

## ДВУХСКОРОСТНОЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ КАК ОБЪЕКТ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ ЗАЩИТНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТОКА

*Опасные состояния шахтной участковой электрической сети высокой мощности поддерживаются обратными энергетическими потоками асинхронных двигателей потребителей в режиме выбега после отключения напряжения питания. Концепция подавления обратных энергетических потоков асинхронных машин методом воздействия на их электромагнитные параметры проверена на примере управления электрическими параметрами отключенной обмотки статора двухскоростного асинхронного двигателя при его переходе в режим выбега. Средствами моделирования установлен эффект управления величиной обратной электродвижущей силы асинхронного двигателя.*

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

### Постановка проблемы

Асинхронный двигатель (АД) благодаря своей надежности, компактности, простоте эксплуатации, неприхотливости и относительной дешевизне получил широкое распространение, как в электромеханических установках общего назначения, так и в составе оборудования шахтных участковых электротехнических комплексов [1,2]. Характерной особенностью этой электрической машины является формирование обратного энергетического потока в режиме выбега, когда начальная обратная электродвижущая сила (ЭДС) сопоставима по величине и частоте с аналогичными параметрами напряжения сети. Пропорциональность снижения амплитудно-частотных параметров обратной ЭДС АД величине обобщенного параметра индуктивности данной электрической машины дают основания рассматривать увеличение мощности применяемых АД в качестве фактора, повышающего опасность эксплуатации электрооборудования технологического участка, поскольку электрические машины высокой мощности, обладая повышенной общей индуктивностью, способны генерировать обратные ЭДС в сеть в течение значительного времени после отключения напряжения в ней. В связи с этим поиск технических решений в области быстродействующего подавления обратных энергетических потоков АД в режиме выбега представляет научную и практическую актуальность.

### Анализ последних исследований и публикаций

Исследования в области предотвращения

воздействия обратных энергетических потоков АД на электрическую сеть участковых электротехнических комплексов шахт после защитного отключения напряжения питания можно разделить на группы:

- обоснование параметров и структуры технических решений в области выявления опасных состояний силовых присоединений АД автономно действующими техническими средствами, функционирующими в присоединениях статоров электрических машин;

- обоснование принципов и разработка устройств ускоренного подавления обратных энергетических потоков АД в процессе защитного отключения сети технологического участка.

Задачи первой группы решены исследованиями [3,4], что позволило сформировать независимо от штатных средств защиты управляющую команду для исполнительно устройства подавления обратных энергетических потоков АД. В принципе это создало возможность получения эффекта автоматического защитного обесточивания шахтной участковой электросети.

Сложность решения задач второй группы состоит в необходимости реализации функции подавления обратного энергетического потока АД компактным силовым электрическим устройством, адаптированным к применению в условиях эксплуатации рудничного электрооборудования.

Исследованиями [5] установлена принципиальная возможность интенсивного ограничения параметров обратной ЭДС АД в режиме выбега путем создания контура короткого замыкания в специально созданной дополнительной не под-

ключенной к сети обмотке статора. Недостаток такого решения связан с необходимостью принципиального изменения конструкции АД и оснащения этой электрической машины дополнительной трехфазной обмоткой статора. В то же время, существует целый класс асинхронных машин, содержащих две статорные обмотки. Это двухскоростные рудничные асинхронные двигатели, предназначенные для электроприводов шахтных конвейеров [6].

Поэтому исследование возможности подавления обратного энергетического потока двухскоростного АД в режиме выбега методом воздействия на электрические параметры не подключенной к сети второй обмотки статора с учетом различия числа пар полюсов статорных обмоток, других особенностей конструкции двухскоростного АД представляет научную и практическую актуальность.

**Цель (задачи) исследования**

Целью исследования является установление возможности интенсивного снижения электрических параметров обратной ЭДС двухскоростного АД в режиме выбега путем управления электрическими параметрами второй, не подключенной к сети, обмотки его статора. Достижение этой цели предполагает разработку соответствующего математического аппарата и компьютерной модели.

**Основной материал исследования**

Специфика конструкции двухскоростного АД, существенно отличающая процессы подавления его обратного энергетического потока от объекта, рассмотренного в [5], заключается в

различии числа полюсов двух обмоток статора, размещенных на общем магнитопроводе. Так, согласно [4,6], обмотка статора номинальной скорости содержит 4 полюса, а статора пониженной скорости – 12 полюсов (рис. 1). Это будет определять формирование в не подключенной к сети обмотке статора трансформаторной ЭДС, отличной по частоте от частоты сети, а по форме – от синусоиды.

Достижение цели исследования представляется выполнить поэтапно. В частности, на первом этапе должны быть определены закономерности формирования трансформаторной ЭДС в отключенной обмотке статора работающего двухскоростного АД. Общий подход к решению задачи этого этапа может быть построен на основе исследований [7] 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; расчет ЭДС пазовых проводников отключенной обмотки; определение ЭДС, которая наводится в каждой фазе отключенной обмотки, путем суммирования ЭДС пазовых проводников с учетом схемы соединения обмотки.

Процедурой определения взаимной индуктивности ротора и обмоток статора АД предусматривается выполнение расчета индукции магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором (путем суммирования индукций статора и ротора).

