp}^*$  превысит заданную величину, то формируется сигнал об обрыве стержня короткозамкнутой обмотки ротора.

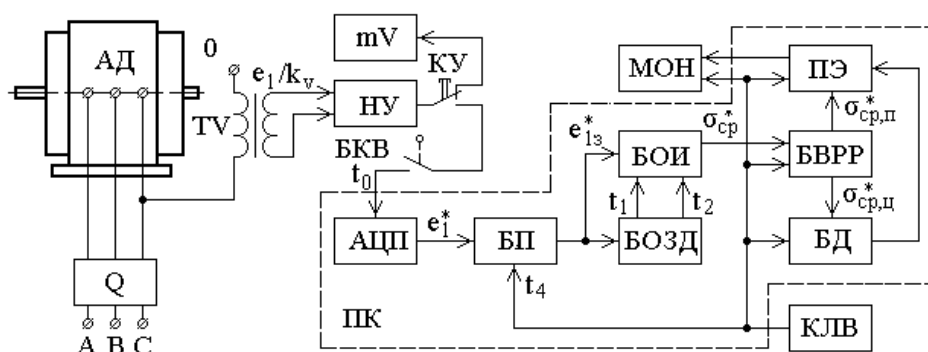
#### Практическая реализация способов диагностики

В соответствии с [30–33] устройство по этому способу реализуется на базе персонального компьютера ПК, в котором в качестве АЦП используется звуковая карта, данные обрабатываются в специально созданном программном обеспечении. В этом случае блок-схема системы диагностики обрыва стержня короткозамкнутого ротора АД в режиме выбега с источником информации о повреждении в виде ЭДС обмотки статора будет соответствовать той, которая приведена на рис. 1.

Из приведенной блок-схемы (см. рис. 1) видно, что информацию при диагностике повреждения стержня короткозамкнутого ротора система диагностики получает от измерительного трансформатора напряжения TV, который подключается к одной из фаз АД, как показано на рис. 1. Измерительный трансформатор TV является понижающим с коэффициентом трансформации  $k_v$ . В АД напряжением выше 1000 В в качестве такого

трансформатора может использоваться НОМ (трансформатор напряжения однофазный масляный) или НТМИ (трансформатор напряжения трехфазный масляный с дополнительной вторичной обмоткой). Это позволит избавиться от гальванической связи между высоким и низким напряжением. С учетом того, что вторичное напряжение таких трансформаторов равно 100 В, возможно, потребуется промежуточный трансформатор напряжения. Он дает возможность согласовать напряжения на выводах вторичной обмотки НОМ или НТМИ с допустимым напряжением на входе устройства диагностики, которое для звуковой карты не должно превышать 0,9 В. Для более точного сопряжения вторичного напряжения TV с напряжением на входе звуковой карты ПК используется нормирующее устройство НУ, которое через контакты кнопки К может подключаться как к мV – милливольтметру, так и к АЦП. С помощью милливольтметра осуществляется контроль установки на выходе НУ необходимого напряжения. Преобразование ЭДС  $e_1/k_v$  в цифровую форму осуществляется с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП звуковой карты.

Запуск режима диагностирования системы осуществляется замыканием блок-контактов БК в момент отключения выключателя Q и перехода АД в режим выбега. В результате начиная с момента времени  $t_0$  и в течение времени  $t_4$  ЭДС величиной  $e_1/k_v$  через нормирующее устройство получает доступ к блоку памяти БП, где и осуществляется запись зависимости  $e_{13}^*(t)$  в интервале времени от  $t_0$  до  $t_4$ , как это показано на рис. 2.



АД – асинхронный двигатель; Q – выключатель нагрузки; БКВ – блок-контакт выключателя нагрузки; БОИ – блок обработки информации; TV – измерительный трансформатор напряжения; НУ – нормирующее устройство; КУ – кнопка управления; mV – милливольтметр; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БП – блок оперативной памяти для записи  $e_1^*(t) = e_1(t)/k_v$  в интервале времени от  $t_0$  до  $t_4$ ; БОЗД – блок определения зоны диагностирования; БВРР – блок выбора режима работы в виде «Настройка» и «Диагностика»; ПЭ – пороговый элемент; МОН – монитор ПК; БД – база данных; КЛВ – клавиатура ПК

Рис. 1. Блок-схема устройства диагностики АД в котором информацию о повреждении ротора получают из ЭДС статора, а начало выбега определяют по замыканию блок-контактов выключателя

Fig. 1. A block diagram of the IM diagnostic device in which information about the damage to the rotor is obtained from the stator EMF, and the start of the runout is determined by closing the auxiliary contacts of the switch

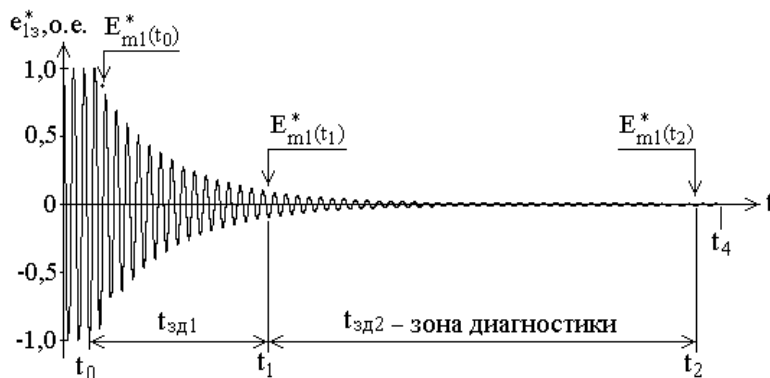


Рис. 2. Блок-схема устройства диагностики АД  
Fig. 2. Block diagram of an induction motor (IM) diagnostic device

Далее данные в виде зависимости  $e_{13}^*(t)$  поступают в блоки определения зоны диагностирования БОЗД и обработки информации БОИ. В блоке БОЗД по зависимости  $e_{13}^*(t)$  и заданному отношению  $\sigma_{t1} = E_{m13}^*(t_1)/E_{m13}^*(t_0)$  и  $\sigma_{t2} = E_{m13}^*(t_2)/E_{m13}^*(t_0)$  (см. рис. 2) определяется время  $t_1$  начала и  $t_2$  конца зоны диагностирования, где  $E_{m13}^*(t_0)$ ,  $E_{m13}^*(t_1)$  и  $E_{m13}^*(t_2)$  – амплитуды зависимости  $e_{13}^*(t)$  при времени  $t_0$ ,  $t_1$  и  $t_2$ . Как показали многочисленные результаты эксперимента, величины  $\sigma_{t1}$  и  $\sigma_{t2}$  рекомендуется принимать равными 0,08–0,1 и 0,03–0,04. Эти величины определены многочисленными экспериментальными исследованиями и тоже заносятся в базу данных БД.

В блоке БОИ из зависимости  $e_{13}^*(t)$  в зоне диагностирования выделяют гармонику  $E_p$  и гармоническую  $E_{p-1}$ , а также их отношение в виде  $\sigma_{p-1} = E_{p-1}/E_p$ , среднее значение этого отношения  $\sigma_{cp}$  и среднее скорректированное значение

этого отношения  $\sigma_{cp}^*$ . С учетом того, что в процессе выбега под влиянием сопротивления скольжения подшипников и вентилятора охлаждения скорость вращения ротора падает, частоты гармоники  $E_p$  и гармонической  $E_{p-1}$  уменьшаются. Поэтому для их выделения используется оконное преобразование Фурье с «адаптирующимся окном». При этом ширину окна принимают равной величине  $p$  периодов, а шаг окна равным величине одного периода. Среднее значение отношения  $\sigma_{cp}$  и среднее скорректированное значение этого отношения  $\sigma_{cp}^*$  определяются по математическим выражениям:

$$\sigma_{cp} = \sum_{n=1}^N \sigma_{(p-1)n} / N, \quad (1)$$

где  $\sigma_{(p-1)n}$  – среднее значение отношения  $\sigma_{p-1}$  для неповрежденного АД в точке  $n$ ,  $N = (t_2 - t_1)/\Delta t$ .

Это среднее значение  $\sigma_{cp}$  рассчитано с учетом бросков  $\sigma_{33}$  отношения  $\sigma_{(p-1)}$ , достигающих значительных величин, показанных на рис. 3. Эти

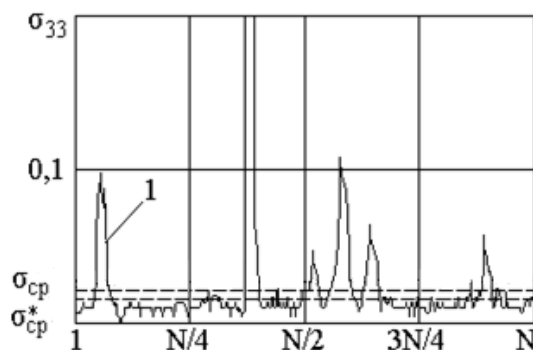


Рис. 3. Зависимость отношения дискретных значений дополнительной гармонической ЭДС обмотки статора с частотой 33,33Гц к основной гармонике целого и поврежденного АД 4AM100L6Y3 в режиме выбега

