

К.Н. Маренич /д.т.н./, Е.С. Дубинка /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КАК ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОПОРАЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ШАХТЫ

Рассмотрены средства подавления обратных энергетических потоков асинхронных двигателей. Исследованы возможности применения закорачивания дополнительной статорной обмотки и индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя как способа реализации функции подавления его обратного энергетического потока в процессе защитного обесточивания промышленного участкового электротехнического комплекса.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, асинхронный двигатель, режим выбега, обратная ЭДС, защитное обесточивание, управление параметрами, моделирование.

Постановка проблемы

Потенциально опасное состояние шахтной участковой электрической сети на временном интервале, следующем за моментом отключения напряжения питания, обусловлено функционированием асинхронного двигателя (АД) потребителя в режиме выбега, который в этом случае функционирует как электрогенерирующая установка, подавая в сеть электродвижущую силу (ЭДС), индуцируемую вращающимся полем токов ротора. В общем случае подавление обратного энергетического потока в сети предполагает формирование управляющего воздействия, приводящего к снижению амплитуды и продолжительности индуктирования обратной ЭДС АД. Комплексная оценка изменения время-амплитудного параметра обратной ЭДС АД должна рассматриваться в контексте соответствия критерию электробезопасности силовых присоединений асинхронного двигателя. В связи с этим управление параметрами обратной ЭДС АД должно предусматривать максимальный уровень и максимальную интенсивность снижения ее амплитуды.

С учетом того, что обратная ЭДС АД обусловлена динамическим электромагнитным состоянием асинхронной машины, представляется уместным воздействовать на процесс снижения этой ЭДС путем управления электромагнитным состоянием АД на интервале выбега.

В качестве вариантов могут быть рассмотрены воздействия как на электрические, так и на электромеханические параметры двигателя, определяющие амплитудно-частотные характеристики его обратной ЭДС [1].

Анализ последних исследований и публикаций

Исследования в области предотвращения опасного воздействия обратных энергетических потоков АД осуществлялись в разных направлениях, наиболее характерными из которых являлись:

1. Поиск и реализация исполнительных устройств подавления обратных ЭДС асинхронных двигателей. Результаты исследований [2] позволяют сделать вывод о принципиальной возможности защитного обесточивания электротехнического комплекса участка шахты, однако все предложенные технические решения имеют ограниченную область применения. Кроме того, специфика технического исполнения устройств ограничивает возможности практического применения. В частности, проблемным является вопрос внедрения конструкции силового полупроводникового короткозамыкателя либо трехфазного коммутатора статорной обмотки непосредственно в конструкцию двигателя.

2. Устройства и принципы выявления аварийного состояния питающего кабеля автономно действующими техническими средствами, установленными как со стороны питающей подстанции, так и со стороны асинхронного двигателя потребителя [3].

Следовательно, в настоящее время не существует корректного технического решения, которое отличалось бы достаточными параметрами быстродействия и приемлемостью реализации. Поэтому актуальным является поиск решений в области реализации функции подавления обратного энергетического потока АД компактным силовым электрическим устройством, адаптиро-

ваным к применению в условиях эксплуатации рудничного электрооборудования.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является анализ способов подавления обратных энергетических потоков и установление рациональной структуры исполнительного устройства подавления обратной ЭДС АД в режиме выбега, удовлетворяющей критерию быстродействия обесточивания аварийного присоединения.

Основной материал исследования

Факторы электротравматизма и функции защиты от электропоражения в сети электротехнического комплекса (ЭТК) участка шахты иллюстрируются схемой (рис. 1).

Из анализа схемы формирования электропоражающего фактора в электрической сети участка шахты на примере применения последних разработок в области обеспечения электробезопасности (аппарат АЗУР-4МК) следует, что реакцией защиты на прикосновение человека к фазе сети (R_{ym}) на участке между контактором КМ1 пускателя и АД (М1) потребителя будет отключение автоматического выключателя QF1 участковой трансформаторной подстанции одновременно с включением короткозамыкателя 3 фазы, к которой произошло прикосновение, что выявляется блоком определения поврежденной фазы (ОПФ) 4. Заданная персоналом величина составляющей емкости изоляции сети компенсируется статическим компенсатором 6. В соответствии с техническими характеристиками аппарата АЗУР-4МК эта его собственная защитная функция по продолжительности составляет 0,01 с [4]. Общая продолжительность процесса отключения автоматического выключателя QF1 достигает 90 мс.