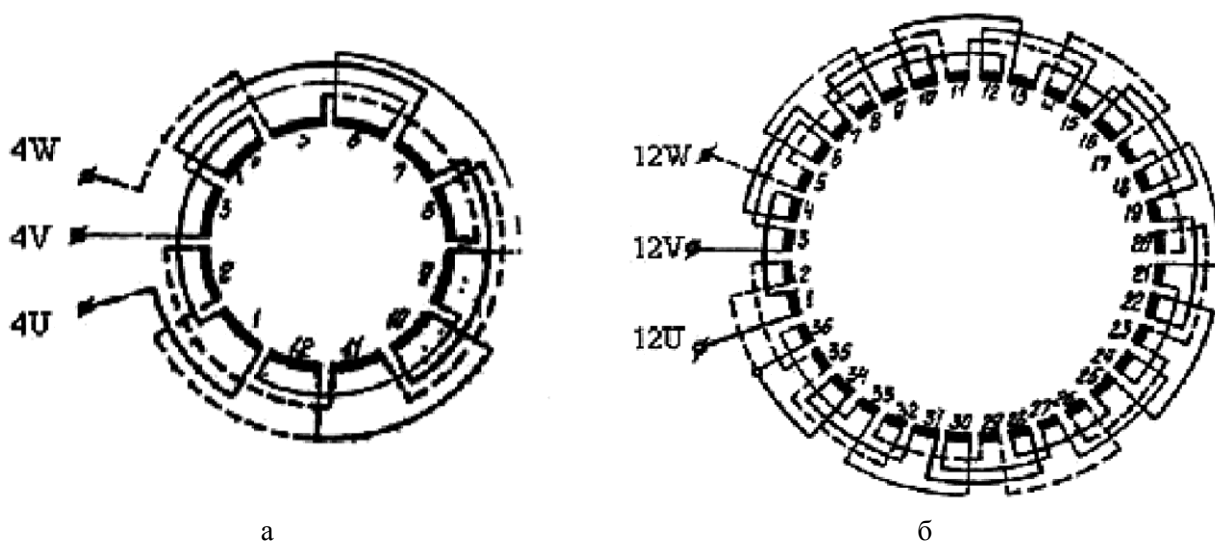


Рис. 1. Схемы обмоток статора двигателя серии ЭДКВФ:  
 а – обмотка номинальной скорости, число полюсов  $2p=4$ ;  
 б – обмотка пониженной скорости, число полюсов  $2p=12$

Согласно [7,8], индукция результирующего поля в области каждого паза представляется в виде наложения индукции непарного поля от тока паза (с учетом предположения об отсутствии поля внешнего по отношению к пазу) и индукции парного поля (внешнего по отношению к пазу) пазов магнитопровода (с учетом предположения об отсутствии тока в данном пазу). При вычислении индукции парного и непарного полей в области каждого паза учитываются магнитодвижущие силы соответствующих катушек обмоток. Расчет потокоцепления фазной обмотки в этом случае выполняется на основании предварительного расчета суммы потокоцеплений обмоток, принадлежащих одной и той же фазе, с учетом сформированных пар полюсов. Делением потокоцепления фазы на ее ток (при отсутствии тока в других фазах статора и ротора) определяются величины собственных и взаимных индуктивностей ротора и обмоток статора.

Рассмотрим процесс формирования ЭДС в отключенной обмотке статора работающего АД

в составе типового шахтного участкового электротехнического комплекса (рис. 2) применительно к электрической машине типа АДВК-355LA12/4 (табл. 1).

Для определения взаимной индуктивности  $M(\theta) = \psi_{ra}/i_{sa}$ , показывающей зависимость потокоцепления  $\psi_{ra}$  фазы ротора от тока  $i_{sa}$  фазы статора в функции угла  $\theta$  поворота ротора, рассматривается случай подключения обмотки фазы статора к источнику тока, изменяющегося синусоидально с амплитудой 1А и частотой 50 Гц. Предполагается, что за период 0,02 с изменения тока ротор поворачивается на  $2\pi$  рад. Путем интегрирования индукции в воздушном зазоре в пределах размещения каждой катушки статора, с учетом длины магнитопровода, вычисляется значение потокоцепления каждой катушки статора для каждого момента времени. Потокоцепление фазных обмоток статора определяется расчетом суммы потокоцеплений соответствующих катушек. Аналогично вычисляются потокоцепления фаз ротора.

Табл. 1. Параметры двигателя АДВК-355LA12/4

Номинальная мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об/мин	КПД, %	cosφ	Скольжение, %	$M_{max}/M_n$	$M_n/M_n$	$I_n, A$	$I_n/I_n$
85/250	500/1500	84/92	0,57/0,87	2,4/1,5	-/2,1	2,6/1,8	90/158	2,5/5,3

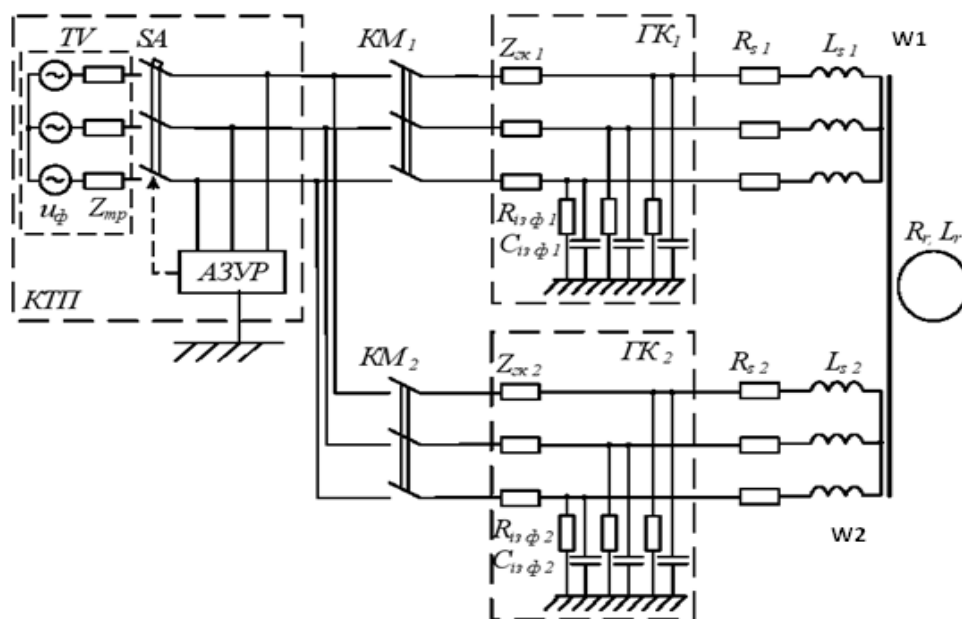


Рис. 2. Схема шахтного участкового электротехнического комплекса с двухскоростным асинхронным двигателем:

- $TV$  – трехфазный источник питания, трансформаторная подстанция с автоматическим выключателем  $SA$ ;  $AЗУР$  – аппарат защиты от утечки тока на землю;
- $KM_1, KM_2$  – коммутационные аппараты;  $ГК_1, ГК_2$  – гибкие кабели;
- $R_{s1}, R_{s2}, L_{s1}, L_{s2}$  – активные сопротивления и индуктивности статоров;
- $Z_{mp1}, Z_{zk1}, Z_{zk2}$  – соответственно, полные сопротивления трансформатора и гибких кабелей  $ГК_1$  и  $ГК_2$ ;  $R_{uz \phi 1}, R_{uz \phi 2}, L_{uz \phi 1}, L_{uz \phi 2}$  – сопротивления и емкости изоляции кабельной сети;  $W1, W2$  – обмотки статора АД

Величина  $M(\theta)=\psi_{ra}/i_{sa}$  является четной функцией, для которой постоянная составляющая тригонометрического ряда Фурье равна нулю,  $a_0=0$ , и амплитуды синусоидальных составляющих являются нулевыми,  $b_k=0$ , то есть при анализе можно ограничиться определением только амплитуд  $a_k$  косинусоидальных составляющих. Зависимость  $M(\theta)$  для параметров рассматриваемого двигателя представлена выражением:

$$M(\theta)=8,57 \cdot 10^{-2} \cdot \cos(2\theta)+4/12 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(6\theta)+2,66 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(34\theta)-2,95 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(38\theta). \quad (1)$$

Отклонение полученных согласно уравнению (1) значений взаимной индуктивности  $M(\theta)$ , при учете только 2, 6, 34, 38 гармоник, от значений, рассчитанных по кривой индукции, не превышает 3 %, что допустимо для инженерных расчетов. Это позволяет упростить дальнейшие расчеты учетом только указанных гармоник для анализа кривой взаимной индуктивности статора и ротора.

Матричное дифференциальное уравнение, описывающее переходные процессы в асинхронном короткозамкнутом двигателе относительно составляющих потокосцеплений с учетом угла поворота ротора  $\theta$ , представляется следующим выражением [7,8,9]:

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

где  $\bar{\Psi}_{AD} = [\psi_{s\alpha} \ \psi_{s\beta} \ \psi_{r\alpha} \ \psi_{r\beta} \ \omega \ \theta]^T$  – вектор переменных состояний;  $\bar{G}_{AD}, \bar{H}_{AD}$  – матричные константы;  $\bar{S}_{AD} = [-\omega\psi_{r\beta} \ \omega\psi_{r\alpha} \ (M_e - M_c)/J]^T$  – вектор нелинейных соотношений между переменными состояниями;  $\bar{U}_{AD} = [u_{AB} \ u_{BC} \ u_{CA}]^T$  – вектор линейных напряжений статора;  $\bar{F}_{AD} = \bar{R} \cdot \bar{M}^{-1}(\theta)$ , причем  $\bar{R}$  матрица, учитывающая сопротивления контуров статора и ротора;  $\bar{M}^{-1}(\theta)$  – матрица, обратная к матрице индуктивностей  $\bar{M}(\theta)$  двигателя:

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

$$\bar{M}^{-1}(\theta) =$$

$$= \begin{bmatrix} L_1/M_{10} & 0 & M_3/M_{10} & -M_4/M_{10} & 0 & 0 \\ 0 & L_1/M_{10} & M_4/M_{10} & -M_3/M_{10} & 0 & 0 \\ -M_3/M_{10} & -M_4/M_{10} & L_1/M_{10} & 0 & 0 & 0 \\ M_4/M_{10} & -M_3/M_{10} & 0 & L_1/M_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

причем

$$M_{10} = L_1^2 - M_3^2 - M_4^2,$$

$$M_3 = M(\theta) - \frac{M(\theta - \rho)}{2} - \frac{M(\theta + \rho)}{2},$$

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

$$L_1 = L_\sigma + \frac{3}{2}L,$$

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

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

$$\bar{F}_{AD} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_3 & b_4 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & -b_4 & b_3 & 0 & 0 \\ b_5 & -b_6 & b_2 & 0 & 0 & 0 \\ b_6 & b_5 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$b_i = \begin{cases} -R_x \frac{L_1}{M_{10}}, i = 1, 2; \\ R_x \frac{M_j}{M_{10}}, i = 3 \div 6, \end{cases} \quad (4)$$

где  $R_x$  (соответствующее сопротивление статора и ротора) и  $M_j$  (соответствующее значение момента двигателя) определяются из табл. 2.

Табл. 2. Значения величин  $R_x$  и  $M_j$  для выражения (4)

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

Мгновенные значения токов фаз подключенной обмотки статора и ротора рассчитываются с использованием соотношения:

$$\bar{I}_{\alpha\beta} = \bar{M}^{-1}(\theta) \cdot \bar{\Psi}_{AD}, \quad (5)$$

где  $\bar{I}_{\alpha\beta} = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ i_{r\alpha} \ i_{r\beta} \ \omega \ \theta]^T$  – 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 второй однослойно концентрической обмотки (W2) при  $2p=6$ ,  $m=3$ ,  $z=36$ ,  $q=2$ ,  $a=1$ ,  $W_{c2}=40$ , которая отключена от источника питания. С учетом схемы отключенной обмотки статора W2 рассчитывается ЭДС проводников каждого паза:

$$e_{наз.}(t) = W \cdot B(t) \cdot L \cdot R \cdot \omega,$$

где  $W$  – 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 учетом схемы соединения обмотки), в результате чего может

быть получена ЭДС  $e_2$ , индуцируемая в каждой фазе отключенной обмотки W2. Для двигателя АДВК-355LA12/4 ( $U=660$  В), статор которого оборудован дополнительной обмоткой, график мгновенных значений такой ЭДС приведен на рис. 3.

Полученный результат позволяет сделать предположение о потенциально опасной (по фактору электропоражения человека) величине ЭДС в отключенной от сети обмотке W2 статора работающего двухскоростного АД. Действительно, применительно к схеме (см. рис. 2), ток в цепи утечки,  $R_{ym}=1$  кОм, между фазой и контуром «земля» (рис. 4), формируемый данной ЭДС, создает 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 W2 статора АД (рис. 5). Это обуславливает необходимость учитывать электропоражающий фактор ЭДС этой обмотки.

В то же время, ЭДС, индуцируемая в отключенной от сети обмотке W2 статора двухскоростного АД, может быть рассмотрена как фактор формирования возмущающего воздействия относительно ЭДС, индуцируемой в рабочей обмотке W1 статора АД в режиме выбега. Для исследования процесса применима описанная выше методика при условии корректировки начальных условий применительно к процессу выбега двухскоростного АД, а именно:

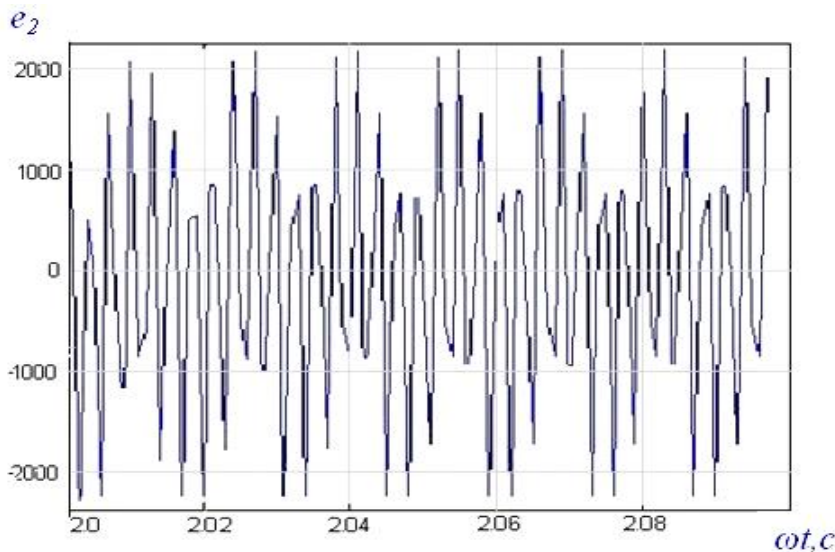


Рис. 3. Диаграммы величин ЭДС в отключенной обмотке W2 фазы статора двухскоростного асинхронного двигателя АДВК-355LA12/4

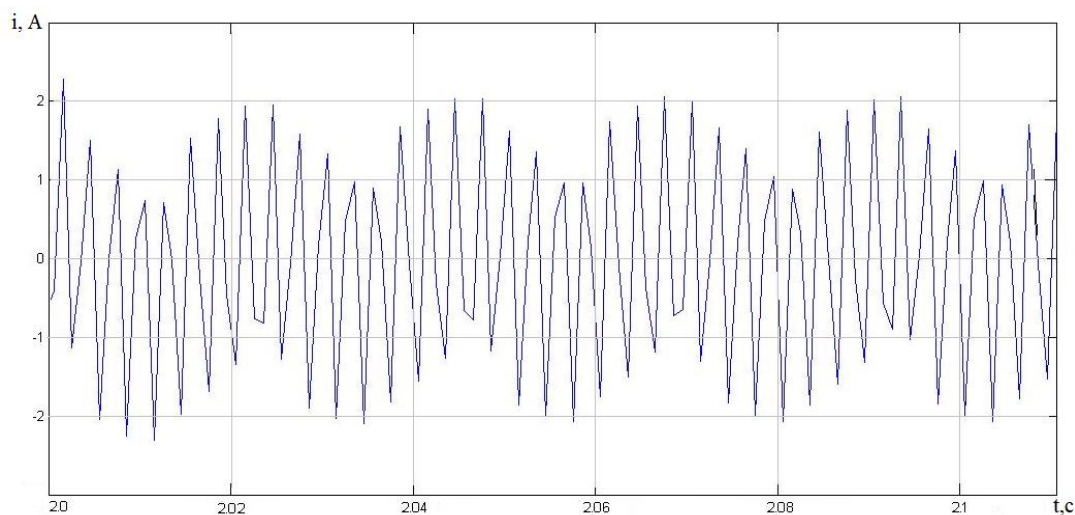


Рис. 4. Мгновенные значения тока утечки на землю через тело человека в случае касания жилы кабеля отключенной обмотки W2 двухскоростного АД

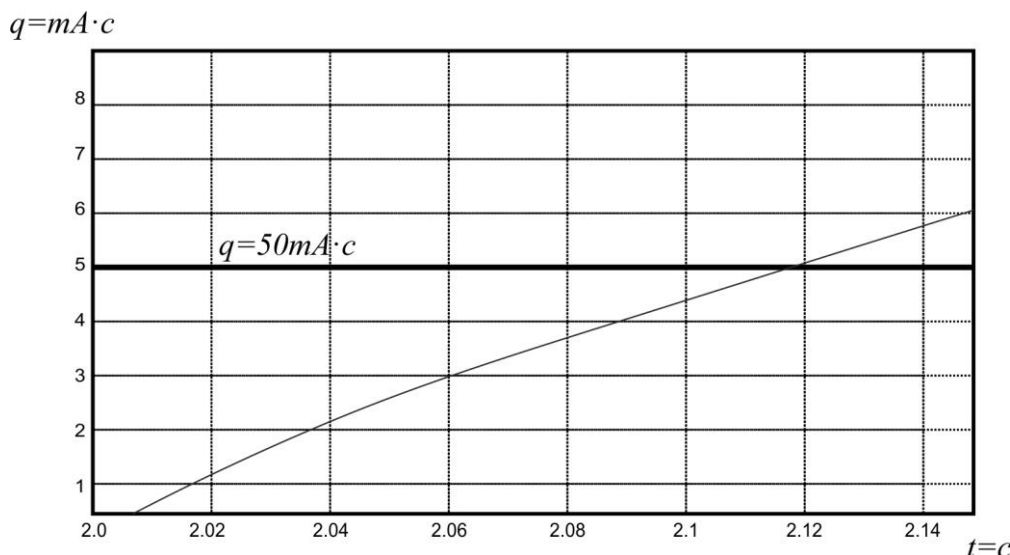


Рис. 5. Диаграммы величин количества электричества  $q$  через сопротивление утечки тока на землю,  $R_{ym}=1$  кОм, при касании к отключенной от сети обмотке W2 АД, по рис. 2

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

– 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 се-

ти обмотки W2 статора двухскоростного АД следует считать генерацию в ней рассчитанной выше ЭДС  $e_2$  (см. рис. 3).

Применительно к обмотке пониженной скорости (W2) двигателя АДВК-355LA12/4 на основании анализа диаграмм (см. рис. 3, 4) делаем вывод о преваливании в ЭДС  $e_2$  частот 50 Гц и 720 Гц. Полагаем, что эта ЭДС и является начальной в рассматриваемой обмотке W2 статора АД для интервала выбега двигателя (после отключения напряжения питания с рабочей обмотки).

В этом случае, рассматривая генерирующую функцию данной обмотки после ее закорачивания, может быть введено допущение о наличии в ней трех источников ЭДС, соединенных последовательно: ЭДС частот 50 Гц (источники V1...V3); 720 Гц (источники V4...V6); и экспоненты (источники V7...V9), определяемой постоянной вре-

мени двигателя (рис. 6). Форма фазной ЭДС этой обмотки (до закорачивания), полученная в результате моделирования в соответствии с принятой выше методикой, приведена на рис. 7.

С учетом этих допущений структуры схемы

(рис. 6) форма ЭДС, генерируемая в разомкнутой ранее отключенной от сети обмотке  $W2$  статора двухскоростного АД в режиме выбега, представлена на рис. 8, а в случае закорачивания этой обмотки в момент времени  $t_1$  – на рис. 9.

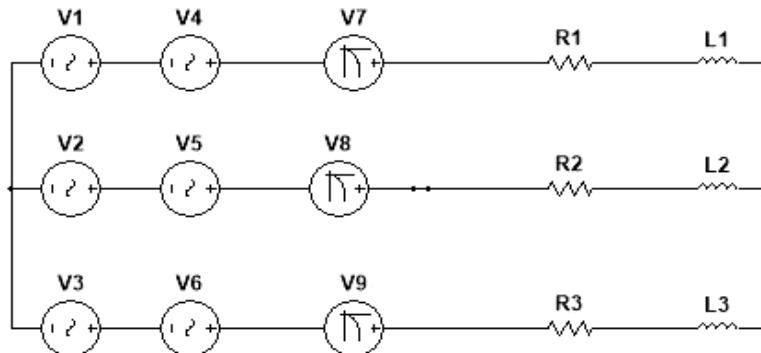


Рис. 6. Расчетная схема отключенного от сети статора двухскоростного АД, представленного элементами  $R1 \dots R3$ ;  $L1 \dots L3$  в режиме выбега при условии закорачивания его схемы

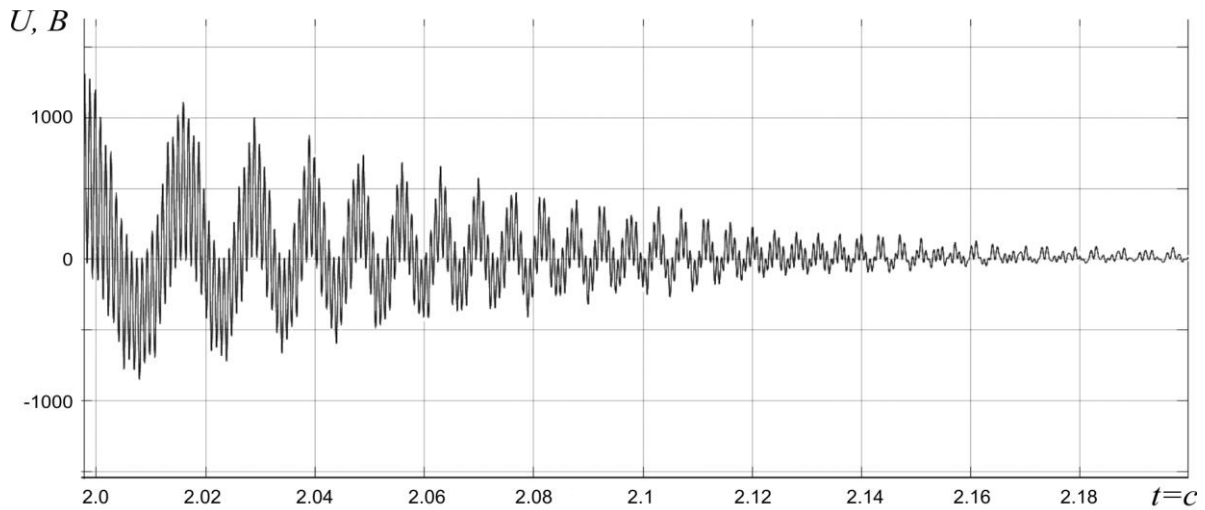


Рис. 7. Форма фазной ЭДС в отключенной обмотке  $W2$  статора двухскоростного АД в режиме выбега, полученная в результате моделирования

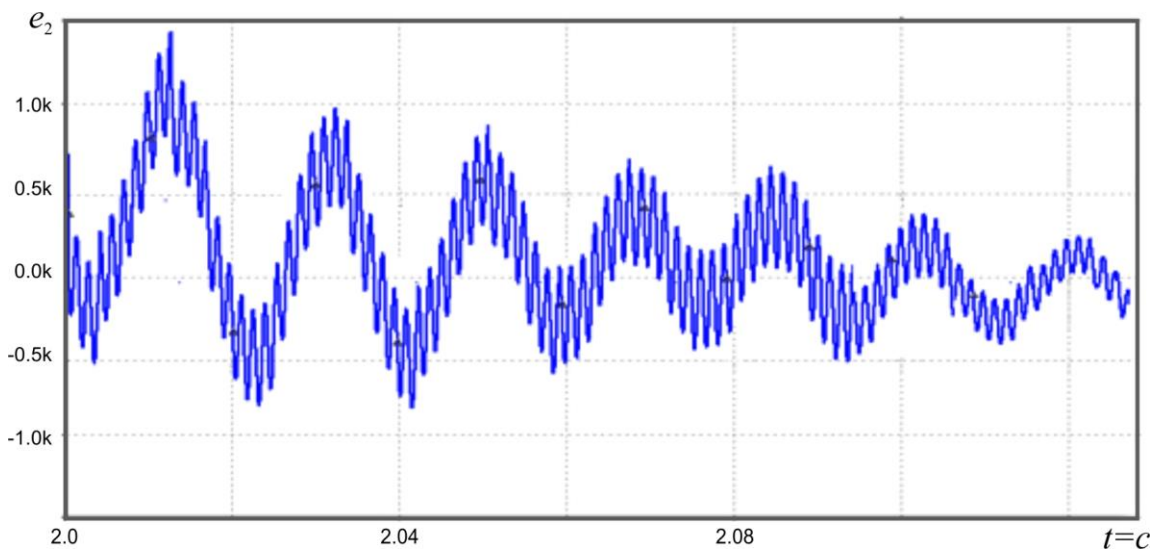


Рис. 8. Фрагмент осциллограммы фазной ЭДС  $e_2$  отключенной обмотки  $W2$  статора двухскоростного АД в режиме выбега, полученный моделированием с учетом допущений и расчетной схемы рис. 6

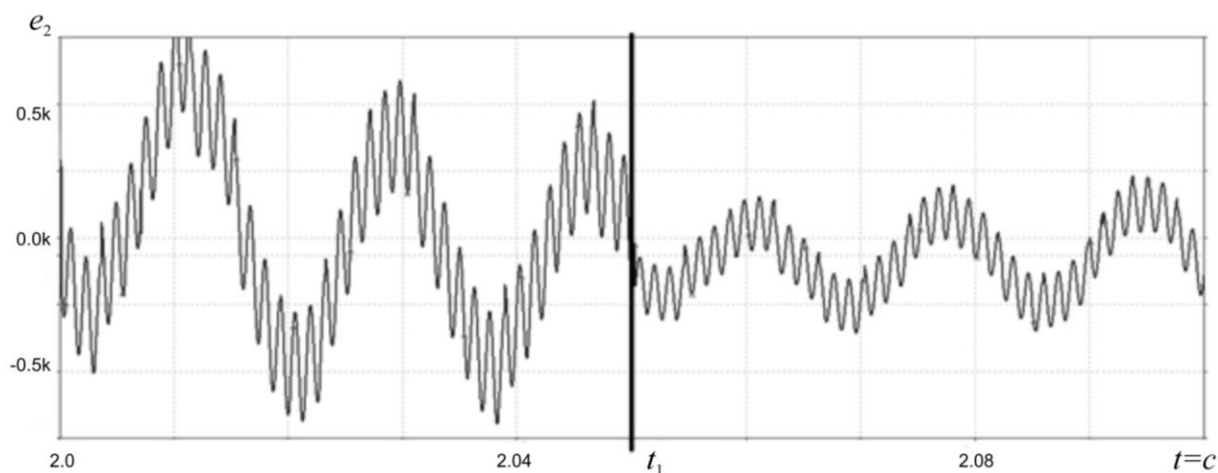


Рис. 9. Фрагмент осциллограммы фазной ЭДС  $e_2$  отключенной обмотки  $W_2$  статора двухскоростного АД в режиме выбега, иллюстрирующий процесс закорачивания обмотки статора в момент времени  $t_1$ , полученный моделированием с учетом допущений и расчетной схемы рис. 6

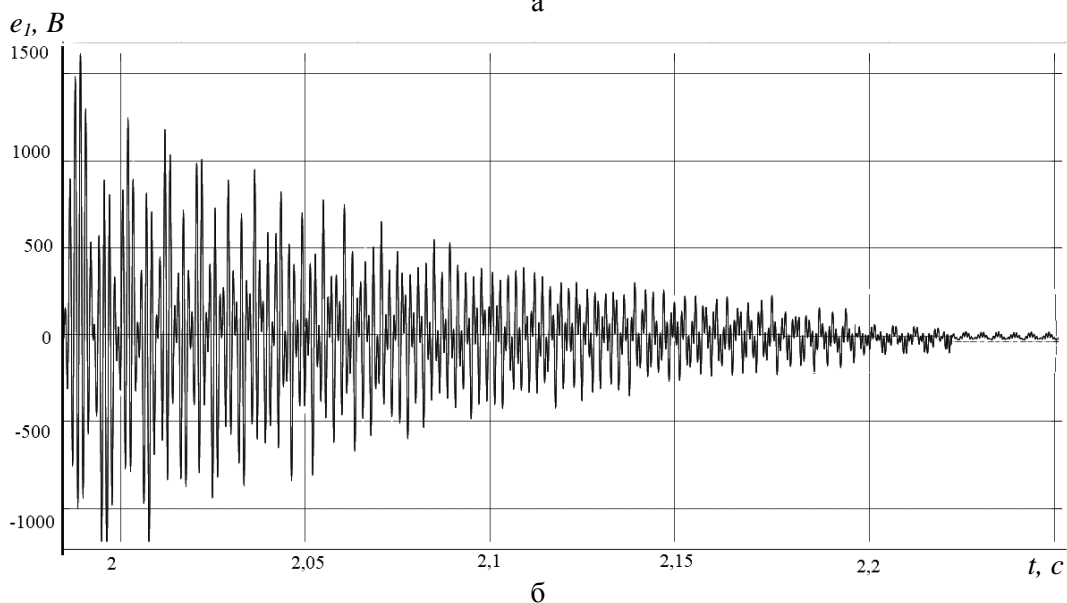
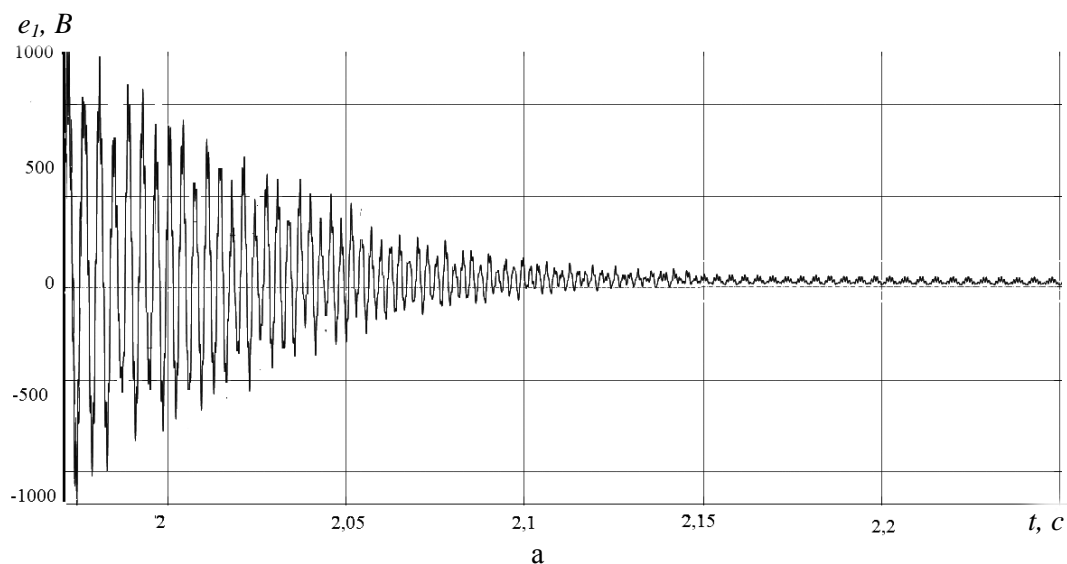


Рис. 10. Диаграммы величин формирования обратных ЭДС в обмотке  $W_1$  статора двухскоростного АД:  
 а – с учетом замыкания цепи обмотки  $W_2$  статора;  
 б – без учета замыкания цепи обмотки  $W_2$  статора



Учитывая генерирующую функцию отключенной обмотки  $W_2$  двухскоростного АД в режиме выбега, начиная с момента ее 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  $W_1$  статора двухскоростного АД (см. рис. 10). Сопоставляя формы ЭДС при наличии (см. рис. 10а) и отсутствии (см. рис. 10б) возмущающего действия со стороны обмотки  $W_2$ , можно сделать вывод о наличии эффекта ограничения продолжительности формирования ЭДС в обмотке  $W_1$ .

Применительно к проблематике электробезопасности это создает эффект ограничения количества электричества  $q$  в цепи утечки тока на землю (при касании человеком токоведущих элементов обмотки  $W_1$ ) на временном интервале выбега двухскоростного АД, в т.ч. на безопасном уровне ( $q \leq 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$ , рис. 11). Однако процессу свойственна инерционность (отсутствие мгновенного снижения до нуля величины ЭДС в обмотке  $W_1$ ), что не позволяет делать вывод о рассматриваемом способе как гарантирующем снижение электрических параметров обратного энергетического потока АД в режиме выбега до безопасного уровня.

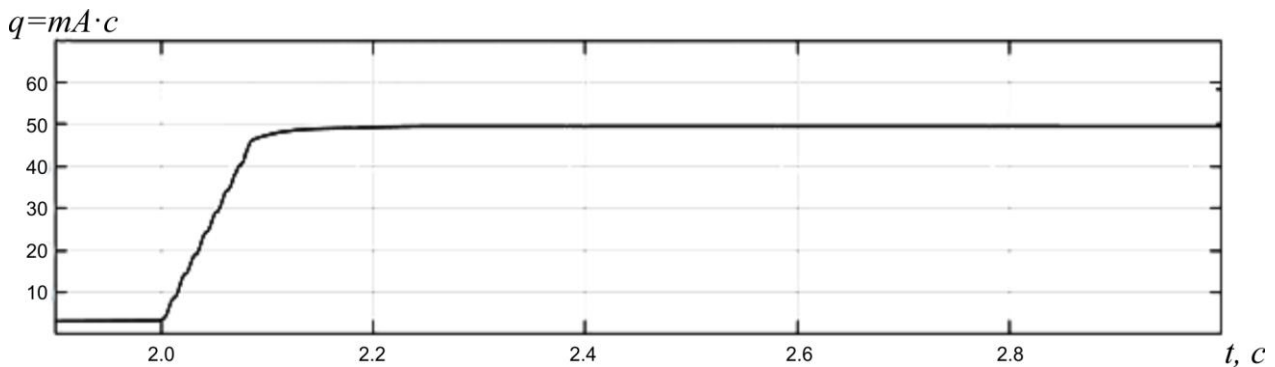


Рис. 11. Диаграмма величины накопления количества электричества  $q$  через сопротивление цепи утечки тока на землю,  $R_{ym}=1 \text{ кОм}$ , между рабочей обмоткой  $W_1$  статора двухскоростного АД и контуром «земля» при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки  $W_2$  статора того же двигателя в режиме выбега