Fig. 3. Dependence of the ratio of discrete values of the additional harmonic EMF of the stator winding with a frequency of 33.33 Hz to the fundamental harmonic of the whole and damaged IM 4AM100L6Y3 in the rundown mode

броски вызваны неточным определением длительности текущего периода, величина которого под влиянием различных факторов может изменяться случайным образом и, следовательно, искажать результаты разложения в ряд Фурье ЭДС на выходе обмотки статора. Для того чтобы уменьшить их влияние на расчет среднего значения  $\sigma_{33}$ , все его значения, которые превышают величину  $\sigma_{cp}$  приравниваются  $\sigma_{cp}$ . А затем определяется его среднее, но скорректированное значение как

$$\sigma_{cp}^* = \sum_{n=1}^N \sigma_{(p-1)n} / N, \quad (2)$$

где  $\sigma_{(p-1)n}$  – откорректированное среднее значение отношения  $\sigma_{p-1}$  для неповрежденного АД в точке  $n$ ,  $N = (t_2 - t_1) / \Delta t$ .

Далее величина  $\sigma_{cp}^*$  используется как один из критериев для оценки состояния обмотки ротора.

Рассчитанное среднее скорректированное значение этого отношения  $\sigma_{cp}^*$  поступает в блок выбора режима работы БВРР.

Блок выбора режима работы БВРР диагностической системы предполагает ее работу в режимах «Настройка» и «Диагностика». Режим работы БВРР задается с клавиатуры и контролируется по показаниям монитора МОН. В свою очередь БВРР управляет работой блока памяти БП, порогового элемента ПЭ, базой данных БД и отражает результаты этой работы на мониторе МОН.

В режиме «Настройка» осуществляется подготовка системы диагностики к работе. Она производится в режиме холостого хода АД соединенного с приводимым механизмом. Например, в случае вентилятора или водяного насоса для этого перекрываются необходимые вентили и задвижки. При этом первичная и вторичная обмотки измерительного трансформатора присоединяются к сети и нормирующему устройству так, как показано на рис. 1. В режиме «Настройка» первоначально выставляется безопасное напряжение на входе звуковой карты. Для этого выход нормирующего элемента НУ с помощью кнопки управления КУ присоединяют к милливольтметру переменного тока mV с большим входным сопротивлением, а затем с помощью элементов регулировки НУ на нем устанавливается напряжение  $U_{зк}$  в пределах 0,2–0,8 В. После этого выход НУ с помощью кнопки КУ от милливольтметра отсоединяется и присоединяется к входу звуковой карты в виде гнезда «Микрофон». Данные операции вызваны необходимостью отстройки от колебаний напряжения сети из-за изменения нагрузки в электрической системе, которая зависит от времени суток и времени года.

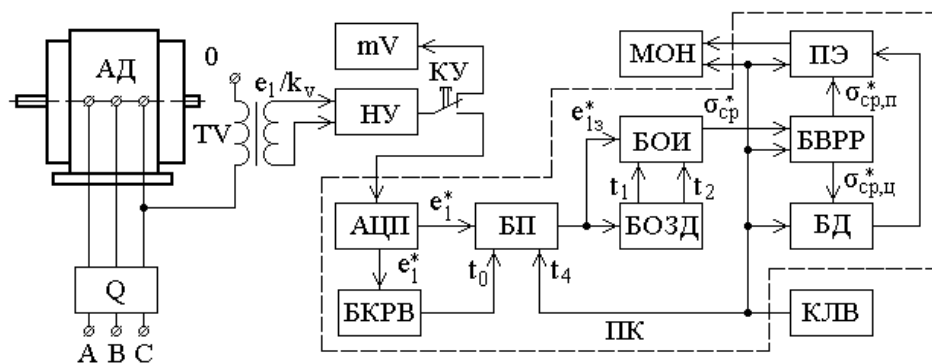
После этого ПК подключается к сети или блоку питания, в него загружается Windows и через «Панель управления» в соответствии с [12] осу-

ществляется настройка звукового канала. После чего устанавливается программное обеспечение ALEX-M. После всего этого система диагностики готова к работе.

Как правило, диагностика конкретного двигателя осуществляется в два этапа следующим образом. На первом этапе в базу данных БД помещаются параметры нового с завода или после ремонта АД в виде паспортных данных, места размещения этого АД на предприятии, времени, результатов первичной диагностики и коэффициента отстройки  $k_{отс}$ . К требуемым для диагностики параметрам АД относятся номинальные ток и напряжение, число пар полюсов, время начала и конца зоны диагностирования и так далее. При этом результат первичной диагностики в виде среднего скорректированного значения отношения целого двигателя  $\sigma_{cp,ц}^*$  заносится в базу данных БД в качестве эталонного. В дальнейшем отношение  $\sigma_{cp,ц}^*$  используется для определения порога срабатывания порогового элемента ПЭ. На этом режим «Настройка» завершается. При этом на экране автоматически отражаются как параметры нового АД, так и результаты расчета в виде среднего скорректированного значения отношения  $\sigma_{cp,ц}^*$ .

Режим «Диагностика» осуществляется аналогично режиму «Настройка» вплоть до определения среднего скорректированного значения отношения, которое в режиме «Диагностика» помечается как  $\sigma_{cp,п}^*$ , поврежденного двигателя. Однако затем по соответствующей команде с клавиатуры КЛВ из базы данных БД извлекается эталонное значение среднего скорректированного отношения  $\sigma_{cp,ц}^*$ , которое в пороговом элементе ПЭ сравнивается с полученной величиной  $\sigma_{cp,п}^*$ . И если при этом величина  $\sigma_{cp,п}^*$  превысит порог срабатывания, определяемый как  $\sigma_{сраб}^* = k_{отс} \sigma_{cp,ц}^*$ , то ПЭ формирует для монитора сигнал – «Повреждение ротора». Если величина  $\sigma_{cp,п}^*$  окажется меньше  $\sigma_{сраб}^* = k_{отс} \sigma_{cp,ц}^*$ , то ПЭ формирует сигнал – «Ротор целый». При этом время диагностики, результаты диагностики и полученные значения  $\sigma_{cp,п}^*$  заносятся в базу данных БД.

Рассмотренная система диагностики позволяет достаточно просто осуществлять диагностику АД напряжением до 1000 В. Однако необходимость подключения для диагностики к блок контактам высоковольтных АД, например, в ячейках КРУ значительно усложняет процесс диагностики и по технологическим причинам может применяться не на всех АД. Этого в значительной мере можно избежать, если начало режима выбега АД определять по разности амплитуд зависимости



АД – асинхронный двигатель; Q – выключатель нагрузки; БКРВ – блок контроля режима выбега; TV – измерительный трансформатор напряжения; НУ – нормирующее устройство; КУ – кнопка управления; mV – милливольтметр; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БП – блок оперативной памяти для записи  $e_1^*(t) = e_1(t)/k_v$  в интервале времени от  $t_0$  до  $t_4$ ; БОЗД – блок определения зоны диагностирования; БВРР – блок выбора режима работы в виде «Настройка» и «Диагностика»; ПЭ – пороговый элемент; МОН – монитор ПК; БД – база данных; КЛВ – клавиатура ПК

**Рис. 4. Блок-схема устройства диагностики АД в котором информацию о повреждении ротора получают из ЭДС статора, а начало выбега определяют по разности ее амплитуд**  
**Fig. 4. Block diagram of the IM diagnostic device in which information about the damage to the rotor is obtained from the stator EMF, and the start of the rundown is determined by the difference in its amplitudes**

$e_1^*(t) = e_1(t)/k_v$ . На рис. 4 приведена блок-схема устройства диагностики начала режима выбега, в котором определяется блоком контроля режима выбега БКРВ.

В соответствии с рис. 2 режим выбега в отличие от режима до выбега имеет характерную разность амплитуд в зависимости  $e_1(t)$  в каждом периоде. Именно это предлагается использовать для определения времени перехода АД в режим выбега. Запуск режима диагностирования осуществляется с помощью блока БКРВ. Этот блок представляет собой замкнутый цикл с входными данными в виде зависимости  $e_1^*(t)$  длительностью в один период, в котором определяется положительная или отрицательная величина амплитуды  $e_1^*$  и

сравнивается с предыдущей ее величиной. И если предыдущая амплитуда будет больше следующей за ней, то происходит выход из цикла и формируется сигнал в виде  $t_0$  о начале диагностики АД, который поступает в блок памяти БП.

#### Закключение

Опытный образец системы диагностики обрыва стержней ротора показал, что такая ее реализация способна достаточно эффективно выявлять обрыв стержня ротора в режиме выбега АД. Ее стоимость невысока и определена в основном стоимостью ПК и программного обеспечения, что делает ее доступной для практически любого промышленного предприятия и некоммерческих организаций.

#### Список литературы

1. Ухань Ж.І., Калінов А.П. Класифікація методів діагностики пошкоджень обмоток ротора асинхронних двигунів // Вісник КДУ. 2010. № 3 (62), ч. 2. С. 138–144.
2. Нефтулин И.В. Анализ существующих методов диагностирования асинхронных двигателей на основе спектрального анализа: автореф. ... магист. техн. наук: 13.04.02. Донецк, 2008. 8 с.
3. Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трехфазных электрических машин / В.В. Тимошкин, Т.А. Глазырина, В.И. Полищук, А.С. Глазырин // Электричество. 2012. № 6. С. 42–45.
4. Браташ О.В., Калинов А.П. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей // Електромех. і енергозберігаючі системи. 2010. Вип. 2. С. 41–46.
5. Челомей В.Н. Вибрации в технике. М.: Машиностроение, 1981. Т. 5. 496 с.
6. Барков А.В., Баркова Н.А. Интеллектуальные системы мониторинга и диагностики машин по вибрации // Сб. тр. семинара «Современные проблемы вибрационной диагностики и виброзащиты энергетических установок». СПб., 1999. С. 115–156.
7. Балицкий Ф.Я., Иванова Соколова М.А. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. М.: Наука, 1984. 120 с.

8. Купцов В.В., Горзунов А.С., Сарваров А.С. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестационарных режимов работы // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2009. Вып. 12, № 34. С. 60–67.
9. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
10. Петушков М.Ю. Развитие метода спектрального анализа тока асинхронного двигателя для диагностирования // Главный энергетик. 2013. № 9. С. 70–75.
11. Kuptsov V., Petushkov M. A new approach to analysis of induction motors with rotor faults during startup based on the finite element method // Progress in Electromagnetics Research. 2012. Vol. 45. P. 269–290. DOI: 10.2528/PIERB12082916
12. Faiz J., Ebrahimi B.-M. A new pattern for detecting broken rotor bars in induction motors during start-up // IEEE Trans. Magn. 2008. Vol. 44, no. 12. P. 4673–4683. DOI: 10.1109/TMAG.2008.2002903
13. Fast Fourier and discrete wavelet transforms applied to sensorless vector control induction motor for rotor bar faults diagnosis / H. Talhaoui, A. Menacer, A. Kessal, R. Kechida // ISA Transactions. 2014. Vol. 53. P. 1639–1649. DOI: 10.1016/j.isatra.2014.06.003
14. Instantaneous frequency of the left sideband harmonic during the start-up transient a new method for diagnosis of broken bars / M. Pineda-Sanchez, M. Riera-Guasp, J.A. Antonino-Daviu et al. // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56, no. 11. P. 4557–4570. DOI: 10.1109/TIE.2009.2026211
15. Robust condition monitoring for early detection of broken rotor bars in induction motors / A. Luis, Garcna-Escudero, Oscar Duque-Perez et al. // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. P. 2653–2660. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.08.055
16. Akar M. Detection of rotor bar faults in field oriented controlled induction motors // Journal of Power Electronics. 2012. Vol. 5. P. 1–9. DOI: 10.6113/JPE.2012.12.6.982
17. A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis / G. Didiera, E. Ternisienb, O. Casparyb, H. Razika // Mechanical Systems and Signal Processing. 2007. Vol. 21. P. 1127–1142. DOI: 10.1016/j.ymssp.2006.03.002
18. Karamia F., Poshtan J., Poshtan M. Detection of broken rotor bars in induction motors using nonlinear Kalman filters // ISA Transactions. 2010. Vol. 49. P. 189–195. DOI: 10.1016/j.isatra.2009.11.005
19. Chen Shuo, Zivanovic R. Modelling and simulation of stator and rotor fault conditions in induction machines for testing fault diagnostic techniques // Euro. Trans. Electr. Power. 2010. Vol. 20. P. 611–629. DOI: 10.1002/etep.342
20. Virgiliu Fireteanu, Alexandru-Ionel Constantin, Zorig Assam. Impact of the Stator Short-circuit, Rotor Broken Bar and Eccentricity Faults on Rotor Force for Loaded and No-load Induction Motors Operation // Conference: 2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE). At: Craiova, Romania. 2018. P. 65–78. DOI: 10.1109/ICATE.2018.8551471
21. Diagnosis of Defective Rotor Bars in Induction Motors / Chun-Yao Lee, Kuan-Yu Huang, Lai-Yu Jen, Guang-Lin Zhuo // Symmetry. 2020. 12 (11), 1753. P. 110–112. DOI: 10.3390/sym12111753
22. Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors through Contrast Estimation / Edna Rocio Ferrucho-Alvarez, Ana Laura Martinez-Herrera, Eduardo Cabal-Yepez // Sensors. 2021. 21 (22), 7446. P. 32–44. DOI: 10.3390/s21227446
23. Novozhilov A.N., Yusupova A., Novozhilov T.A. A Device for Determining the Rotor Eccentricity of Rotating Electric Machines // Russian Electrical Engineering. 2019. Vol. 90 (2). P. 121–124. DOI: 10.3103/S106837121902007X
24. Novozhilov A.N., Yussupova A.O., Novozhilov T.A. Determining the Displacement of the Rotor Shaft in an Electrical Machine // Russian Engineering Research. 2019. Vol. 39 (10). P. 827–830. DOI: 10.3103/S1068798X19100204
25. Загирняк М.В., Ромашихина Ж.И., Калипов А.П. Диагностика повреждений стержней ротора в асинхронном двигателе на основании анализа его магнитного поля // Вісник НТУ «ХПІ». 2012. № 49 (955). С. 38–47.
26. Калінов А.П., Ухань Ж.І., Урдин І.В. Метод діагностики пошкоджень стрижнів ротора // Вісник КДПУ. 36. Наук. Праць КДПУ ім. М. Остроградського. 2009. Вип. 4 (57), ч. 1. С. 98–101.
27. Novozhilov A., Potapenko A., Novozhilov T. Process simulation in induction motor where short-circuit rotor bar is failed during run-down regime // Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 6/2018. DOI: 10.15199/48.2018.06.06
28. Новожилов А.Н., Воликова М.П. Коррекция токов в методе зеркальных отражений при моделировании магнитных полей электрических машин // Электричество. 2004. № 9. С. 45–49.
29. Новожилов А.Н. Методика расчета ЭДС точечных измерительных преобразователей защит электродвигателей // Известия вузов. Энергетика. 1990. № 11. С. 23–28.
30. Моделирование магнитных полей методом зеркальных отражений с коррекцией токов для синтеза защит электрических машин / А.Н. Новожилов, М.П. Воликова, В.И. Полищук и др. // Электричество. 2008. № 11. С. 56–63.

31. Неклепаев Б.Н., Крюков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций // Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: учеб. пособие для вузов. – Изд. 4-е. М.: Энергоатомиздат, 1989. 608 с.

32. Андреева О.А. Разработка методов диагностики двигателей собственных нужд электрических станций: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.02. Новосибирск, 2009. 159 с.

33. Особенности построения системы диагностики электрических машин на базе персонального компьютера со встроенной звуковой картой / А.Н. Новожилов, А.В. Антонцев, А.В. Мануковский и др. // Электротехника. 2012. № 5. С. 36–40.

## References

1. Ukhan' Zh.I., Kalinov A.P. [Classification of methods for diagnosing damage to rotor windings of induction motors]. *Visnik KDU*. 2010;3(62):138–144. (In Ukraine)

2. Neftulin I.V. *Analiz sushchestvuyushchikh metodov diagnostirovaniya asinkhronnykh dvigateley na osnove spektral'nogo analiza: avtoref. magist. tekhn. nauk: 13.04.02* [Analysis of existing methods for diagnosing asynchronous motors based on spectral analysis: abstract of the master of technical sciences: 13.04.02.]. Donetsk, 2008. 8 p. (In Russ.)

3. Timoshkin V.V., Glazyrina T.A., Polishchuk V.I., Glazyrin A.S. [Functional wavelet diagnostics of the state of the rotor windings of three-phase electrical machines]. *Elektrical Technology Russia*. 2012;(6):42–45. (In Russ.)

4. Bratash O.V., Kalinov A.P. [Analysis of methods for vibration diagnostics of asynchronous motors]. *Elektromekh i energozberigaiuchi sistemi*. 2010;2:41–46. (In Russ.)

5. Chelomei V.N. *Vibratsii v tekhnike* [Vibrations in engineering]. Moscow: Mashinostroenie; 1981, vol. 5. 496 p. (In Russ.)

6. Barkov A.V., Barkova N.A. [Intelligent systems for monitoring and diagnosing machines by vibration]. In: *Sb. tr. seminar "Sovremennye problemy vibratsionnoi diagnostiki i vibrozashchity energeticheskikh ustanovok"* [Sat. tr. Seminar "Modern problems of vibration diagnostics and vibration protection of power plants"]. 1999. P. 115–156. (In Russ.)

7. Balitskiy F.Ya., Ivanova M.A., Sokolova A.G. *Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayushchikhsya defektov* [Vibroacoustic diagnostics of nascent defects]. Moscow: Nauka, 1984. 120 p. (In Russ.)

8. Kuptsov V.V., Gorzunov A.S., Sarvarov A.S. Development of current signature analysis technique to detect faults in induction motors by oscillograms of unsteady-state machine operation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2009;12(34):60–67. (In Russ.)

9. Vol'dek A.I. *Elektricheskie Mashiny* [Electric machines]. Leningrad: Energiya, 1978. 832 p. (In Russ.)

10. Petushkov M.Yu. [Development of the Method of Spectral Analysis of the Current of an Induction Motor for Diagnosis]. *Glavnyy energetik*. 2013;(9):70–75. (In Russ.)

11. Kuptsov V., Sarvarov A., Petushkov M. A new approach to analysis of induction motors with rotor faults during startup based on the finite element method. *Progress in Electromagnetics Research*. 2012;45:269–290. DOI: 10.2528/PIERB12082916

12. Faiz J., Ebrahimi B.-M. A new pattern for detecting broken rotor bars in induction motors during start-up. *IEEE Trans. Magn.* 2008;44(12):4673–4683. DOI: 10.1109/TMAG.2008.2002903

13. Talhaoui H., Menacer A., Kessal A., Kechida R. Fast Fourier and discrete wavelet transforms applied to sensorless vector control induction motor for rotor bar faults diagnosis. *ISA Transactions*. 2014;53:1639–1649. DOI: 10.1016/j.isatra.2014.06.003

14. Pineda-Sanchez M., Riera-Guasp M., Antonino-Daviu J.A., Roger-Folch J., Perez-Cruz J., Puche-Panadero R. [Instantaneous Frequency of the Left Sideband Harmonic During the Start-Up Transient a New Method for Diagnosis of Broken Bars]. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009;56(11):4557–4570. DOI: 10.1109/TIE.2009.2026211

15. Luis A., Garcia-Escudero, Oscar Duque-Perez et al. Robust condition monitoring for early detection of broken rotor bars in induction motors. *Expert Systems with Applications*. 2011;38:2653–2660. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.08.055

16. Akar M. Detection of rotor bar faults in field oriented controlled induction motors. *Journal of Power Electronics*. 2012;5:1–9. DOI: 10.6113/JPE.2012.12.6.982

17. Didiera G., Ternisienb E., Casparyb O., Razika H. new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2007;21:1127–1142. DOI: 10.1016/j.ymssp.2006.03.002

18. Karamia F., Poshtan J., Poshtan M. Detection of broken rotor bars in induction motors using nonlinear Kalman filters. *ISA Transactions*. 2010;49:189–195. DOI: 10.1016/j.isatra.2009.11.005

19. Shuo Chen, Zivanovic R. Modelling and simulation of stator and rotor fault conditions in induction machines for testing fault diagnostic techniques. *Euro. Trans. Electr. Power*. 2010;20:611–629. DOI: 10.1002/etep.342

20. Virgiliu Fireteanu, Alexandru-Ionel Constantin, Zorig Assam. Impact of the Stator Short-circuit, Rotor Broken Bar and Eccentricity Faults on Rotor Force for Loaded and No-load Induction Motors Operation. In: *Conference: 2018 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE). At: Craiova, Romania.* 2018. P. 65–78. DOI: 10.1109/ICATE.2018.8551471
21. Chun-Yao Lee, Kuan-Yu Huang, Lai-Yu Jen, Guang-Lin Zhuo. Diagnosis of Defective Rotor Bars in Induction Motors. *Symmetry*. 2020;12(11):1753:110–112. DOI: 10.3390/sym12111753
22. Edna Rocio Ferrucho-Alvarez, Ana Laura Martinez-Herrera, Eduardo Cabal-Yepez. Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors through Contrast Estimation. *Sensors*. 2021;21(22):7446:32–44. DOI: 10.3390/s21227446
23. Novozhilov A.N., Yusupova A., Novozhilov T.A. A Device for Determining the Rotor Eccentricity of Rotating Electric Machines. *Russian Electrical Engineering*. 2019;90(2):121–124. DOI: 10.3103/S106837121902007X
24. Novozhilov A.N., Yussupova A.O., Novozhilov T.A. Determining the Displacement of the Rotor Shaft in an Electrical Machine. *Russian Engineering Research*. 2019;39(10):827–830. DOI: 10.3103/S1068798X19100204
25. Zagirniak M.V., Romashikhina Zh.I., Kalipov A.P. [Diagnosis of Damage to Rotor Rods in an Induction Motor Based on the Analysis of Its Magnetic Field]. *Visnik NTU "KhPI"*. 2012;49(955):38–47. (In Russ.)
26. Kalinov A.P., Ukhani' Zh.I., Urdin I.B. [Diagnosis Method Poshkodzhen Strizhnev Rotor]. *Visnik KDPU. Zb. Nauk. Prats' KDPU im.M. Ostrogradskogo*. 2009;4(57),1:98–101. (In Ukraine)
27. Novozhilov A., Potapenko A., Novozhilov T. Process simulation in induction motor where short-circuit rotor bar is failed during run-down regime. *Przegląd elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 6/2018, DOI: 10.15199/48.2018.06.06
28. Novozhilov A.N., Volikova M.P. [Correction of currents in the method of mirror reflections in the simulation of magnetic fields of electrical machines]. *Elektrical Technology Russia*. 2004;(9):45–49. (In Russ.)
29. Novozhilov A.N. [Methodology for Calculating the EMF of Point Measuring Converters for Protection of Electric Motors]. *Izvestiya vuzov. Energetika*. 1990;(11):23–28. (In Russ.)
30. Novozhilov A.N., Volikova M.P., Polishchuk V.I., Novozhilov T.A., Andreeva O.A. [Modeling of Magnetic Fields by the Method of Specular Reflections with Correction of Currents for the Synthesis of Protections of Electrical Machines]. *Elektrical Technology Russia*. 2008;(11):56–63. (In Russ.)
31. Neklepayev B.N., Kryukov I.P. *Elektricheskaya chast' elektrostantsiy i podstantsiy: Spravochnyye materialy dlya kursovogo i diplomnogo proyektirovaniya: ucheb.* [Electrical Part of Power Plant and Substation: Reference Materials for Course and Diploma Design: Textbook]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 608 p. (In Russ.)
32. Andreyeva O.A. *Razrabotka metodov diagnostiki dvigateley sobstvennykh nuzhd elektricheskikh stantsiy: dis. kand. tekhn. nauk: 05.14.02* [Development of Methods for Diagnostics of Engines of Own Needs of Electric Power Plants. Cand. sci. diss.: 05.14.02]. Novosibirsk; 2009. 159 p. (In Russ.)
33. Novozhilov A.N., Antontsev A.V., Manukovskiy A.V., Isupova N.A., Kryukova E.V. [Features of Building a Diagnostic System for Electrical Machines Based on a Personal Computer with a Built-in Sound Card]. *Russian Electrical Engineering*. 2012;(5):36–40. (In Russ.)

#### **Информация об авторах**

**Потапенко Александра Олеговна**, PhD, ассоц. профессор (доцент) факультета Computer Science, Торайгыров университет, Павлодар, Республика Казахстан; alxopt@gmail.com.

**Юсупова Асель Оразовна**, PhD, ассоц. профессор (доцент) кафедры «Электротехника и автоматизация», Торайгыров университет, Павлодар, Республика Казахстан; aselasp@mail.ru.

**Латыпов Сергей Ильдусович**, PhD, ассоц. профессор (доцент) кафедры «Энергетика и радиоэлектроника», Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева, Петропавловск, Республика Казахстан; slatypov@mail.ru.

#### **Information about the authors**

**Aleksandra O. Potapenko**, PhD, Computer Science faculty associate professor, Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan; alxopt@gmail.com.

**Assel O. Yussupova**, PhD, Electrical engineering and automatization department associate professor, Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan; aselasp@mail.ru.

**Sergey I. Latypov**, PhD, Energetic and radioelectronics department associate professor, Manash Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Republic of Kazakhstan; slatypov@mail.ru.

**Статья поступила в редакцию 21.11.2021; одобрена после рецензирования 23.12.2021; принята к публикации 21.02.2022.**

**The article was submitted 21.11.2021; approved after reviewing 23.12.2021; accepted for publication 21.02.2022.**