

# Двухскоростной асинхронный двигатель как источник опасности электропоражения в условиях эксплуатации технологических участков угольных шахт

Е.В. Денисова<sup>1</sup>✉, К.Н. Маренич<sup>2</sup>, Е.С. Дубинка<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Донецкая народная республика  
✉ deni\_sovaev@mail.ru

**Резюме:** Опасные состояния шахтной участковой электрической сети поддерживаются обратными энергетическими потоками асинхронных двигателей потребителей в режиме выбега после отключения напряжения питания. Опасность электропоражения представляют также ЭДС, индуцируемые в отключенных обмотках статора двухскоростных двигателей вследствие трансформаторного эффекта. В статье представлена методика и результаты исследования процессов формирования индуцируемых ЭДС в отключенных обмотках статоров двухскоростного асинхронного двигателя, включая режим выбега и функции воздействия на электромагнитные параметры. Представлен анализ степени влияния этих индуцируемых ЭДС на параметры электробезопасности в структуре шахтного участкового электротехнического комплекса.

**Ключевые слова:** электротехнический комплекс, двухскоростной асинхронный двигатель, режим выбега, обратная ЭДС, защитное обесточивание, управление параметрами, моделирование, функциональные зависимости

**Для цитирования:** Денисова Е.В., Маренич К.Н., Дубинка Е.С. Двухскоростной асинхронный двигатель как источник опасности электропоражения в условиях эксплуатации технологических участков угольных шахт. *Горная промышленность*. 2021;(4):145–152. DOI 10.30686/1609-9192-2021-4-145-152.

## A Dual-speed Induction Motor as a Source of Electrical Hazard in Operating Conditions of Coal Mine Process Support Areas

E.V. Denisova<sup>1</sup>✉, K.N. Marenich<sup>2</sup>, E.S. Dubinka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic  
✉ deni\_sovaev@mail.ru

**Abstract:** Hazardous states of the mine zonal electrical network are caused by the reversed energy flows of induction motors of the energy-consuming equipment in the run-down mode after the power supply is switched off. The electromotive force (EMF) induced in the powered-off stator windings of the dual-speed motors due to the transformer effect also pose a danger of electric shock. The paper presents a methodology and the results of studying the formation of induced EMFs in the powered-off stator windings of dual-speed induction motors, including the run-down mode and the functions that impact on the electromagnetic parameters. Analysis of the impact degree of these induced EMFs on the electrical safety parameters as part of the mine zonal electrical network is presented.

**Keywords:** electrotechnical complex, dual-speed induction motor, run-down mode, back electromotive force, safety de-energizing, parameter control, modeling, functional dependencies

**For citation:** Denisova E.V., Marenich K.N., Dubinka E.S. A Dual-speed Induction Motor as a Source of Electrical Hazard in Operating Conditions of Coal Mine Process Support Areas. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*. 2021;(4):145–152. (In Russ.) DOI 10.30686/1609-9192-2021-4-145-152.

**Введение**

**Постановка проблемы.** Высокие мощности электропотребителей технологических участков угольных шахт, удалённость многих из них от участков комплектных трансформаторных подстанций (КТП) обусловили целесообразность применения относительно высоких уровней напряжения шахтных участков электрических сетей (660 В и 1140 В), что является фактором, усугубляющим последствия поражения персонала электрическим током. Технология горных работ предусматривает широкое использование нестационарного оборудования, что, в свою очередь, диктует необходимость применения гибких (механически незащищённых) силовых кабелей и также повышает вероятность электротравматизма персонала. Поэтому проблематика обеспечения защиты от поражения электрическим током в условиях шахты является крайне актуальной и реализуется комплексом технических средств:

- построением систем электроснабжения шахтных подземных технологических участков исключительно с соблюдением режима изолированной нейтрали трансформатора;
- применением аппаратов утечек тока на землю (АЗ), управляющих отключением выходного напряжения участковой трансформаторной подстанции в момент снижения сопротивления между фазой и землёй ниже допустимой величины, сопровождающимся закорачиванием на землю повреждённой фазы и компенсацией ёмкости изоляции сети.

Однако данная защитная функция ограничивается отделением от сети энергетического потока, создаваемого трансформаторной подстанцией, и не распространяется на энергетические потоки асинхронных двигателей потребителей, переходящих в режим выбега. Следовательно, функция защиты недостаточна для обеспечения электробезопасности персонала шахты. Данная проблема ещё более усугубляется в связи с тенденцией широкого применения двухскоростных асинхронных двигателей в составе электроприводов шахтных технологических установок, в частности, скребковых конвейеров (в связи с необходимостью осуществления пусковых режимов и некоторых доставочных операций на уровнях пониженной скорости исполнительных органов). Наличие двух, поочерёдно либо обособленно включаемых обмоток статора на общем магнитопроводе такого двигателя создаёт эффект индукции ЭДС в отключенную обмотку статора, что потенциально опасно.

**Анализ исследований и публикаций.** Основной объём исследований, связанных с решением задач обеспечения электробезопасности при эксплуатации рудничных электроустановок, выполнен в контексте построения технических средств защиты от утечек тока на землю и расширения их функциональности. К ним относится обоснование: общей концепции выявления утечки тока на землю [1]; способов и параметров устройств выявления утечки тока на землю и закорачивания на землю повреждённой фазы, а также способов компенсации ёмкости изоляции сети [2]; технических решений по защите от электропоражения в комбинированных шахтных электрических сетях (сети, содержащие асинхронные частотно-управляемые электроприводы) [3].

Проблематика, относящаяся к воздействию на шахтную участковую электрическую сеть со стороны обратных энергетических потоков асинхронных двигателей

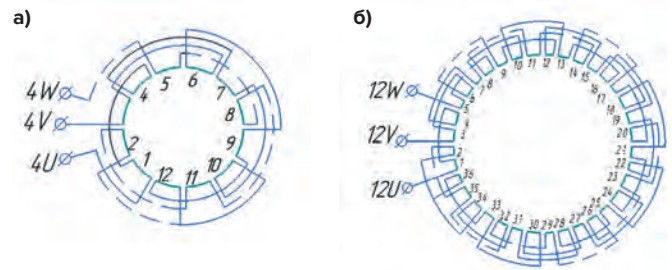
потребителей комплексно исследована в монографии [4]. Здесь же рассмотрены вопросы, относящиеся к процессам формирования «трансформаторных» ЭДС двухскоростных асинхронных двигателей и к обоснованию структуры схем устройств выявления аварийных и опасных состояний электросети, действующих автономно, в том числе при подключении к вводам асинхронных двигателей потребителей. В результате обоснована концепция применения двустороннего (со стороны трансформаторной подстанции и со стороны двигателей потребителей) обесточивания рудничных электротехнических комплексов.

Однако научную и практическую актуальность в этом случае представляют исследования процессов, позволяющих решить задачу динамичного (быстродействующего) подавления обратных энергетических потоков асинхронных, в том числе двухскоростных двигателей, при наличии соответствующей команды, сформированной устройством защиты.

**Цель исследования.** Целью исследования является изучение электропоражающих факторов в процессе отключения электропотребителей, оснащённых асинхронными двигателями, и степени эффективности способов управления электромагнитными параметрами двухскоростных асинхронных двигателей в контексте подавления их обратных энергетических потоков в процессе защитного отключения электросети.

**Основной материал исследования**

Существенным отличием в конструкции двухскоростного рудничного асинхронного двигателя является размещение на общем магнитопроводе статора двух трёхфазных обмоток с различным числом пар (2р) полюсов (рис. 1) [4, 5].



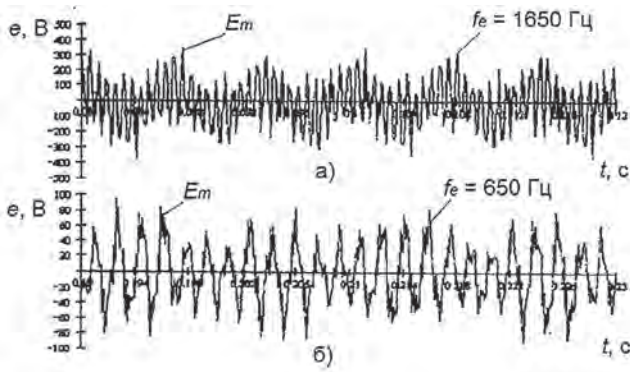
**Рис. 1**  
Схемы обмоток статора двигателя серии ЭДКВФ:  
а) обмотка номинальной скорости (число полюсов 2р = 4);  
б) обмотка пониженной скорости (число полюсов 2р = 12)

**Fig. 1**  
Diagrams of stator windings of the EDKVF motor series:  
а) rated speed winding (number of poles: 2р = 4);  
б) reduced speed winding (number of poles: 2р = 12)

«Трансформаторный» эффект при эксплуатации таких двигателей проявляется в индуцировании ЭДС в их отключенных от сети обмотках статора, амплитуда ЭМ и частота fe (высокочастотная составляющая спектра частот) которых представляют опасность электропоражения персонала (рис. 2; рис. 3) [4].

Таким образом, в процессе работы двухскоростного асинхронного двигателя в его силовой цепи будут действовать два электропоражающих параметра:

- напряжение сети промышленной частоты в цепи подключенной обмотки статора (цепь контролируется аппаратом защиты АЗ);
- «трансформаторная» ЭДС в отключенной обмотке ста-



**Рис. 2**  
Осциллограммы вторичных ЭДС асинхронного двигателя в обмотках пониженной ( $2p = 12$ , а) и номинальной ( $2p = 4$ , б) скоростей асинхронного двигателя ЭДКВФ-355L12/4

**Fig. 2**  
Oscillograms of secondary EMF of an induction motor in the windings of the reduced ( $2p = 12$ , а) and rated ( $2p = 4$ , б) speeds of the EDKVF-355L12/4 induction motor

тора (в соответствии с рис. 2), повышенная частота которой существенно снижает ёмкостное сопротивление изоляции кабеля ( $X_c = 1 / 2 \pi f C$ ). Цепь не контролируется аппаратом защиты АЗ.

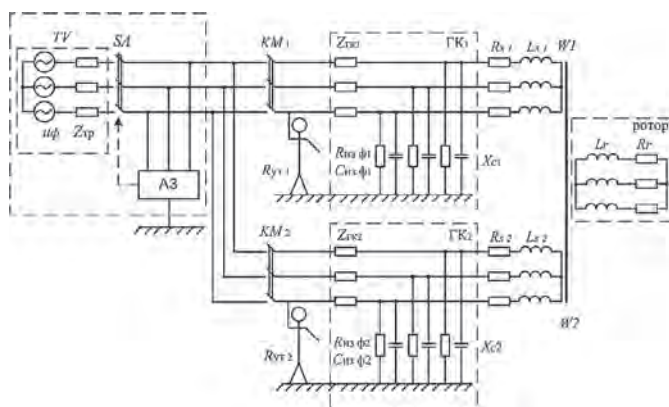
После отключения напряжения со стороны трансформаторной подстанции (автоматическим выключателем SA либо контактором КМ пускателя, рис. 3) функция контроля утечки тока на землю (РУТ) со стороны АЗ прекращается. Тем не менее следует полагать, что, поскольку на начальном интервале времени после отключения питающего напряжения на обмотке статора, ранее присоединённой к сети, будет формироваться экспоненциально снижающаяся по амплитуде и частоте ЭДС вращения, вследствие магнитной связи между статорными обмотками индуцирование ЭДС будет иметь место и в другой обмотке статора. Специфика этих индукционных процессов состоит в том, что они протекают в цилиндрических магнитопроводах вращающегося ротора двигателя, охватывая обмотки

статора, имеющие разное число пар полюсов. Учитывая, что ЭДС, индуцируемые в обмотках статора, относятся к электропоражающим факторам, научную и практическую актуальность представляют исследования этого процесса методом моделирования, включая установление закономерностей, свойств эффекта закорачивания отключенной обмотки статора в момент отключения напряжения питающей сети в контексте влияния на параметры обратной ЭДС в смежной обмотке статора двухскоростного асинхронного двигателя.

Исследование процесса индуцирования ЭДС в обмотках статора двухскоростного двигателя, включая состояние выбега, предполагает необходимость установления закономерности формирования трансформаторной ЭДС в отключенной обмотке статора работающего двухскоростного асинхронного двигателя. Общий подход к решению задачи этого этапа может быть построен на основе исследований [6] и состоять в следующем порядке действий:

- определение взаимной индуктивности между подключенной обмоткой статора и ротора в функции угла поворота ротора;
- определение мгновенных значений токов фаз подключенной обмотки статора и ротора; вычисление распределения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя как функции времени на основе информации о мгновенных значениях токов;
- расчёт ЭДС пазовых проводников отключенной обмотки; определение ЭДС, наводящейся в каждой фазе отключенной обмотки, путём суммирования ЭДС пазовых проводников с учётом схемы соединения обмотки.

Определение взаимной индуктивности ротора и обмоток статора двигателя может быть выполнено на основе расчёта индукции магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором (путём суммирования индукций статора и ротора). При этом индукция результирующего поля в области каждого паза представляется в виде наложения индукции непарного поля от тока паза (с учётом предположения об отсутствии поля, внешнего по отношению к пазу) и индукции парного поля (внешнего по отношению к пазу) пазов магнитопровода (с учётом предположения об отсутствии тока в данном пазу). При вычислении индукции парного и непарного полей в области каждого паза учитываются магнитодвижущие силы соответствующих обмотк. Расчёт потокосцепления фазной обмотки в этом случае выполняется на основании предварительного расчёта суммы потокосцеплений обмоток, принадлежащих одной и той же фазе с учётом пар полюсов, представленной конструкцией двигателя. Делением потокосцепления фазы на её ток (при отсутствии тока в других фазах статора и ротора) определяются величины собственных и взаимных индуктивностей ротора и обмоток статора.



**Рис. 3**  
Схема формирования и контроля электропоражающего фактора при эксплуатации двухскоростного асинхронного двигателя в структуре электротехнического комплекса участка шахты: TV – силовой трансформатор комплектной трансформаторной подстанции (КТП); АЗ – аппарат защиты от утечек тока на землю;  $R_s, L_s$  – активное сопротивление и индуктивность статора первого (индекс 1) и второго (индекс 2);  $R_{из\ ф}, C_{из\ ф}$  – активное сопротивление и емкость изоляции, соответственно первого (индекс 1) и второго (индекс 2) кабельных присоединений;  $R_{ут} = 1 \text{ кОм}$  – сопротивление утечки (тела человека, прикоснувшегося к фазе сети); W1, W2 – обмотки статора двигателя, номинальной и пониженной скорости соответственно

**Fig. 3**  
Schematic diagram of formation and control of the electric shock factor during operation of a dual-speed induction motor as part of the electrotechnical complex of a mine site: TV is the power transformer of the package transformer substation (CTS); AZ is the ground current leakage protection device;  $R_s, L_s$  are the active resistance and inductance of the first (index 1) and second (index 2) stator;  $R_{из\ ф}, C_{из\ ф}$  are the resistance and capacity of insulation, respectively, of the first (index 1) and second (index 2) cable connections;  $R_{ут} = 1 \text{ kOhm}$  is the leakage resistance (of a human body touching the network phase); W1, W2 are the motor stator windings, rated and reduced speed, respectively

Для определения взаимной индуктивности  $M(\theta)=\psi_{ra}/i_{sa}$  как функции соотношения потокосцепления  $\psi_{ra}$  фазы ротора и тока  $i_{sa}$  фазы статора (в функции угла  $\theta$  поворота ротора) введём допущение о подключении обмотки фазы статора к источнику тока, изменяющегося синусоидально с амплитудой 1А и частотой 50 Гц в предположении, что за период 0,02с изменения тока ротор поворачивается на  $2\pi$  рад. С учётом этого интегрированием индукции в воздушном зазоре в пределах размещения каждой катушки статора и с учётом длины магнитопровода может быть вычислено значение потокосцепления каждой катушки статора для каждого момента времени. Потокосцепления фазных обмоток статора определяются расчётом суммы потокосцеплений соответствующих катушек. Аналогично вычисляются потокосцепления фаз ротора.

Величина  $M(\theta)=\psi_{ra}/i_{sa}$  является чётной функцией, для которой постоянная составляющая тригонометрического ряда Фурье  $a_0 = 0$  и амплитуды синусоидальных составляющих являются нулевыми  $b_k = 0$ , то есть при анализе можно ограничиться определением только амплитуд  $a_k$  косинусоидальных составляющих. В частности, для параметров двухскоростного асинхронного двигателя АДВК-355LA12/4 (номинальная мощность 85 / 250 кВт, номинальное линейное напряжение питания 1140 В) зависимость  $M(\theta)=\psi_{ra}/i_{sa}$  представляется выражением:

$$M(\theta) = 8,57 \cdot 10^{-2} \cdot \cos(2\theta) + 4,12 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(6\theta) + 2,65 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(34\theta) - 2,96 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(38\theta). \quad (1)$$

В дальнейшем целесообразно сопоставить полученные значения взаимной индуктивности  $M(\theta)$  с величинами, рассчитанными по кривой индукции, и при различиях, находящихся в допустимом интервале ( $\approx 5\%$ ), упростить дальнейшие расчёты учётом только выявленных гармоник для анализа кривой взаимной индуктивности статора и ротора. Применительно к процессам в двигателе АДВК-355LA12/4, это гармоники: 2-я, 6-я 34-я, 38-я.

Переходные процессы в двигателе относительно составляющих потокосцеплений с учётом угла поворота ротора  $\theta$  описываются уравнением [6]:

$$\frac{d\bar{\psi}_{\Delta\Delta}}{dt} = \bar{F}_{\Delta\Delta} \cdot \bar{\psi}_{\Delta\Delta} + \bar{G}_{\Delta\Delta} \cdot \bar{S}_{\Delta\Delta} + \bar{H}_{\Delta\Delta} \cdot \bar{U}_{\Delta\Delta}, \quad (2)$$

где  $\bar{\psi}_{\Delta\Delta} = [\psi_{sa} \ \psi_{sb} \ \psi_{ra} \ \psi_{rb} \ \omega \ \theta]^T$  – вектор переменных состояний;  $\bar{G}_{\Delta\Delta}$ ,  $\bar{H}_{\Delta\Delta}$  – матричные константы;  $\bar{S}_{\Delta\Delta} = [-\omega\psi_{rp} \ \omega\psi_{ra} \ (M_r - M_s) / J]^T$  – вектор нелинейных соотношений между переменными состояниями;  $\bar{U}_{\Delta\Delta} = [u_{\Delta\Delta} \ u_{rc} \ u_{ca}]^T$  – вектор линейных напряжений статора;  $\bar{F}_{\Delta\Delta} = \bar{R} \cdot \bar{M}^{-1}(\theta)$ , причём  $\bar{R}$  – матрица, учитывающая сопротивления контуров статора и ротора;  $\bar{M}^{-1}(\theta)$  – матрица, обратная к матрице  $\bar{M}(\theta)$  индуктивностей двигателя:

$$\bar{M}(\theta) = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & M_3 & M_4 & 0 & 0 \\ 0 & L_1 & -M_4 & M_3 & 0 & 0 \\ M_3 & -M_4 & L_1 & 0 & 0 & 0 \\ M_4 & M_3 & 0 & L_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\bar{M}^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{L_1}{M_{10}} & 0 & -\frac{M_3}{M_{10}} & -\frac{M_4}{M_{10}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L_1}{M_{10}} & \frac{M_4}{M_{10}} & -\frac{M_3}{M_{10}} & 0 & 0 \\ -\frac{M_3}{M_{10}} & -\frac{M_4}{M_{10}} & \frac{L_1}{M_{10}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{M_4}{M_{10}} & -\frac{M_3}{M_{10}} & 0 & \frac{L_1}{M_{10}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

причём

$$M_{10} = L_1^2 - M_3^2 - M_4^2; \quad (5)$$

$$M_3 = M(\theta) - \frac{M(\theta - \rho)}{2} - \frac{M(\theta + \rho)}{2}; \quad (6)$$

$$M_4 = \frac{\sqrt{3}}{2} [M(\theta + \rho) - M(\theta - \rho)]; \quad (7)$$

$$L_1 = L_\sigma + \frac{3}{2} L, \quad (8)$$

где  $L$  – собственная индуктивность обмотки статора (ротора);  $L_{\sigma s} = L_{\sigma r} = L_\sigma$  – индуктивности рассеяния статора и ротора (в предположении об их тождестве);  $\rho = 2\pi/3$  – взаимная индуктивность между фазами статора и ротора в функции угла поворота ротора.

Учитывая в выражении для определения  $\bar{F}_{\Delta\Delta}$  обратную матрицу индуктивности  $\bar{M}^{-1}(\theta)$ , получим:

$$\bar{F}_{\Delta\Delta} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_3 & b_4 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & -b_4 & b_3 & 0 & 0 \\ b_5 & -b_6 & b_2 & 0 & 0 & 0 \\ b_6 & b_5 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где

$$b_i = \begin{cases} -R_x \frac{L_1}{M_{10}}, & i = 1, 2; \\ R_x \frac{M_j}{M_{10}}, & i = 3 \div 6. \end{cases} \quad (10)$$

Составляющие  $M_j$  и  $R_x$  уравнений определяются из табл. 1.

Таблица 1  
Значения величин  $M_j$  и  $R_x$   
для выражения (4)

Table 1  
Values of the  $M_j$  and  $R_x$   
quantities for expression (4)

i	1	2	3	4	5	6
$M_j$	–	–	$M_3$	$M_4$	$M_3$	$M_4$
$R_x$	$R_s$	$R_r$	$R_s$	$R_s$	$R_r$	$R_r$

При этом токи фаз подключенной обмотки статора и ротора рассчитываются с использованием соотношения:

$$\bar{I}_{\alpha\beta} = \bar{M}^{-1}(\theta) \cdot \bar{\Psi}_{\Delta\Delta}, \quad (11)$$

где  $\bar{I}_{\alpha\beta} = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{ra} \ i_{rb} \ \omega\theta]^T$  – вектор проекций токов двигателя.

Для вычисленных таким образом значений токов определяются распределения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя для каждого момента времени. Рассмотрим случай размещения в пазах статора двигателя АДВК-355LA12/4 [5] второй однослойно концентрической обмотки (W2) при  $2p = 12$ ,  $m = 3$ ,  $z = 36$ ,  $q = 2$ ,  $a = 1$ ,  $W_{c2} = 40$ , которая отключена от источника питания. С учётом схемы отключенной обмотки W2 статора ЭДС проводников каждого паза рассчитывается по формуле:  $e_{нас}(t) = n \cdot B(t) \cdot L \cdot R \cdot \omega$ , где  $n$  – количество проводников в пазу;  $B$  – индукция поля, соответствующая положению паза;  $L$  – активная длина проводника;  $R$  – радиус вращения проводника;  $\omega$  – круговая скорость относительного вращения поля и проводника.

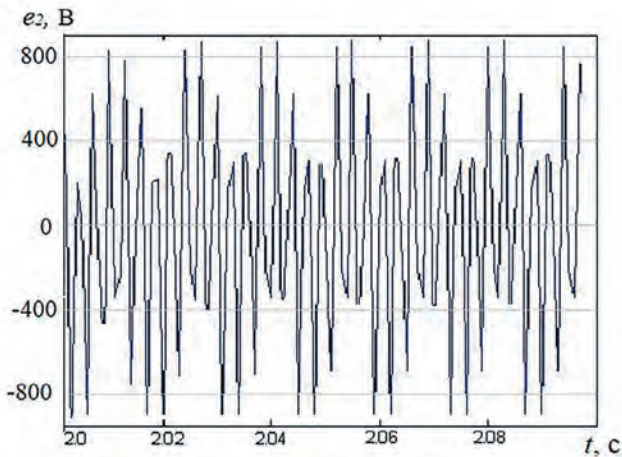
Определенные таким образом ЭДС пазовых проводников суммируются (с учётом схемы соединения обмотки), что позволяет определить величину ЭДС  $e_2$ , индуцируемой в каждой фазе отключенной обмотки W1 и W2.

Для двигателя АДВК-355L12/4 ( $U_n = 1140$  В), статор которого оборудован двумя обмотками номинальной скорости (W1;  $2p = 4$ ) и пониженной скорости (W2;  $2p = 12$ ), графики мгновенных значений такой ЭДС приведены на рис. 4 и 5.

Полученный результат позволяет говорить о потенциально опасной (по фактору электропоражения человека) величине ЭДС в отключенной от сети обмотке статора работающего двухскоростного асинхронного двигателя, поскольку применительно к схеме (рис. 2) ток в цепи утеч-

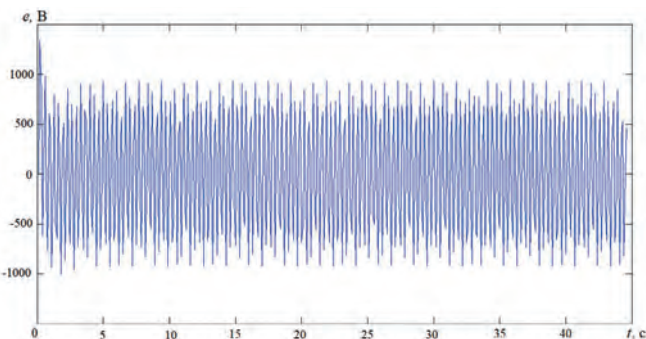
ки  $R_{\text{ут}} = 1$  кОм между фазой и контуром «земля» (рис. 6, 8), формируемый данной ЭДС, создаёт уровень количества электричества  $q$  в цепи утечки, превышающий безопасное значение ( $q = 50$  мА·с) уже спустя 0,1 с, начиная с момента появления утечки, т.е. касания человеком токоведущего элемента отключенной от сети обмотки статора АД.

Эффективным средством подавления обратных ЭДС асинхронного двигателя является закорачивание его статорной обмотки в процессе отключения напряжения сети,



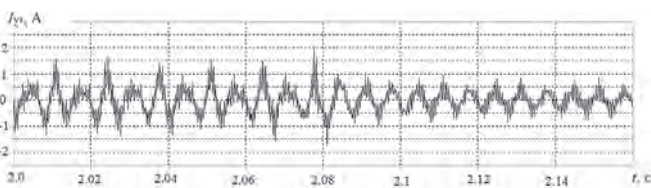
**Рис. 4**  
 Диаграммы величин ЭДС в отключенной обмотке W2 фазы статора двухскоростного асинхронного двигателя АДВК-355L12/4

**Fig. 4**  
 Diagrams of the EMF values in the powered-off stator phase W2 winding of the ADVK-355L12/4 dual-speed induction motor



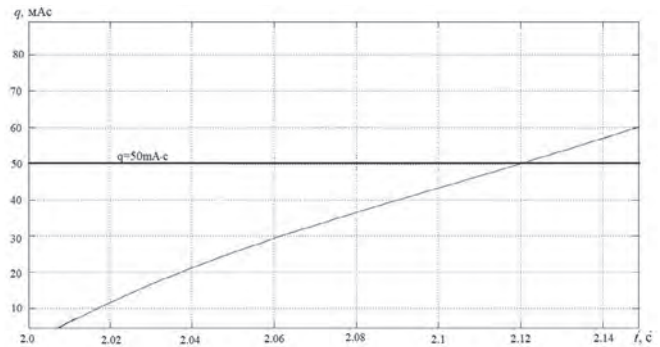
**Рис. 5**  
 Диаграммы величин ЭДС в отключенной обмотке W1 фазы статора двухскоростного асинхронного двигателя АДВК-355L12/4

**Fig. 5**  
 Diagrams of the EMF values in the powered-off stator phase W1 winding of the ADVK-355L12/4 dual-speed induction motor



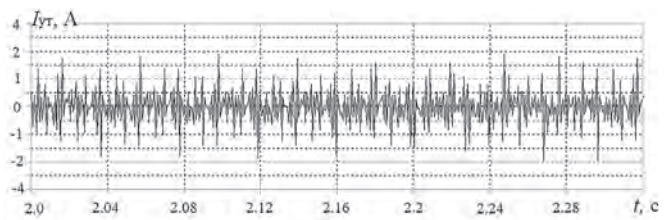
**Рис. 6**  
 Мгновенные значения тока утечки на землю через тело человека ( $R_{\text{ут}} = 1$  кОм) в случае касания жилы кабеля отключенной обмотки (W2) двухскоростного АД

**Fig. 6**  
 Instantaneous values of the leakage current to the ground through a human body ( $R_{\text{ут}} = 1$  кОм) in case of touching the cable core of the powered-off winding (W2) of a dual-speed induction motor



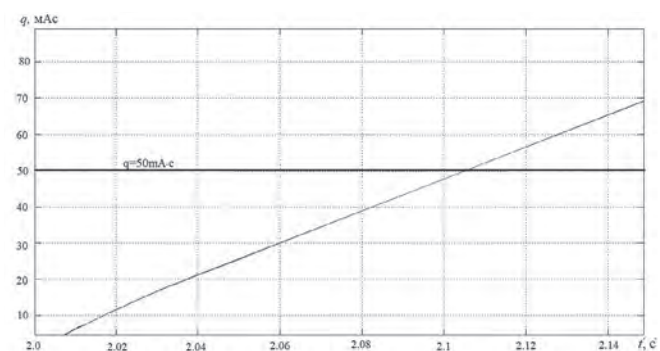
**Рис. 7**  
 Диаграммы величин количества электричества  $q$  через сопротивление утечки тока на землю ( $R_{\text{ут}} = 1$  кОм) при касании к отключенной от сети обмотке W1 АД (рис. 2)

**Fig. 7**  
 Diagrams of electric quantities  $q$  through the earth leakage resistance ( $R_{\text{ут}} = 1$  кОм) in case of touching the powered-off winding W1 of an induction motor (Fig. 2)



**Рис. 8**  
 Мгновенные значения тока утечки на землю через тело человека ( $R_{\text{ут}} = 1$  кОм) в случае касания жилы кабеля отключенной обмотки (W1) двухскоростного АД

**Fig. 8**  
 Instantaneous values of the leakage current to the ground through a human body ( $R_{\text{ут}} = 1$  кОм) in case of touching the cable core of the powered-off winding (W1) of a dual-speed induction motor



**Рис. 7**  
 Диаграммы величин количества электричества  $q$  через сопротивление утечки тока на землю ( $R_{\text{ут}} = 1$  кОм) при касании к отключенной от сети обмотке W1 АД (рис. 2)

**Fig. 7**  
 Diagrams of electric quantities  $q$  through the earth leakage resistance ( $R_{\text{ут}} = 1$  кОм) in case of touching the powered-off winding W1 of an induction motor (Fig. 2)

например, полупроводниковым коммутатором. Однако при эксплуатации неприемлемо ложное срабатывание этого коммутатора в цепи обмотки статора, находящейся под напряжением сети. Опасность возникновения тока междуфазного короткого замыкания в силовом присоединении отключенной обмотки статора двухскоростного асинхронного двигателя исключается при её закорачивании в контексте подавления обратной ЭДС на интервале выбега двигателя. В связи с этим практический интерес представляет установление степени воздействия закорачивания отключенной обмотки статора на параметры обратной ЭДС ранее включенной обмотки на интервале выбега двухскоростного асинхронного двигателя.

Индуктирование ЭДС в отключенной от сети обмотке W2 статора двухскоростного асинхронного двигателя в режиме выбега позволяет рассматривать эту обмотку как структурный компонент, потенциально способный формировать возмущающее воздействие на электромагнитные параметры двигателя, в частности, в случае закорачивания вводов обмотки W2. Представляется актуальным установление степени влияния этого эффекта на параметры амплитуд и продолжительности обратной ЭДС (в режиме выбега) в обмотке W1, ранее (до отключения напряжения сети) определяемой в качестве рабочей (подключенной к электрической сети) обмотки. Для исследования процесса применима описанная выше методика при условии корректировки начальных условий применительно к процессу выбега двухскоростного АД, а именно:

- рабочая обмотка W1 статора, будучи отключенной от сети, из электрогенерирующего объекта переходит в состояние пассивного, в ней индуктируется ЭДС  $e_1$  вращающимся полем токов ротора, снижающаяся экспоненциально по амплитуде и частоте;

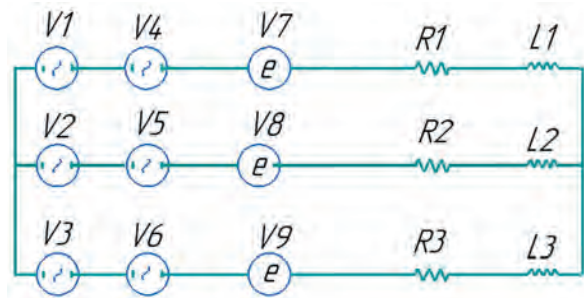
- ротор сохраняет активное (генерирующее) состояние в течение экспоненты, определяемой постоянной времени АД (отношением обобщенной индуктивности обмоток и цепей намагничивания к обобщенному сопротивлению);

- при закорачивании отключенной от сети второй обмотки W2 статора в ней возникает цепь тока на временном интервале генерации ЭДС со стороны ротора, и в этом случае данная обмотка выполняет также генерирующую функцию в отношении ранее включенной рабочей обмотки статора;

- начальным состоянием отключенной от сети обмотки W2 статора двухскоростного АД следует считать генерацию в ней рассчитанной выше ЭДС  $e_2$  (рис. 3).

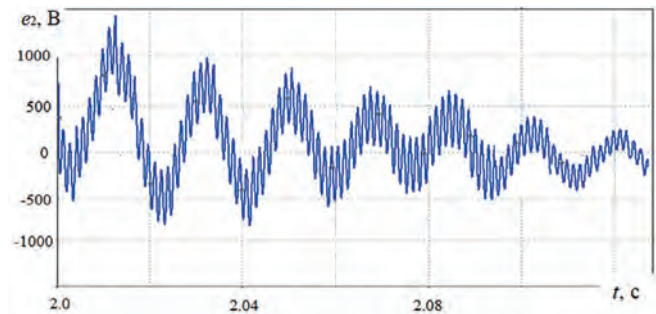
В частности, анализ диаграмм (рис. 3) позволяет сделать вывод, что применительно к обмотке пониженной скорости (W2) двигателя АДВК-355LA12/4 в ЭДС  $e_2$  преобладают частоты 50 Гц и 720 Гц на начальном интервале времени выбега двигателя (после отключения напряжения питания с рабочей обмотки). Рассматривая генерирующую функцию данной обмотки после её закорачивания, можно ввести допущение о наличии в ней трёх источников ЭДС, соединённых последовательно: ЭДС частот 50 Гц (источники V1-V3); 720 Гц (источники V4-V6); и экспоненты (источники V7-V9), определяемой постоянной времени двигателя (рис. 10). ЭДС этой обмотки (до закорачивания), полученная в результате моделирования в соответствии с обобщенной выше методикой, приведена на рис. 10.

С учётом этих допущений структуры схемы (рис. 10) форма фазной ЭДС, генерируемая в отключенной от сети обмотке W1 статора двухскоростного АД в режиме выбега, представлена на рис. 11, а в случае закорачивания этой обмотки в момент времени  $t_1$  – на рис. 11.



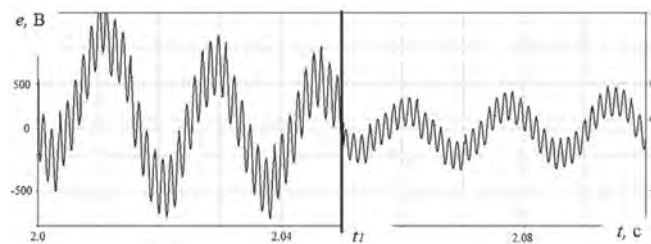
**Рис. 10**  
Расчётная схема отключенного от сети статора двухскоростного АД (представлен элементами R1-R3; L1-L3) в режиме выбега при условии закорачивания его схемы

**Fig. 10**  
Analytical model of powered-off stator of a dual-speed induction motor (represented with R1-R3 and L1-L3 elements) in the run-down mode, provided it is short-circuited



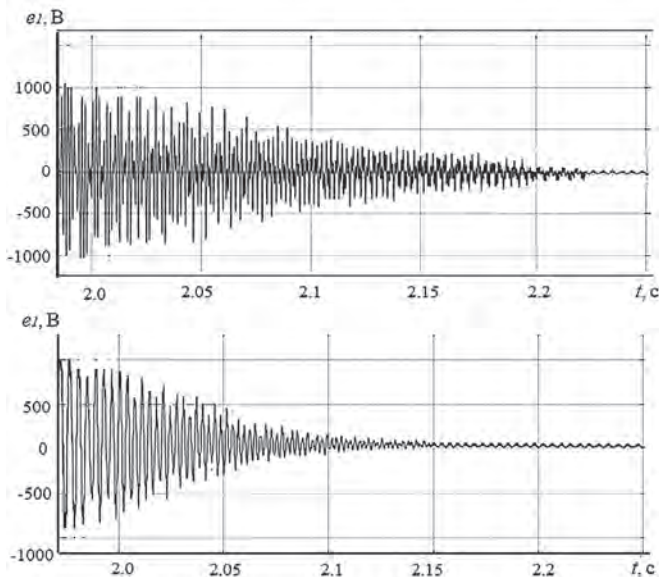
**Рис. 11**  
Фрагмент осциллограммы фазной ЭДС  $e_2$  отключенной обмотки W2 статора двухскоростного АД в режиме выбега, полученный моделированием с учётом допущений и расчётной схемы (рис. 10)

**Fig. 11**  
A fragment of an oscillogram of the  $e_2$  phase EMF of the powered-off stator winding W2 of a dual-speed induction motor in the run-down mode obtained by simulation, taking into account the assumptions and the design diagram (Fig. 10)



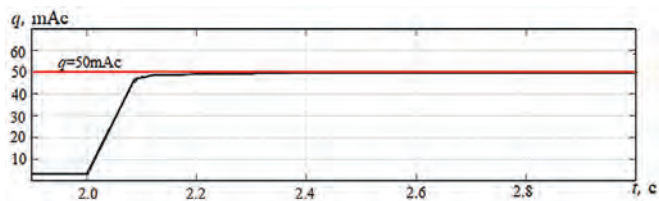
**Рис. 12**  
Фрагмент осциллограммы фазной ЭДС  $e_2$  отключенной обмотки W2 статора двухскоростного АД в режиме выбега, иллюстрирующий процесс закорачивания обмотки статора в момент времени  $t_1$ , полученный моделированием с учётом допущений и расчётной схемы (рис. 10)

**Fig. 12**  
A fragment of an oscillogram of the  $e_2$  phase EMF of the powered-off stator winding W2 of a dual-speed induction motor in the run-down mode, illustrating the stator winding short-circuiting process at the time of  $t_1$ , that was obtained by simulation, taking into account the assumptions and the design diagram (Fig. 10)



**Рис. 13**  
 Диаграммы величин формирования обратных ЭДС в обмотке W1 статора двухскоростного АД: а) без учёта замыкания цепи обмотки W2 статора; б) с учётом замыкания цепи обмотки W2 статора

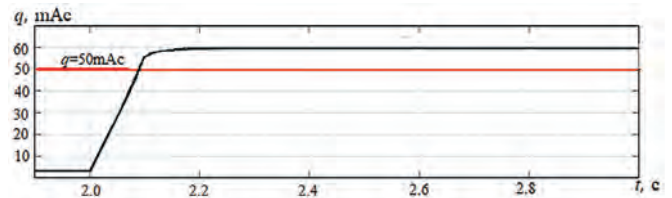
**Fig. 11**  
 Diagrams of magnitudes of back EMF forming in the W1 stator winding of a dual-speed induction motor: а) with no account of closing the stator W2 winding; б) with account of closing the stator W2 winding



**Рис. 14**  
 Диаграмма величины накопления количества электричества q через сопротивление цепи утечки тока на землю ( $R_{yr} = 1 \text{ кОм}$ ) между рабочей обмоткой W2 статора двухскоростного АД и контуром «земля» при наличии ограничивающего эффекта со стороны закорачиваемой отключенной обмотки W1 статора этого же двигателя в режиме выбега

**Fig. 14**  
 Diagram of accumulated electric quantities q through the earth leakage resistance ( $R_{yr} = 1 \text{ кОм}$ ) between the operating stator winding W2 of a dual-speed induction motor and the ground loop with a limiting effect from the short-circuited powered-off stator winding W1 of the same motor in the run-down mode

Учитывая генерирующую функцию отключенной обмотки W2 двухскоростного АД в режиме выбега, начиная с момента её закорачивания, рассчитанную величину тока в этой обмотке и генерирующую функцию ротора, на основании методики [3; 5] может быть получена кривая фазной ЭДС, индуцируемой в рабочей обмотке W1 статора двухскоростного асинхронного двигателя (рис. 13). Сопоставляя формы ЭДС при отсутствии (рис. 13, а) и наличии (рис. 13, б) возмущающего действия со стороны обмотки W2, можно сделать вывод о наличии эффекта ограничения продолжительности формирования ЭДС в обмотке W1.



**Рис. 15**  
 Диаграмма величины накопления количества электричества q через сопротивление цепи утечки тока на землю ( $R_{yr} = 1 \text{ кОм}$ ) между рабочей обмоткой W1 статора двухскоростного АД и контуром «земля» при наличии ограничивающего эффекта со стороны закорачиваемой отключенной обмотки W2 статора этого же двигателя в режиме выбега

**Fig. 15**  
 Diagram of accumulated electric quantities q through the earth leakage resistance ( $R_{yr} = 1 \text{ кОм}$ ) between the operating stator winding W1 of a dual-speed induction motor and the ground loop with a limiting effect from the short-circuited powered-off stator winding W2 of the same motor in the run-down mode

Применительно к проблематике электробезопасности это создаёт эффект ограничения количества электричества q в цепи утечки тока на землю (при касании человеком токоведущих элементов соответствующей обмотки статора асинхронного двигателя) на временном интервале выбега двухскоростного АД (рис. 14, 15). Однако процесс характеризуется низкой интенсивностью снижения до нуля величины обратной ЭДС в ранее включенной обмотке, что не позволяет делать вывод о рассматриваемом способе как гарантирующем снижение электрических параметров обратного энергетического потока АД в режиме выбега до безопасного уровня.

**Заключение**

Исследованием процессов формирования ЭДС в структурных компонентах асинхронных двигателей установлены параметры обратных энергетических потоков в рабочей и отключенной обмотках статора двухскоростного двигателя в режиме выбега, которые могут быть отнесены к факторам электропоражения человека при касании фазы (кабельного ввода двигателя).

Установлена возможность снижения амплитуды и продолжительности обратной ЭДС обмотки статора двухскоростного асинхронного двигателя в режиме выбега посредством закорачивания смежной (ранее не включаемой) обмотки статора. Анализ параметров обратной ЭДС асинхронного двигателя позволяет сделать вывод о недостаточности данной меры для устранения электропоражающего фактора обратных энергетических потоков двигателя.

Необходимым условием безопасной эксплуатации двухскоростного асинхронного двигателя является контроль величины сопротивления утечки тока на землю (с возможностью защитного отключения электрической сети) в цепи подключенной к сети и не подключенной к сети обмоток статора двигателя. При этом подавление обратных энергетических потоков, воздействующих на электрическую сеть со стороны статорных обмоток двигателя в режиме защитного отключения сети, может быть осуществлено закорачиванием их вводов короткозамыкателями.

**Список литературы**

1. Колосюк В.П. *Защитное отключение рудничных электроустановок*. М.: Недра; 1980. 334 с.
2. Дзюбан В.С. *Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения*. М.: Энергоатомиздат; 1993. 240 с.
3. Савицкий В.Н., Стадник Н.И. *Защита от токов утечки в комбинированных распределительных сетях угольных шахт*. 13 с. Режим доступа: [https://revolution.allbest.ru/physics/01111483\\_0.html](https://revolution.allbest.ru/physics/01111483_0.html)
4. Маренич К.Н. *Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов*. М.; Вологда: Инфра-Инженерия; 2021. 240 с.
5. Каики В.В. (ред.) *Взрывозащищенные асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация и ремонт*. Донецк: Юго-Восток; 2010. 360 с.
6. Сивокобыленко В.Ф., Ляшок Я.О. Оцінка електробезпеки експлуатації двошвидкісних двигунів у складі дільничних електромереж шахт. *Наукові праці ДонНТУ, серія електротехніка і енергетика*. 2015;(1):5–12.

**References**

1. Kolosyuk V.P. *Shutoff Protection of Mine Electrical Installations*. Moscow: Nedra; 1980. 334 p. (In Russ.)
2. Dzyuban V.S. *Explosion-Proof Low Voltage Equipment*. Moscow: Energoatomizdat; 1993. 240 p. (In Russ.)
3. Savitsky V.N., Stadnik N.I. *Leakage Current Protection in Coal Mine Combined Distribution Mains*. 13 p. (In Russ.) Available at: [https://revolution.allbest.ru/physics/01111483\\_0.html](https://revolution.allbest.ru/physics/01111483_0.html)
4. Marenich K.N. *Theoretical Bases and Application Principles of Safety De-Energizing of Mine Electrical Installations*. Moscow; Vologda: Инфра-Инженерия; 2021. 240 p. (In Russ.)
5. Kaiki V.V. (ed.) *Explosion-Proof Induction Motors: Selection, Operation and Repairs*. Donetsk: Yugo-Vostok; 2010. 360 p. (In Russ.)
6. Sivokobylenko V.F., Liashok I.O. Evaluation of operational safety of two-speed electric motors in mine section power network. *Naukovi pratsi DonNTU, seriya elektrotekhnika i energetika*. 2015;(1):5–12. (In Ukrainian)

**Информация об авторах**

**Денисова Елена Васильевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и инженерной графики, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: deni\_sovaev@mail.ru

**Маренич Константин Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горной электротехники и автоматики им. Р.М. Лейбова, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР; e-mail: knm1@donntu.org

**Дубинка Екатерина Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электротехники и автоматики им. Р.М. Лейбова, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР; e-mail: ekaterina\_sd@bk.ru

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 05.07.2021  
Поступила после рецензирования: 23.07.2021  
Принята к публикации: 26.07.2021

**Information about the authors**

**Elena V. Denisova** – Candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering), Associate Professor, Department of Descriptive Geometry and Engineering Graphics, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: deni\_sovaev@mail.ru

**Konstantin N. Marenich** – Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Mining Electrical Engineering and Automation named after R.M. Leybov, Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic; e-mail: knm1@donntu.org

**Ekaterina S. Dubinka** – Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic; e-mail: ekaterina\_sd@bk.ru

**Article info**

Received: 05.07.2021  
Revised: 23.07.2021  
Accepted: 26.07.2021