### Выводы

Методика исследования процессов в асинхронных машинах с учетом взаимной индуктивности обмоток статора и ротора адаптирована применительно определению электрических параметров отдельных функциональных элементов двухскоростного асинхронного двигателя в рабочем режиме эксплуатации и в режиме выбега. Представлены примеры расчета параметров электробезопасности в присоединениях обмоток статора. Установлена потенциальная возможность ограничения параметров обратного энергетического потока со стороны рабочей обмотки статора двухскоростного АД в режиме выбега посредством замыкания отключенной статорной обмотки этого же двигателя и снижения количества электричества в цепи утечки в присоединении данной обмотки и контура «земля», в т.ч. до безопасной величины. В то же время, выявлены показатели инерционности подавления обратной ЭДС обмотки статора двухскоростного АД, что не позволяет гарантированно обеспечить безопасные эксплуатационные параметры в силовых присоединениях двухскоростного АД после его отключения от сети.

### Список литературы

1. High voltage mining equipment for use underground: handbook. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.
2. Berryann, R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States [Electronic resource] / R.J. Berryann, J.A. Voelker // Mine Safety and Health Administration, Division of Electric Safety. – Triadelphia, West Virginia, 2005. – Available at: [https://pdfs.semanticscholar.org/6827/53887a0b319296f716beb11b9f01273115a1.pdf?\\_ga=2.1670840.803898779.1508794395-959523617.1508794395](https://pdfs.semanticscholar.org/6827/53887a0b319296f716beb11b9f01273115a1.pdf?_ga=2.1670840.803898779.1508794395-959523617.1508794395)
3. Маренич, К.М. Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмлення шахтної дільничної електромережі: монографія / К.М. Маренич, І. В. Ковальова. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – 125 с.
4. Маренич, К.Н. Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов: монография. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 234 с.
5. Дубинка, Е.С. Управление электромагнитным состоянием асинхронной машины как

- способ ограничения параметров обратного энергетического потока / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – №4. Т.17. – С. 39-47.
6. Взрывозащищенные асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация и ремонт / В.В. Каика и др.; под общ. ред. В.В. Каики. – Донецк: Юго-Восток, 2010. – 360 с.
7. Сивокобиленко, В.Ф. Оцінка електробезпеки експлуатації двошвидкісних двигунів у складі дільничних електромереж шахт / В.Ф. Сивокобиленко, Я.О. Ляшок // Наукові праці ДонНТУ, серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонНТУ, 2015. – №1(17). – С. 5-12.
8. Lipo, T.A. Dual Stator Winding Induction Machine Drive / T.A. Lipo, A.R. Muñoz // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2000. – No.5. Vol.36. – P. 1369-1379.
9. Pienkowski, K. Analysis and Control of Dual Stator Winding Induction Motor. – 2012. – Arch. Electr. Eng. – No.61. – P. 421-438.

**K.N. Marenich /Dr. Sci. (Eng.)/, E.S. Dubinka**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**THE DUAL STATOR-WINDING ASYNCHRONOUS MACHINE AS AN OBJECT OF REALIZATION THE FUNCTION OF PROTECTIVE SUPPRESSION OF REVERSE ENERGY FLOW**

**Background.** *The paper describes the methodology for studying processes in asynchronous machines concerning the mutual inductance of the stator and rotor windings, which is adapted to determine the electrical parameters of individual functional elements of a two-speed asynchronous motor in the operating mode and the coast down mode. Examples of calculating the safety parameters of the electrical connections of the stator windings presented.*

**Materials and/or methods.** *The dangerous states of the mine precinct electrical network are supported by the reverse energy flows of asynchronous motors in the run-down mode after disconnecting the supply voltage. A mathematical apparatus and a computer model developed that allow establishing the potential for reducing the electrical parameters of the reverse EMF of a two-speed asynchronous motor in coasting mode by controlling the electrical parameters of the second winding of its stator not connected to the electrical network during operation.*

**Results.** *The potential possibility of limiting the parameters of the reverse energy flow from the working winding of the stator of a two-speed asynchronous motor in the coasting mode is established by closing another disconnected stator winding of the same engine and reducing the amount of electricity in the leakage circuit in the connection of this winding to the ground circuit magnitudes.*

**Conclusion.** *The concept of suppressing the return energy flows of asynchronous machines by the method of influencing their electromagnetic parameters was tested using the example of controlling the electrical parameters of a disconnected stator winding of a two-speed asynchronous motor during its transition to run-down mode. The simulation tools established the effect of controlling the magnitude of the inverse EMF of an induction motor.*

**Keywords:** *electrotechnical complex, two-speed asynchronous motor, coasting mode, reverse electromotive force, protective deenergizing, parameter control, modeling, functional dependencies.*

**Сведения об авторах**

**К.Н. Маренич**

SPIN-код: 8632-8425  
 Author ID: 377905  
 ORCID iD: 0000-0002-6309-4986  
 Телефон: +380 (71) 301-98-61  
 Эл. почта: knm1@donntu.org

**Е.С. Дубинка**

SPIN-код: 3110-5247  
 ORCID iD: 0000-0002-3003-6421  
 Телефон: +380 (71) 302-74-94  
 Эл. почта: ekaterina\_sd@bk.ru

*Статья поступила 22.07.2019 г.  
 © К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка, 2019  
 Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский*