

## УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ СОСТОЯНИЕМ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ КАК СПОСОБ ОГРАНИЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБРАТНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТОКА

*Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич*

*Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР*

Исследованы технические возможности способа ограничения параметров обратного энергетического потока асинхронного двигателя как средства управления его электромагнитными параметрами на основе применения короткозамыкаемой обмотки статора. Это обусловлено необходимостью подавления обратной ЭДС асинхронного двигателя многомашинного электротехнического комплекса (ЭТК) участка шахты, находящегося в состоянии свободного выбега после защитного отключения электросети.

Установлено, что в подобных ЭТК асинхронные машины средней и большой мощности способны создавать продолжительные по времени обратные энергетические потоки, наличие которых создает прецедент поддержания опасного состояния электротехнического комплекса в том случае, если причиной защитного отключения стало короткое замыкание в силовом присоединении или утечка тока на землю. Известные и разработанные в настоящее время технические средства выявления аварийного состояния электросети автономными средствами действуют на основе контроля параметров со стороны присоединений двигателей, что определяет практическую актуальность представленного исследования в области рационального направления технической реализации устройства подавления обратных энергетических потоков.

Основная идея статьи раскрыта в обосновании структуры модели асинхронного двигателя, представленного как электрогенерирующее звено с дополнительной обмоткой статора, предназначенной для формирования воздействия в отношении электромагнитных параметров двигателя. Исследованы процессы, происходящие при создании короткого замыкания в указанной обмотке с учетом существующих типоразмеров силовых трансформаторов, применяемых в современных ЭТК участка шахты и кабельной сети. Определены параметры дополнительной обмотки статора, позволяющие снизить до безопасных значений токи и напряжения в цепи действия обратных энергетических потоков АД и продолжительность существования обратной ЭДС на безопасном уровне.

*Ключевые слова:* электротехнический комплекс, асинхронный двигатель, электромагнитные параметры, обратный энергетический поток, ограничение, моделирование.

### **Общая постановка проблемы**

Современные технические средства защиты шахтных участков электротехнических комплексов от аварийных и опасных состояний (короткие замыкания, утечки тока на землю) реализуют принцип защитного отключения электросети, в соответствии с которым энергетический поток питающего трансформатора отделяется от системы электроснабжения технологического участка. Однако в этом случае не предотвращается воздействие на сеть обратных энергетических потоков асинхронных двигателей потребителей, переходящих в состояние выбега [1]. Существующая тенденция в отношении применения электрических машин более высокой мощности в составе электротехнического оборудования шахты предопределяет увеличение продолжительности воздействия на сеть обратных энергетических потоков электродвигателей, что снижает уровень безопасности электрических сетей шахтных установок [2–4]. Этим обусловлена актуальность поиска технических решений в области ускоренного защитного отключения электроустановок.

### **Анализ исследований и публикаций**

Выполненными ранее исследованиями, относящимися к обоснованию принципов и технических средств подавления воздействия на сеть обратных энергетических потоков асинхронных двигателей, доказана принципиальная возможность выявления аварийного состояния электросети автономными средствами со стороны вводов статоров электрических машин [5–7]. При этом в качестве исполнительных устройств рассматриваются контактные силовые коммутационные аппараты как на вводе статоров, так и в цепи их соединения в трехфазную схему. Кроме этого, рассматривается возможность применения полупроводникового короткозамыкателя ввода статора [8]. Тем не менее проблемным остается вопрос объединения функции коммутации силовой цепи двигателя и функции подавления (отключения) его обратного энергетического потока в одном устройстве. Здесь техническое противоречие усматривается в том, что размещение силового коммутатора непосредственно на двигателе не только существенно увеличивает его габарит, но и приведет к снижению ре-

сурса устройства в целом в связи с воздействием рабочего диапазона вибраций электрической машины. Расположение же коммутатора в отдельном корпусе не гарантирует безусловное его применение в процессе эксплуатации электрических машин и допускает наличие обратного энергетического потока на интервале выбега двигателя в присоединении между статором и силовым коммутатором. Кроме этого, в случае применения полупроводникового короткозамыкателя не исключается создание цепи искусственного короткого замыкания при отказе (пробое) его тиристоров [9–11].

### Постановка задачи исследования

Поскольку условием безопасной эксплуатации мощного шахтного участкового электротехнического комплекса является решение задачи ускоренного подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя потребителя, данную электрическую машину следует рассматривать как электрогенерирующую установку (работающую в режиме выбега). В связи с этим научную и практическую актуальность приобретает исследование технических возможностей управления электромагнитными процессами в данной установке в контексте создания условий для ускоренного подавления параметров ее обратного энергетического потока.

### Изложение материала и результаты исследований

В режиме свободного выбега ЭДС вращения асинхронного двигателя индуцируется в статоре вращающимся полем токов ротора. Если пренебречь процессом экспоненциального затухания амплитуды и частоты ЭДС вращения (в процессе выбега ротора), то асинхронный двигатель может быть представлен схемой трансформатора, первичная обмотка которого имитирует ротор и присоединена к источнику ЭДС (ротора), а вторичная – статор – присоединена к активно-индуктивной цепи, имитирующей силовое кабельное присоединение статора [12]. Обратный энергетический поток АД, возникающий во вторичной обмотке, характеризуется такими параметрами, как величины напряжения и тока, а также их частоты. К опасным состояниям сети, на которые может распространяться воздействие этого обратного энергетического потока, могут быть отнесены: междуфазное короткое замыкание в кабельной сети присоединения статора; цепь высокой проводимости между фазой кабельной сети присоединения статора и контуром «земля» [1, 13, 14].

В любом из указанных случаев параметры энергетического потока должны быть снижены до уровня, не представляющего: опасность воспламенения контура к.з.; опасность электропоражения (при возникновении цепи утечки тока на землю).

С целью исследования технических возмож-

ностей процесса управления электромагнитными параметрами асинхронного двигателя в контексте создания условий ограничения параметров обратного потока предположим, что в магнитопроводе статора может быть установлена дополнительная трехфазная обмотка. Тогда к возможным способам ограничения напряжения и тока в цепи основной обмотки статора АД можно отнести процесс создания режима к.з. в этой дополнительной статорной обмотке. Реакцией двигателя на это станет повышение тока в обмотке ротора, что, в свою очередь, вызовет потерю напряжения в активно-индуктивной роторной цепи и, как следствие, снижение напряжения в основной обмотке статора.

Рассмотрению подлежат параметры в цепи, имитирующей силовое кабельное присоединение статора, включая цепь междуфазного к.з., цепь утечки тока на землю. Предполагается варьирование активно-индуктивными параметрами силового кабельного присоединения, а также параметрами емкости изоляции сети (в зависимости от возможной длины кабеля). Выявленные параметры в силовом кабельном присоединении должны быть соотнесены с аналогичными при отсутствии управляющего воздействия со стороны дополнительной обмотки статора.

Расчетная схема объекта исследования представлена на рис. 1. Она состоит из трехфазного трехобмоточного трансформатора с соответствующими присоединениями, имитирующими источник ЭДС ротора  $E$ , активные и индуктивные сопротивления жил кабеля ( $L_1, L_2, R_3, R_4$ ), а также активные и емкостные сопротивления изоляции ( $R_7, C_1$ ). Цепь утечки представлена резистором  $R_6$ . Схема позволяет определять электрические параметры в цепях каждой из обмоток с учетом коэффициента трансформации. Параметры обмоток  $W_1$  и  $W_2$  должны соответствовать параметрам обмоток статора и ротора реального асинхронного двигателя, а параметры обмотки  $W_3$  могут варьироваться.

Указанной структуре соответствует компьютерная модель (рис. 2).

Точками контроля тока являются:

A1 – на вводе генерирующей (роторной) обмотки  $W_2$ ;

A2 – участок короткого замыкания;

A3 – дополнительная обмотка закорачивания;

A4 – величина тока утечки на землю;

A5 – количество электричества.

Контролируемые параметры в указанных точках описываются следующими зависимостями:

– в точке A1 – ток, обусловленный действием напряжения источника питания;

– в точке A2 –

$$i_k = i_n + i_a = \left( \frac{U_{\max}}{Z_k} \right) \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) +$$

$$+ i_{\alpha(t=0)} e^{(-t/T_\alpha)},$$

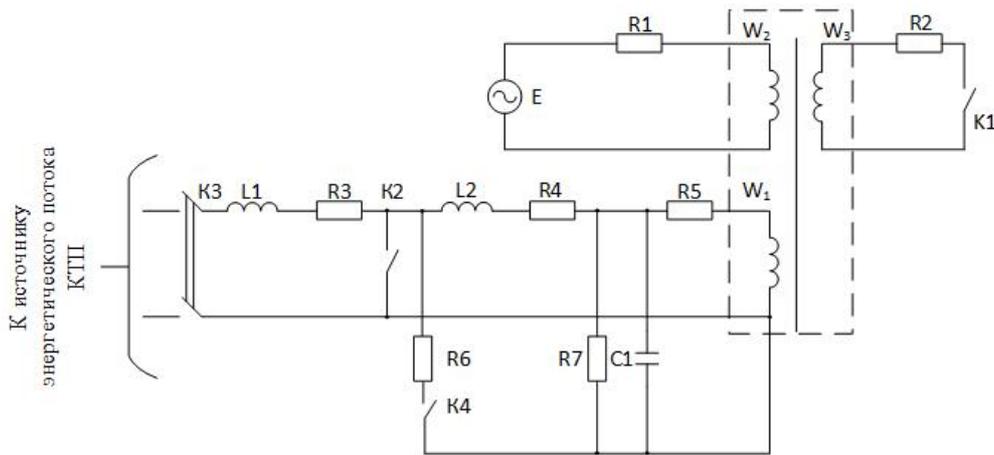


Рис. 1. Схема модели имитации процесса подавления энергетического потока электрической машины

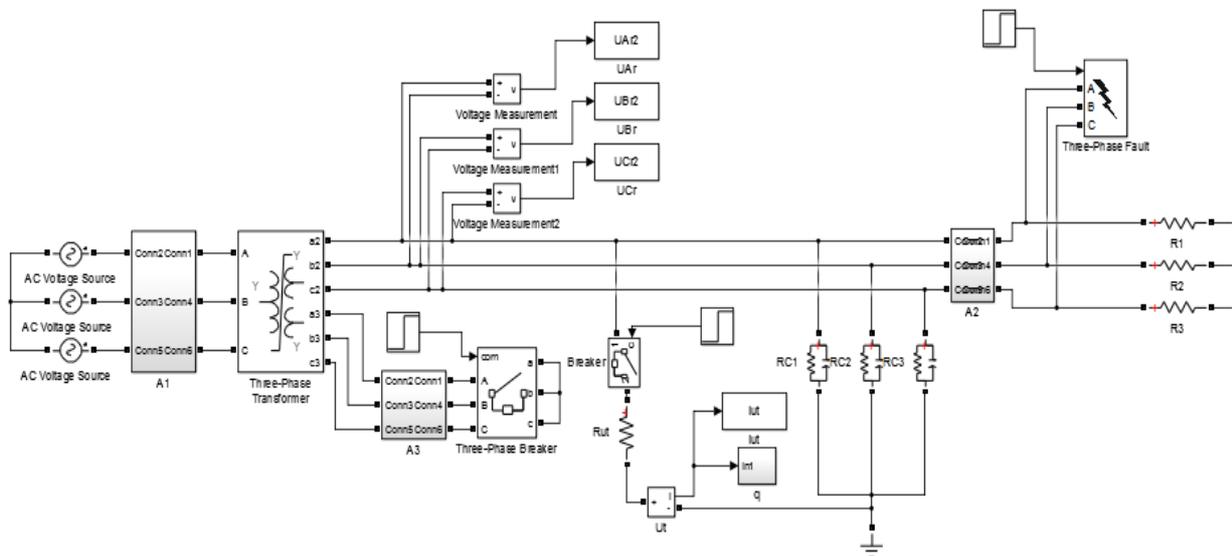


Рис. 2. Структура компьютерной модели трехфазной трансформаторной системы

где  $i_k, i_{п}, i_a$  – ток короткого замыкания до точки к.з., его периодическая и аperiodическая составляющие соответственно;  $Z_k$  – полное сопротивление цепи к.з.;  $\varphi_k$  – угол сдвига тока относительно напряжения;  $T_a = x_k / (\omega r_k)$  – постоянная времени цепи к.з.;  $\alpha$  – фаза включения короткого замыкания;  $x_k, r_k$  – индуктивное и активное сопротивление цепи к.з. соответственно;

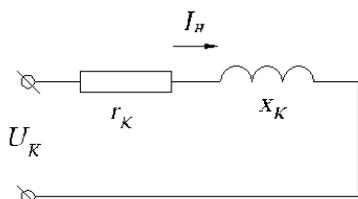


Рис. 3. Схема замещения приведенного трансформатора в режиме к.з.

– в точке А3 (рис. 3) [15] –

$$i_k = i_{уст} + i_{св} = 100\sqrt{2} \cdot I_{ном} / u_k \left[ \sin(\alpha_0 - \varphi_k) - \sin(\alpha_0 - \varphi_k) e^{-(R_k/L_k)t} \right],$$

где  $i_k, i_{уст}, i_{св}$  – ток короткого замыкания трансформатора, установившаяся и свободная составляющие тока соответственно;  $\varphi_k = \arctg(X_k/R_k)$ .

Цепь утечки тока на землю имитируется сопротивлением резистора (1 кОм)  $R_{ут}$ , а цепь междупазного короткого замыкания в присоединении кабеля статора имитируется ключами Three Phase Fault. При этом вводится допущение о фиксированном времени (продолжительности) действия обратного энергетического потока электрической машины (в присоединении кабеля статора 5 с), а также о неизменности величины и частоты ЭДС, генерируемой трехфазным источником (что допустимо на начальном этапе исследования модели

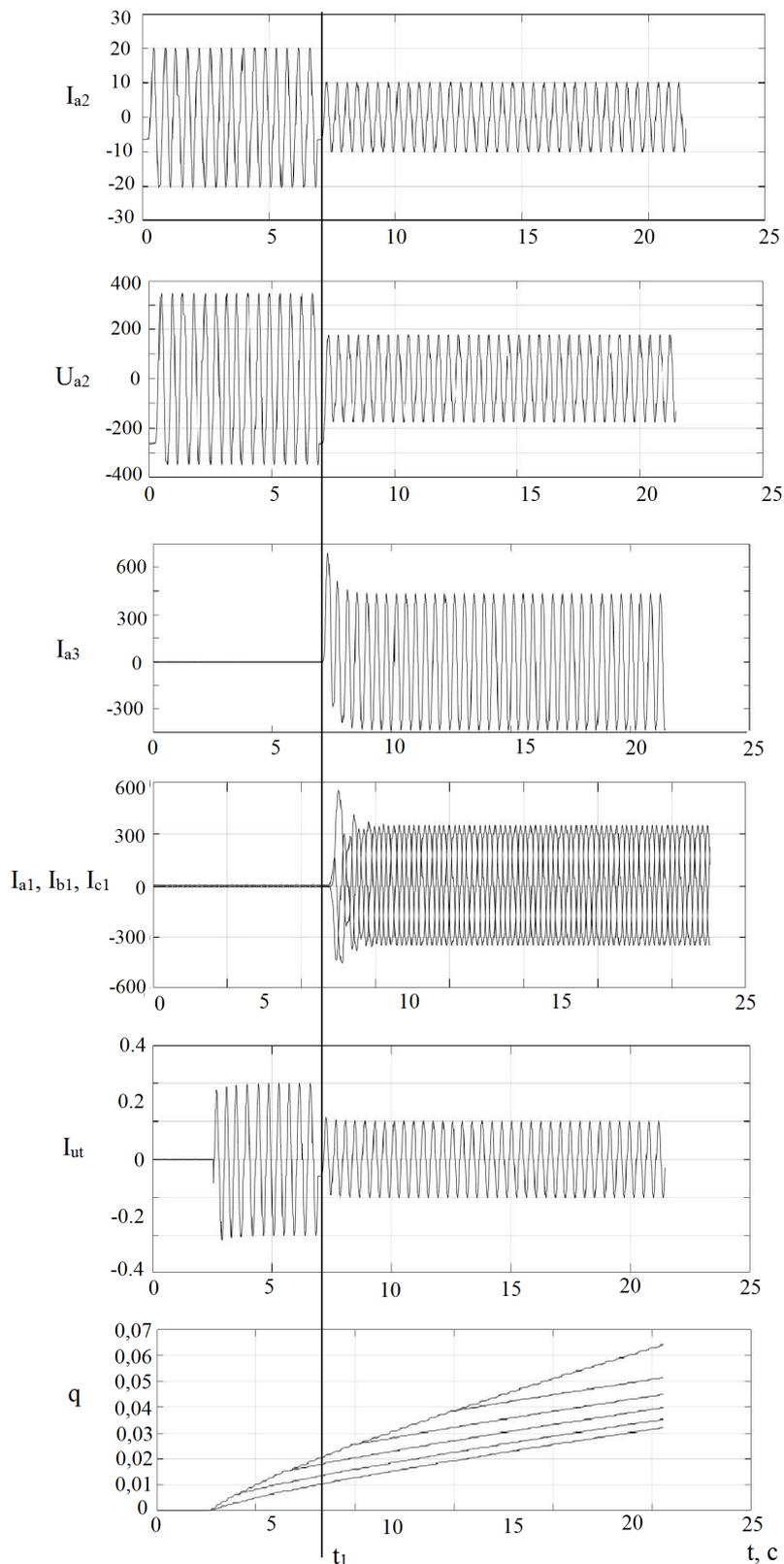


Рис. 4. Диаграммы изменения токов и напряжений в трансформаторных обмотках:  $I_{a2}$ ,  $U_{a2}$  – ток (А) и напряжение (В) в фазе А рабочей обмотки трансформатора ( $W_1$ );  $I_{a3}$  – ток фазы А дополнительной обмотки закорачивания ( $W_3$ ), А;  $I_a, I_b, I_c$  – токи фаз А, В, С генерирующей (роторной) обмотки  $W_2$ , А;  $I_{ut}$  – ток утечки на землю, мА;  $q$  – количество электричества, мА·с;  $t_1$  – момент создания к.з. в дополнительной обмотке  $W_3$

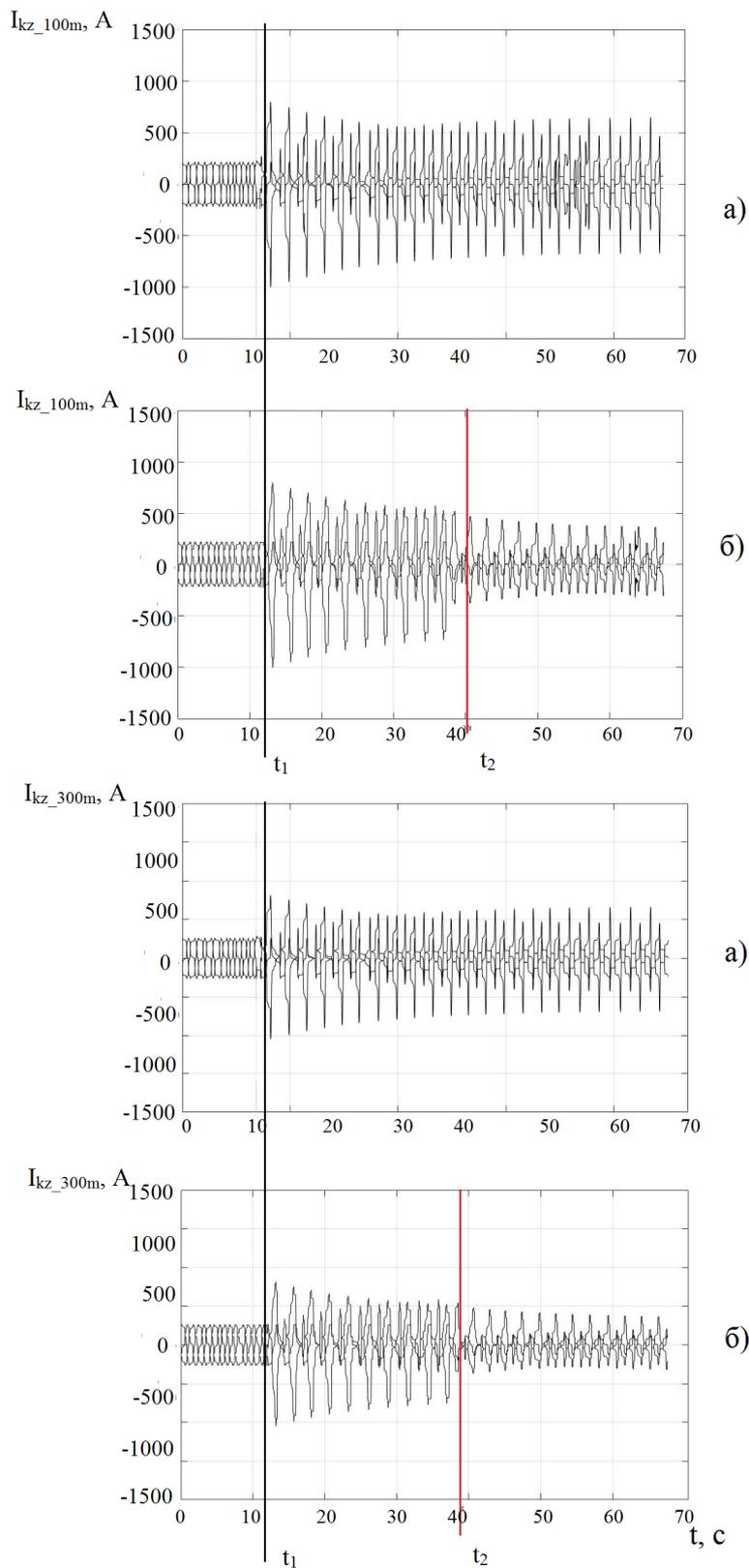


Рис. 5. Диаграммы тока междуфазного короткого замыкания: а) до управляющего воздействия со стороны дополнительной обмотки статора; б) после управляющего воздействия со стороны дополнительной обмотки статора в момент времени  $t_2$ ;  $t_1$  – возникновение междуфазного к.з.

и соответствует экстремальным параметрам опасного состояния объекта).

В ходе исследований должны приниматься следующие допущения и состояния:

- параметры обмоток  $W_1$  и  $W_2$  должны соответствовать параметрам обмоток статора и ротора АД (принимается АД типа ЭКВК 4-220 мощностью 220 кВт);

- величина фазной ЭДС источника равна 380 В, что соответствует ЭДС ротора указанного АД, вращающегося с номинальной угловой скоростью в режиме выбега;

- принимаются сечения кабеля марки КГЭШ в присоединении статора ( $W_1$ ) 25; 35; 50; 70; 95 мм<sup>2</sup>;

- длина указанного кабеля варьируется от 10 м до 300 м;

- место возникновения трехфазного к.з. в указанном кабеле варьируется в пределах 10–250 м от места подключения обмотки  $W_1$ ;

- место возникновения утечки тока на землю в указанном кабеле варьируется в пределах 10–250 м от места подключения обмотки  $W_1$ .

Параметры системы измеряются для состояний:

- создано к.з. в присоединении обмотки  $W_1$ ; в присоединении обмотки  $W_3$  цепь к.з. не создана;

- создано к.з. в присоединении обмотки  $W_1$ ; в присоединении обмотки  $W_3$  цепь трехфазного к.з. создана спустя  $\Delta t$  (диапазон  $\Delta t$  составляет 2–20 с);

- аналогичные условия для исследования параметров при возникновении цепи утечки тока на землю.

Общий вид полученных диаграмм представлен на рис. 4 и рис. 5, а обобщенные результаты представлены на рис. 6.

С учетом варьирования параметров силовых присоединений результаты исследований обобщены,

что позволило выявить общую тенденцию в отношении снижения величин составляющих обратного энергетического потока асинхронного двигателя в результате воздействия на его электромагнитные параметры. Установлено, что создание к.з. в дополнительной обмотке  $W_3$  способствует ограничению тока короткого замыкания (рис. 5б – момент времени  $t_2$ ), снижению тока в цепи утечки, а также ограничению количества электричества  $q$  (рис. 4 – момент времени  $t_1$ ). Обобщенные результаты иллюстрируются графиками (см. рис. 6).

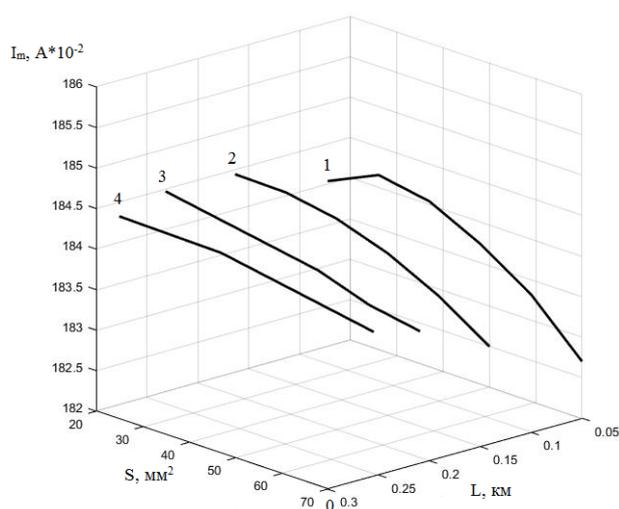
Установлено, что данный способ ограничивает величины тока на безопасном уровне по критерию воспламенения кабеля на время, достаточное для полного завершения генерирования обратного энергетического потока асинхронным двигателем, находящимся в режиме выбега (рис. 7). Критерием допустимого тока является зависимость [16]

$$I_{\text{доп}} = cs/\sqrt{t},$$

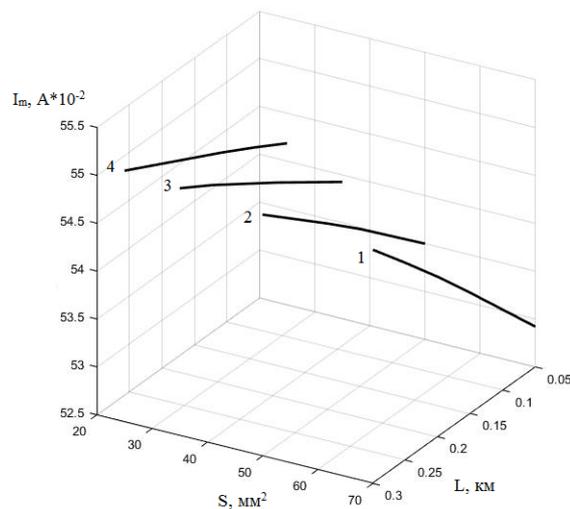
где  $c$  – коэффициент теплорассеивающей способности кабеля,  $c = 101$ ;  $s$  – сечение рабочей жилы кабеля, мм<sup>2</sup>;  $t$  – время отключения, с.

Указанные параметры могут быть отнесены к предельно возможному, поскольку реально ЭДС вращения двигателя, находящегося в режиме выбега, не остается неизменной по амплитуде и частоте, а снижается экспоненциально с постоянной времени двигателя.

Анализ графика (см. рис. 7) показывает, что в случае применения защитного закорачивания дополнительной обмотки статора в момент возникновения цепи утечки тока на землю может быть создан эффект снижения количества электричества до уровня, соответствующего критерию электробезопасности ( $q = 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$ ) в течение времени,



а)



б)

**Рис. 6.** Зависимость действующего значения тока короткого замыкания от сечения и длины кабеля: а) до защитного закорачивания обмотки  $W_3$ ; б) после защитного закорачивания; 1 – сечение 70 мм<sup>2</sup>, 2 – сечение 50 мм<sup>2</sup>, 3 – сечение 35 мм<sup>2</sup>, 4 – сечение 25 мм<sup>2</sup>

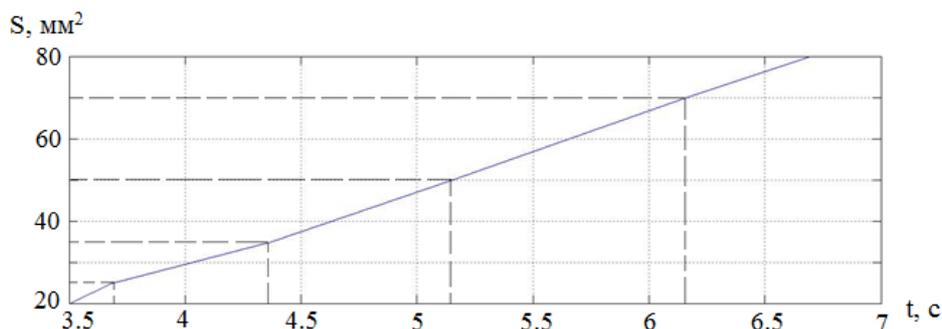


Рис. 7. Результат определения допустимого времени существования обратного энергетического потока в цепи силового присоединения статора АД типа ЭКВК 4-220 в зависимости от площади сечения жил гибкого кабеля при условии закорачивания дополнительной обмотки статора с учетом выполнения критерия электробезопасности ( $q = 50 \text{ мА}\cdot\text{с}$ )

достаточного для завершения формирования обратного энергетического потока в двигателе, находящемся в режиме выбега. Моделирование проводилось при условии неизменности величины обратной ЭДС. С учетом реально существующего экспоненциального закона ее снижения рассматриваемые параметры электробезопасности могут быть улучшены.

#### Заключение

На основании исследования процессов в модели электрической машины установлена потенциальная возможность ограничения параметров энергетического потока асинхронного двигателя на безопасном уровне посредством короткого замыкания в специальной дополнительной обмотке его статора. Определены допустимые величины токов и напряжений в цепи обратного энергетического потока и продолжительность безопасного состояния в цепи присоединения асинхронного двигателя при условии применения короткозамкнутой обмотки статора.

Направлением дальнейшего исследования является уточнение свойств токоограничения в цепи обратного энергетического потока асинхронного двигателя с учетом реальных параметров снижения величины и частоты ЭДС статора в режиме выбега.

#### Литература

1. Риман, Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт / Я.С. Риман. – М.: Недра, 1977. – 206 с.
2. Перехідні процеси в системах електропостачання / [Г.Г. Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен]; під ред. Г.Г. Півняка. – [2-е вид., доправ. та доп.]. – Дніпропетровськ: НГУ, 2002. – 579 с.
3. Berryann, R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States / 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)

4. Groh, H. Explosion protection: electrical apparatus and systems for chemical plants, oil and gas industry, coal mining / H. Groh. – Amsterdam; London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 524 p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-4777-9.50016-9

5. Дзюбан, В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан. – М.: Недра, 1982. – 152 с.

6. Маренич, К.Н. Синхронное двустороннее обесточивание поврежденного участка кабеля шахтной участковой электросети / К.Н. Маренич, И.В. Ковалева // Уголь Украины: науч. журн. – 2011. – № 5. – С. 53–54.

7. Маренич, К.М. Обґрунтування ефективності нейтралізації зворотньої ЕРС двигунів як способу підвищення безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти / К.М. Маренич, С.В. Василець // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 2. – С. 42–47.

8. Маренич, К.Н. Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов: монография / К.Н. Маренич. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 234 с.

9. Шишкин, Н.Ф. Быстродействующая защита шахтных сетей от замыкания на землю / Н.Ф. Шишкин. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 53 с.

10. Шишкин, Н.Ф. Быстродействующая защита от токов утечки на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В / Н.Ф. Шишкин. – М.: ИГД, 1960. – 50 с.

11. Колосюк, В.П. Повышение взрывопожаробезопасности шахтных систем электроснабжения / В.П. Колосюк, П.К. Жуйков // Взрывозащитное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2008. – С. 99–116.

12. Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

13. High voltage mining equipment for use un-

*derground: handbook*. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.

14. Nelson, J.P. *System Grounding, Ground Fault Protection and Electrical Safety* / J.P. Nelson, P.K. Sen // *IEEE Press Series on Power Engineering*. – Wiley-IEEE Press, 2009. – 500 p.

15. Кацман М.М. *Электрические машины*. – М.: Академия, 2001. – 463 с.

16. *Электроснабжение угольных шахт* / С.А. Волотковский, Ю.Т. Разумный, Г.Г. Пивняк и др. – М.: Недра, 1984. – 376 с.

Дубинка Екатерина Сергеевна, аспирант, кафедра «Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова», Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР; ekaterina\_sd@bk.ru.

Маренич Константин Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова», Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР.

*Поступила в редакцию 18 июля 2017 г.*

---

DOI: 10.14529/power170405

## CONTROL OF ELECTROMAGNETIC CONDITION OF ASYNCHRONOUS MACHINES AS A METHOD OF LIMITATION OF PARAMETERS OF REVERSE ENERGY FLOW

*E.S. Dubinka, ekaterina\_sd@bk.ru,  
K.N. Marenich*

*Donetsk National Technical University, Donetsk, Donetsk People's Republic*

The article explores technical capabilities of the method for limiting the parameters of the reverse energy flow of an induction motor as a means of controlling its electromagnetic parameters based on the application of a short-circuited stator winding. This is due to the need to suppress the reverse EMF of an asynchronous motor of a multi-machine electrotechnical complex of a mine site which is in a freewheel state after a protective supply turning off.

It is established that in such electrotechnical complex of mines asynchronous machines of medium and high power are able to create long-term reverse energy flows the presence of which creates a precedent for maintaining the dangerous state of the electrical complex if the cause of the protective switch-off is a short circuit in the power connection or ground leakage. The known and currently developed technical means for detecting the emergency condition of the power grid by autonomous means operate on the basis of monitoring parameters on the side of the motor connections which determines the practical relevance of the presented research in the rational direction of the technical implementation of the device for suppressing reverse energy flows.

The main idea of the article is disclosed in the justification of the structure of the model of an asynchronous motor represented as an electrogenerating link with an additional stator winding designed to generate impact on the electromagnetic parameters of the engine. The processes that occur when a short-circuit in this winding is induced, taking into account the existing sizes of power transformers used in the modern electrotechnical complex of mines and the cable network, were investigated. The parameters of the additional stator winding were determined which reduce the currents and voltages to safe values in the circuit of the action of the reverse energy flows of the induction motor and the duration of the reverse EMF existence at a safe level.

*Keywords: electrotechnical complex, induction motor, electromagnetic parameters, reverse energy flow, limitation, modeling.*

### References

1. Riman Ya.S. *Zashchita podzemnykh elektricheskikh ustanovok ugol'nykh shakht* [Protection of Underground Electric Installations of Coal Mines]. Moscow, Nedra, 1977. 206 p.

2. Pivnjak G.G., Vinoslavs'kij V.M., Ribalko A.Ya., Nesen L.I. *Perehidni procesi v sistemah elektropostachannja: pidruchnik dlja vuziv* [Transition Processes in Power Supply Systems: Textbook for Universities]. Dnipropetrovs'k, NGU Publ., 2002, 579 p.

3. Berryann R.J., Voelker J.A. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States. 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)
4. Groh H. *Explosion Protection: Electrical Apparatus and Systems for Chemical Plants, Oil and Gas Industry, Coal Mining*. Amsterdam, London, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. 524 p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-4777-9.50016-9
5. Dzyuban V.S. *Apparaty zashchity ot tokov utechki v shakhtnykh elektricheskih setyakh* [Devices for Protection Against Leakage Currents in Mine Electrical Networks]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 152 p.
6. Marenich K.N., Kovaleva I.V. [Synchronous Two-Way De-Energizing of the Damaged Cable Section of the Mine District Power Network]. *Ugol' Ukrainy: nauchnyy zhurnal* [Coal of Ukraine: a scientific journal], 2011, no. 5, pp. 53–54 (in Russ).
7. Marenich K.M., Vasilets S.V. [Substantiation of the Efficiency of Neutralization of Reverse EMF of Engines as a Way of Improving the Safety of Operation of the Electrical Engineering Complex of the Mine Site]. *Tekhn. Elektrodinamika* [Technical Electrodynamics], 2009, no. 2, pp. 42–47. (in Ukr)
8. Marenich K.N. *Teoreticheskie osnovy i printsipy primeneniya zashchitnogo obestochivaniya rudnichnykh elektrotekhnicheskikh kompleksov: monografiya*. [Theoretical Bases and Principles of Application of Protective De-Energization of Mine Electrotechnical Complexes: Monograph], Donetsk, 2015. 234 p.
9. Shishkin N.F. *Bystrodejstvujushhaja zashhita shakhtnyh setej ot zamykanija na zemlju* [High-Speed Protection of Mine Networks From Ground Faults], Moscow: Gosgortehizdat Publ., 1960. 53 p.
10. Shishkin N.F. *Bystrodejstvujushhaja zashhita ot tokov utechki na zemlju v setjah s izolirovannoj nejtral'ju naprjazheniem do 1000 V* [High-speed Protection Against Earth Leakage Currents in Networks with Isolated Neutral Voltage up to 1000 V]. Moscow, IGD Publ., 1960. 50 p.
11. Kolosjuk V.P., Zhujkov P.K. [Increase of Fire and Explosion Safety of Mine Electric Power Supply Systems]. *Vzryvnauch. trudov UkrNIIVJE* [Explosion-Proof Electrical Equipment: collection of scientific papers UkrNIIVE], 2008, pp. 99–116. (in Russ.)
12. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric Machines]. Saint Petersburg, Energiya Publ., 1974. 840 p.
13. *High voltage mining equipment for use underground: handbook*. Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. 68 p.
14. Nelson J.P., Sen P.K. *System Grounding, Ground Fault Protection and Electrical Safety*. *IEEE Press Series on Power Engineering*, Wiley-IEEE Press, 2009. 500 p.
15. Katsman M.M. *Elektricheskie mashiny* [Electric Machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2001. 463 p.
16. Volotkovskij S.A., Razumnyj Ju.T., Pivnjak G.G. et al. *Elektrosnabzhenie ugol'nyh shaht* [Electric Power Supply for Coal Mines]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 376 p.

Received 18 July 2017

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

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. – Т. 17, № 4. – С. 39–47. DOI: 10.14529/power170405

**FOR CITATION**

Dubinka E.S., Marenich K.N. Control of Electromagnetic Condition of Asynchronous Machines as a Method of Limitation of Parameters of Reverse Energy Flow. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 39–47. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170405