Электропоражающий фактор (количество электричества q в цепи утечки тока на землю) может быть рассчитан в отношении касания человеком с собственным сопротивлением тела $R_{ym}=1$ кОм фазы сети между магнитным пускателем и АД для следующих состояний:

- состояние 1 – средства защиты от электропоражения отсутствуют;
- состояние 2 – срабатывает защита от утечек тока на землю с закорачиванием «поврежденной» фазы через 0,01 с от начала процесса и с отключением напряжения сети через 0,1 с от начала процесса. Компенсируется емкость изоляции 0,5 мкФ/фазу. Влиянием обратной ЭДС АД пренебрегаем;
- состояние 3 – срабатывает защита от утечек тока на землю (аналогично предыдущему варианту). После отключения сети учитывается воздействие обратной ЭДС АД мощностью 250 кВт (нагрузкой АД пренебрегаем);
- состояние 4 – учитываются все параметры состояния 3. При этом принимается двухскоростной АД типа АДВК-355LA12/4, номинальной мощности 250/85 кВт, и в режиме выбега закорачивается обмотка пониженной скорости;
- состояние 5 – учитываются все параметры состояния 3. При этом принимается двухскоростной АД типа АДВК-355LA12/4, номинальной мощности 250/85 кВт, и в режиме выбега закорачивается обмотка номинальной скорости;
- состояние 6 – учитываются все параметры состояния 3. При этом в момент возникновения утечки тока на землю осуществляется индукционно-динамическое торможение АД типа ЭКВ4-250, номинальной мощности 250 кВт (угол отпирания тиристора динамического торможения 100 эл. град.); задержка процесса 0,05 с (на коммутацию сети).

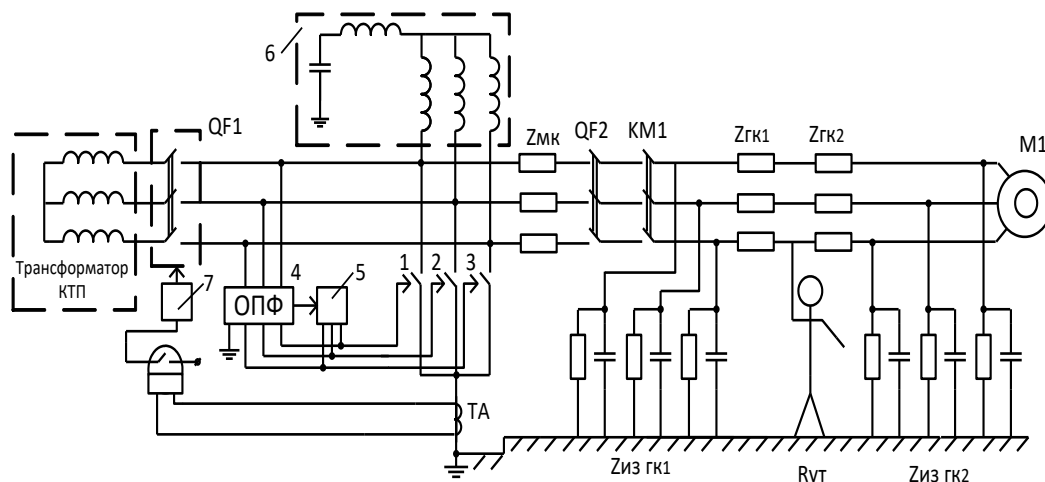


Рис. 1. Схема формирования электропоражающего фактора в электрической сети ЭТК: 1,2,3 – фазные короткозамыкатели, ФК; 4 – блок выявления поврежденной фазы; 5 – блок управления ФК; 6 – компенсатор емкости сети; 7 – устройство отключения автоматического выключателя QF1

Исследование параметров электробезопасности применительно к вышеперечисленным состояниям может быть выполнено методом компьютерного моделирования. При этом за основу принимается расчетная схема (см. рис. 1) и вводятся допущения: линейное напряжение сети 1140 В, сечение кабелей (марки КГЭШ) варьируется в диапазоне от 25 мм² до 70 мм² (25 мм², 35 мм², 50 мм², 70 мм²). При этом исследования выполняются для кабелей следующих протяженностей: 100 м, 200 м, 300 м.

Полученные параметры и обобщенные характеристики процесса представлены графиками (рис. 2...15) [5].

Анализ диаграмм тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление утечки (без учета компенсации емкости сети) (рис. 2...4) позволяет сделать вывод о превышении уровня количества электричества через человека нормированной величины по критерию электробезопасности ($q=50 \text{ мА}\cdot\text{с}$).

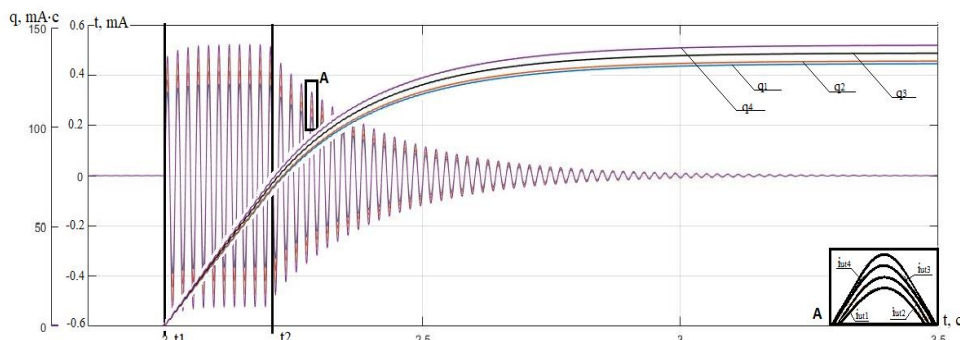


Рис. 2. Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: 1 – КГЭШ 3х70 мм²; 2 – КГЭШ 3х50 мм²; 3 – КГЭШ 3х35 мм²; 4 – КГЭШ 3х25 мм². Длина кабеля 100 м, состояние 1

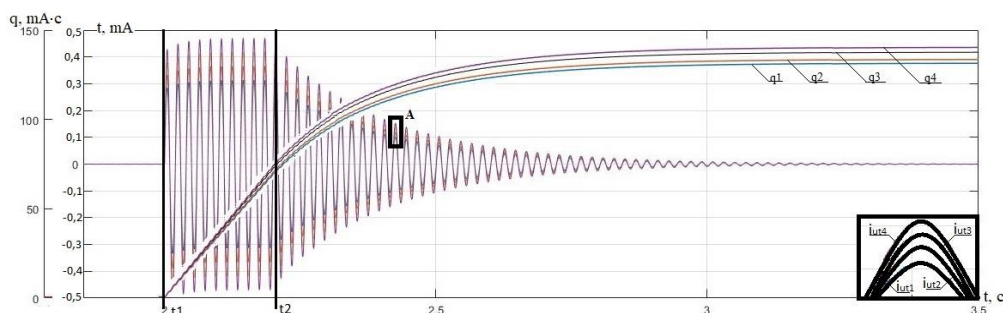


Рис. 3. Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: 1 – КГЭШ 3х70 мм²; 2 – КГЭШ 3х50 мм²; 3 – КГЭШ 3х35 мм²; 4 – КГЭШ 3х25 мм². Длина кабеля 200 м, состояние 1

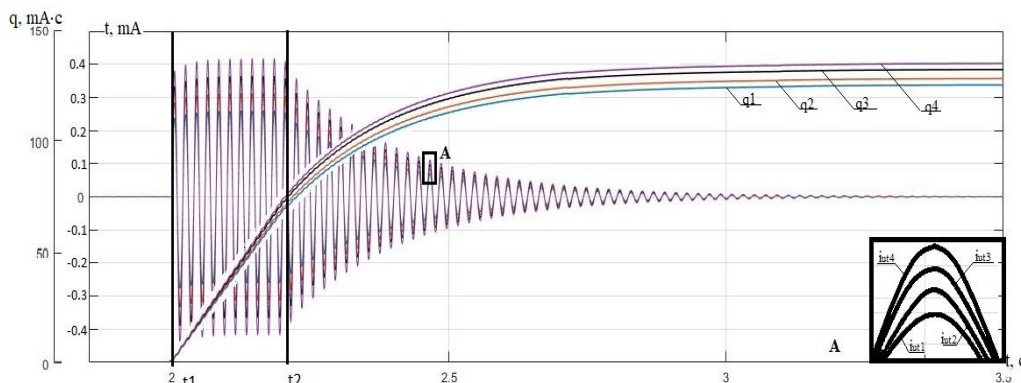


Рис. 4. Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: 1 – КГЭШ 3х70 мм²; 2 – КГЭШ 3х50 мм²; 3 – КГЭШ 3х35 мм²; 4 – КГЭШ 3х25 мм². Длина кабеля 300 м, состояние 1

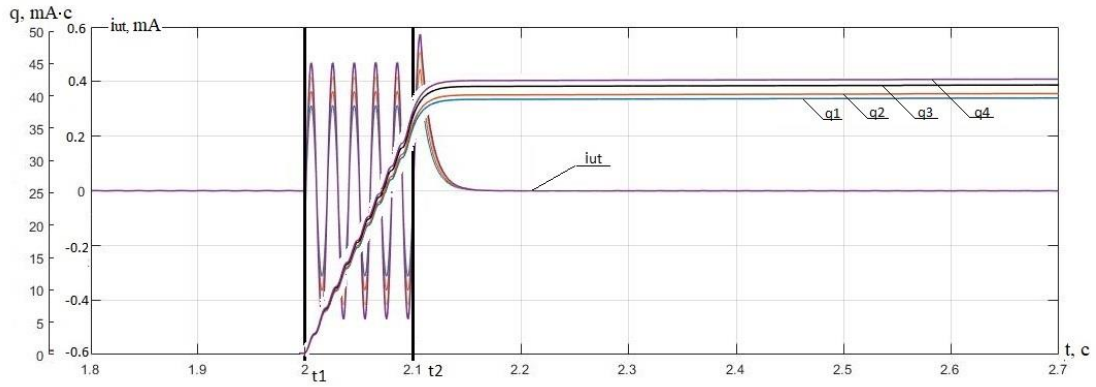


Рис. 5. Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм². Длина кабеля 100 м, состояние 2; t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю

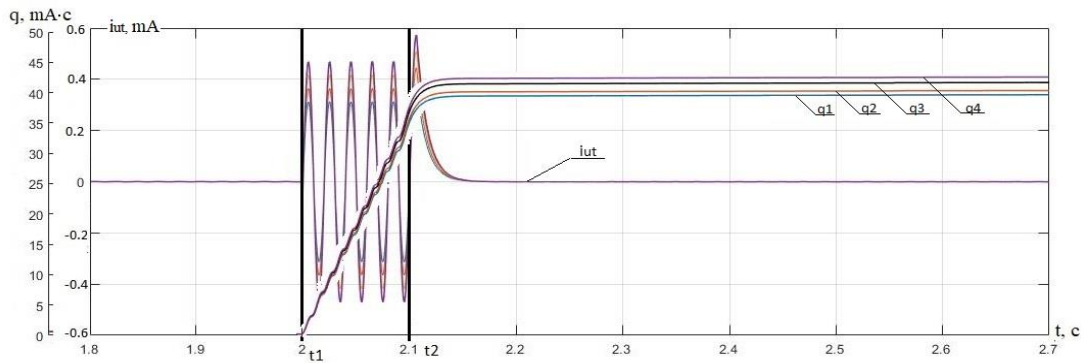


Рис. 6. Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм². Длина кабеля 200 м, состояние 2; t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю

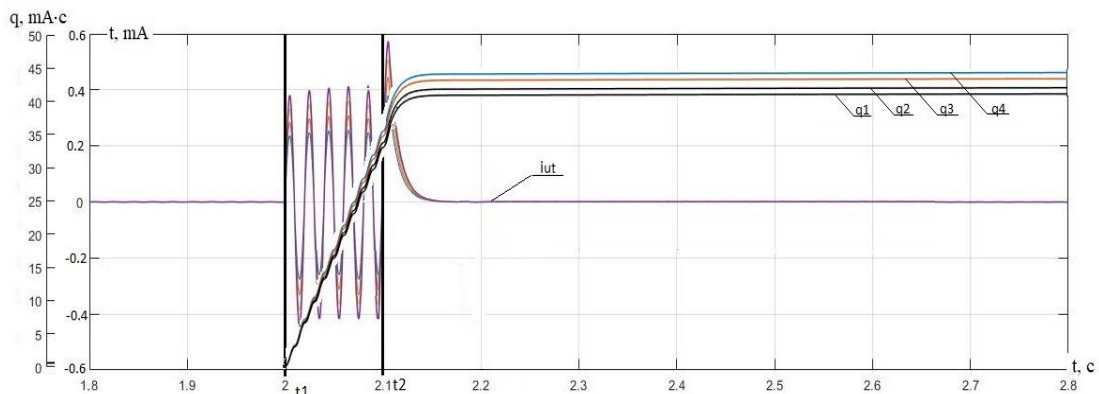


Рис. 7. Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки: 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм². Длина кабеля 300 м, состояние 2; t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю

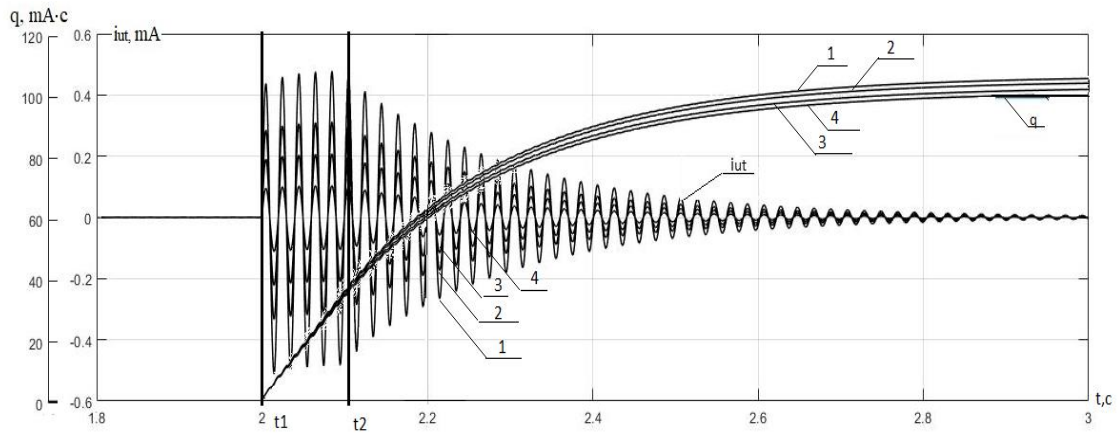


Рис. 8. Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки:
 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм².
 Длина кабеля 100 м, состояние 3; t_1 – начало аварийного процесса;
 t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю

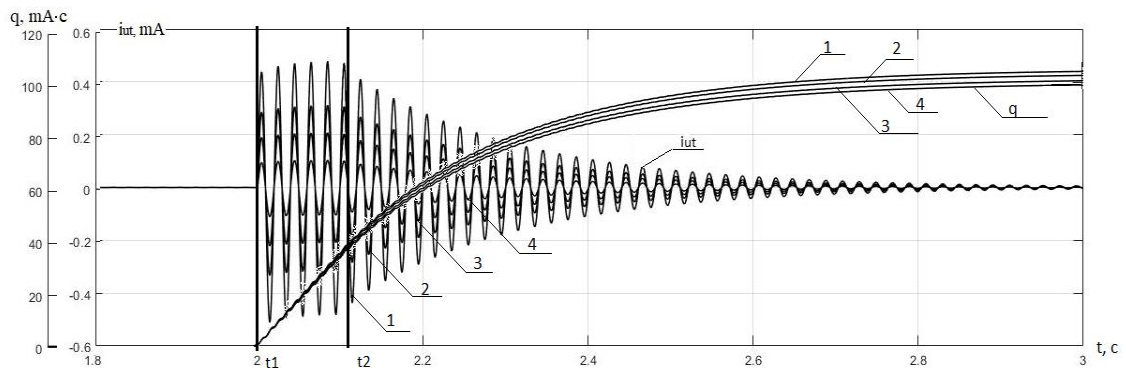


Рис. 9. Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки:
 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм².
 Длина кабеля 200 м, состояние 3; t_1 – начало аварийного процесса;
 t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю

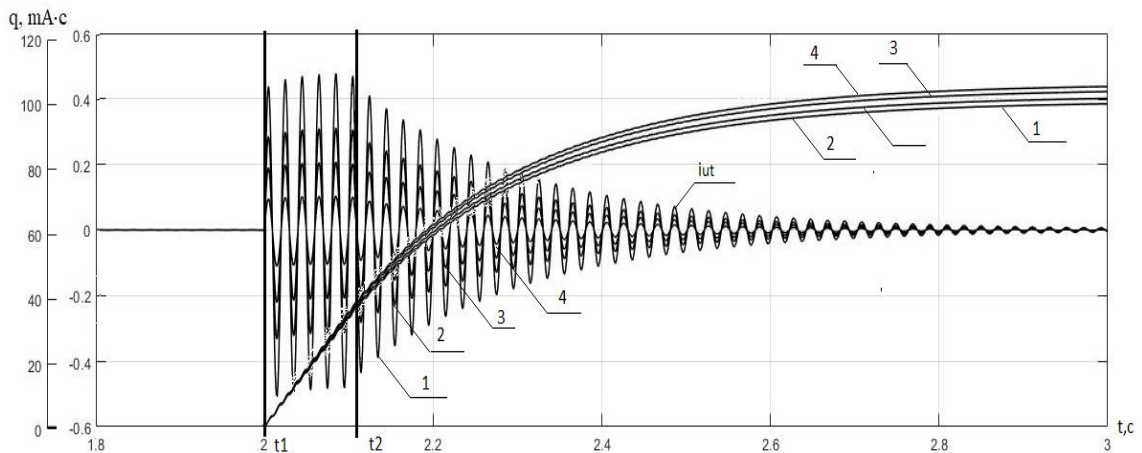


Рис. 10. Диаграммы величин тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки в кабелях марки:
 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм².
 Длина кабеля 300 м, состояние 3; t_1 – начало аварийного процесса;
 t_2 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю

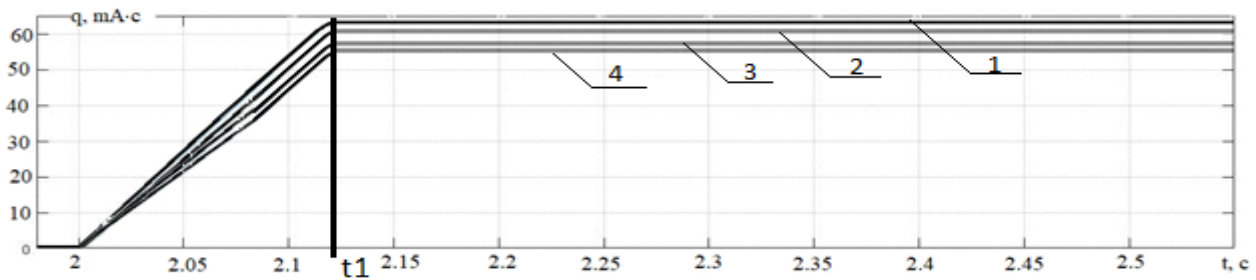


Рис. 11. Диаграмма изменения во времени количества электричества q через сопротивление утечки тока на землю при касании человека, $R_{ym}=1\text{кОм}$, к подключенной к сети обмотке номинальной скорости двухскоростного АД типа АДВК-355LA12/4, номинальной мощности 250/85 кВт, при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки статора этого же двигателя в режиме выбега, t_1 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю; утечка тока на землю произошла в кабеле для кабелей марки: 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм² длиной 200 м, состояние 4

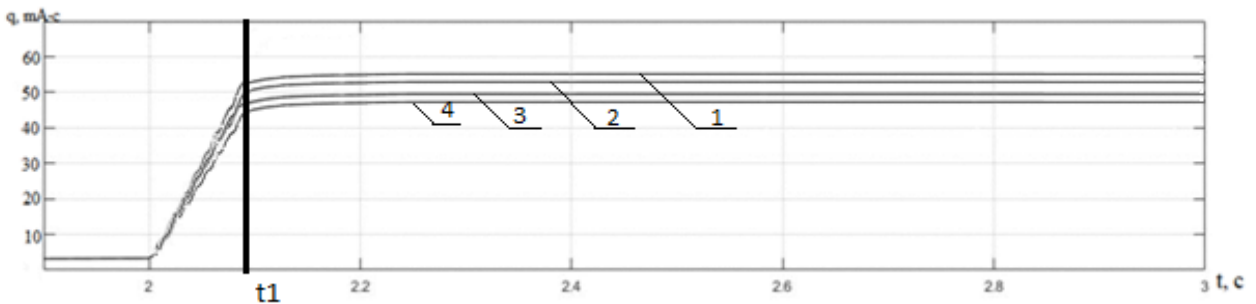


Рис. 12. Диаграмма изменения во времени количества электричества q через сопротивление утечки тока на землю при касании человека, $R_{ym}=1\text{кОм}$, к подключенной к сети обмотке пониженной скорости двухскоростного АД типа АДВК-355LA12/4, номинальной мощности 250/85 кВт, при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки статора этого же двигателя в режиме выбега, t_1 – момент срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю; утечка тока на землю произошла в кабеле для кабелей марки: 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм² длиной 200 м, состояние 5

Анализ свойств ограничения электропоражающего фактора в отключенной от сети обмотке статора двухскоростного АД позволяет сделать вывод о функциональной недостаточности данного способа [6,7]. Так, допустимый параметр электробезопасности ($q=50\text{ мА}\cdot\text{с}$) будет превышен в следующих случаях:

- при касании к подключенной к сети обмотке номинальной скорости двухскоростного асинхронного двигателя при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки статора этого же двигателя в режиме выбега для всех типов кабелей;

- при касании к подключенной к сети обмотке пониженной скорости двухскоростного асинхронного двигателя при наличии ограничивающего эффекта со стороны закороченной отключенной обмотки статора этого же двигателя в

режиме выбега для кабелей типа КГЭШ 3x70 мм² и КГЭШ 3x50 мм².

Очевидным фактором усиления эффекта подавления обратной ЭДС АД является совмещение процесса формирования контура повышенного тока в цепи статора с процессом замедления ротора, что соответствует эффекту индукционно-динамического торможения АД. Диаграммы параметров структуры ЭТК в состоянии индукционно-динамического торможения АД в диапазоне углов отпираания тиристора цепи тока динамического торможения $100 \leq \alpha \leq 135$ (эл. град.) приведены на рис. 13...15, из которых следует, что способ индукционно-динамического торможения АД позволяет ограничить электропоражающий фактор вне зависимости от сечений и длин кабелей марки КГЭШ, в которых может образоваться цепь утечки ($R_{ym}=1\text{ кОм}$) тока на землю.

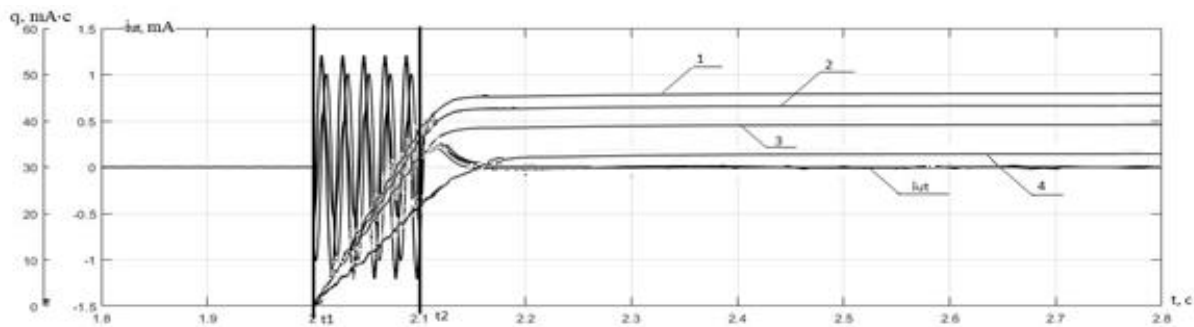


Рис. 13. Диаграммы мгновенных значений тока утечки на землю и количества электричества q через сопротивление точки, $R_{ум}=1\text{кОм}$, в кабелях марки: 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм² с учетом эффекта ИДТ АД типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт; длины кабеля 100 м

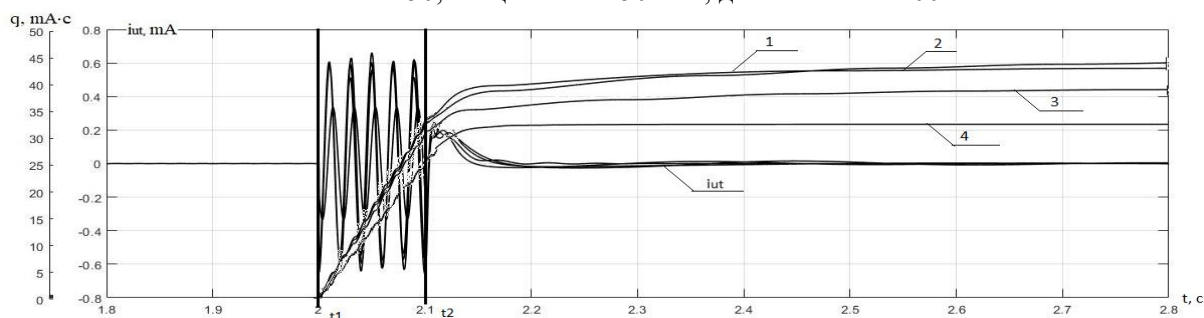


Рис. 14. Диаграммы мгновенных значений тока утечки на землю и количества электричества q через сопротивление точки, $R_{ум}=1\text{кОм}$, в кабелях марки: 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм² с учетом эффекта ИДТ АД типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт; длины кабеля 200 м

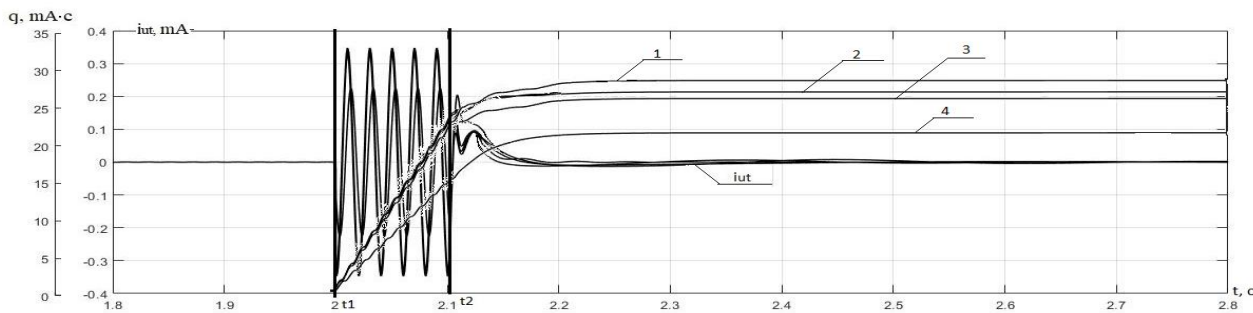


Рис. 15. Диаграммы мгновенных значений тока утечки на землю и количества электричества q через сопротивление точки, $R_{ум}=1\text{кОм}$, в кабелях марки: 1 – КГЭШ 3x70 мм²; 2 – КГЭШ 3x50 мм²; 3 – КГЭШ 3x35 мм²; 4 – КГЭШ 3x25 мм² с учетом эффекта ИДТ АД типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт; длины кабеля 300 м

Выводы

Исследованиями установлен эффект уменьшения величины количества электричества q в сопротивлении утечки на землю при закорачивании отключенной от сети обмотки статора двухскоростного АД либо дополнительной обмотки статора односкоростного АД в режиме выбега двигателя в сравнении с этим же параметром при отсутствии указанного управляющего воздействия. При этом выявлена функцио-

нальная недостаточность данного защитного воздействия. В частности, установлен широкий диапазон длин и сечений кабелей марки КГЭШ, в котором допустимый параметр электробезопасности ($q=50\text{ мА}\cdot\text{с}$) будет превышен вне зависимости от наличия либо отсутствия эффекта закорачивания отключенной от сети дополнительной обмотки статора АД как применительно к односкоростному, так и применительно к двухскоростному двигателю.

Установлено, что фактором усиления эффекта подавления обратной ЭДС АД является совмещение процесса формирования контура повышенного тока в цепи статора с процессом замедления ротора, что соответствует эффекту индукционно-динамического торможения АД и позволяет ограничить величину количества электричества в цепи утечки тока на землю до безопасных ($q \leq 50 \text{ мА} \cdot \text{с}$) величин для всех сечений кабелей марки КГЭШ длиной до 300 м.

Список литературы

1. Дубинка, Е.С. Обеспечение безопасных режимов работы шахтных электрических сетей на основе управления параметрами обратных ЭДС электропотребителей: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Дубинка Екатерина Сергеевна. – Донецк, 2020. – 155 с.
2. Маренич, К.Н. Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов: монография. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 234 с.
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. Аппарат защиты от токов утечки унифицированный рудничный АЗУР-4МК. Руководство по эксплуатации ИТЭП.648513.004.РЭ. – Донецк, 2013. – 28 с.
5. Управление параметрами обратных ЭДС асинхронных двигателей как средство повышения безопасности эксплуатации промышленных электросетей: монография / К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка. – Донецк: Донецкая политехника, ГОУВПО «ДонНТУ», 2020. – 142 с.
6. 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.
7. Pienkowski, K. Analysis and Control of Dual Stator Winding Induction Motor // Arch. Electr. – 2012. – Eng. 61. – P.421-438.

K.N. Marenich /Dr. Sci. (Eng.)/, E.S. Dubinka /Cand. Sci. (Eng.)/

Donetsk National Technical University (Donetsk)

ANALYSIS OF METHODS FOR SUPPRESSING REVERSE ENERGY FLOWS OF ASYNCHRONOUS MOTORS AS A FACTOR OF PROTECTION AGAINST ELECTRIC SHOCK IN THE ELECTRICAL INSTALLATIONS OF MINES

Background. Means for suppressing reverse energy flows of induction motors (IM) are considered. The possibilities of using the short-circuiting of an additional stator winding and induction-dynamic braking of an asynchronous motor as a method of realizing the function of suppressing its reverse energy flow in the process of protective de-energization of an industrial district electrical complex have been investigated.

Materials and/or methods. The electrical shock factor can be calculated concerning a person's contact with a body's body resistance of 1 kOhm to the network phase between the magnetic starter and the blood pressure for the following network conditions. There are no means of protection against electrocution; protection against current leakage to earth is triggered with short-circuiting of the «damaged» phase in 0.01 s from the beginning of the process; a two-speed IM of the type is adopted and in the coasting mode the winding of the reduced speed is short-circuited; a two-speed IM type is adopted and in the coasting mode the winding of the rated speed is short-circuited; at the moment of current leakage to the ground, induction-dynamic braking of the IM is carried out. Studies of electrical safety parameters about all of the above conditions were carried out by the method of computer simulation.

Results. Studies have established the effect of reducing the amount of electricity q in the earth leakage resistance when short-circuiting the stator winding of a two-speed IM, or an additional stator winding of a single-speed IM in the run-down mode of the motor, in the absence of the specified control action. At the same time, the functional insufficiency of this protective effect was revealed. In particular, a wide range of lengths and cross-sections of cables of the KGESH brand has been established in which the permissible electrical safety parameter ($q=50 \text{ mA}$) of a two-speed engine.

Conclusion. It has been established that the factor of enhancing the effect of suppressing the back EMF of the AM is the combination of the formation of an increased current loop in the stator circuit with the process of deceleration of the rotor, which corresponds to the effect of induction-dynamic

braking of the AM, and makes it possible to limit the amount of electricity in the earth leakage circuit to safe ($q \leq 50 \text{ mA}\cdot\text{s}$) values for all cross-sections of KGESh cables up to 300 m long.

Keywords: *electrotechnical complex, asynchronous motor, coasting mode, reverse EMF, protective de-energizing, parameter control, modelling.*

Сведения об авторах

К.Н. Маренич

SPIN-код: 8632-8425
ORCID: 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 18.02.2021
© К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка, 2021
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалев