

УДК 621.316.925:681.3

**Сергей Владимирович Деркачев**

Донецкий национальный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, Украина, Донецк, e-mail: sergey\_derkachev@mail.ru

## Микропроцессорная защита группы электродвигателей от обрыва фаз в сети внешнего электроснабжения

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Возникновение несимметричных режимов в сети внешнего электроснабжения в процессе эксплуатации может быть вызвано различными причинами: обрывом фазы вследствие сильного ветра или оледенения воздушных линий электропередач; перегоранием проводов вследствие возникновения устойчивых коротких замыканий; неполнофазными автоматическими повторными включениями. В случае возникновения неполнофазного режима в сети внешнего электроснабжения синхронные и асинхронные электродвигатели начинают получать питание по двум оставшимся в работе фазам, что приводит к появлению тока обратной последовательности, который представляет наибольшую опасность для электродвигателей, поскольку он вызывает их дополнительный нагрев и, как следствие, преждевременный выход из строя. В связи с этим актуальным является исследование переходных процессов в двигательной нагрузке при возникновении неполнофазного режима в сети внешнего электроснабжения и разработка микропроцессорной защиты группы электродвигателей от обрыва фазы в питающей сети.

**Материалы и методы.** Исследование проведено методом компьютерного моделирования, основанном на математических моделях элементов электрической сети, записанных с помощью систем дифференциальных уравнений в трехфазной системе координат.

**Результаты.** Установлены закономерности протекания переходных процессов в синхронных и асинхронных электродвигателях при возникновении неполнофазных режимов в сети как внутреннего, так и внешнего электроснабжения, которые позволили разработать алгоритм работы микропроцессорной защиты группы электродвигателей от обрыва фаз в сети внешнего электроснабжения. Предложенный алгоритм основан на контроле уровня тока обратной последовательности и отсутствии тока в одной из фаз на вводе секции.

**Выводы.** Предложенный алгоритм защиты группы электродвигателей от неполнофазных режимов в сети внешнего электроснабжения обладает высокой селективностью, а его использование в качестве пускового органа устройства быстродействующего автоматического включения резерва позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение предприятий с непрерывным технологическим процессом.

**Ключевые слова:** синхронные электродвигатели, асинхронные электродвигатели, пусковой орган микропроцессорных устройств, неполнофазный режим работы электродвигателей, обрыв фазы, надежность электроснабжения, микропроцессорная защита электродвигателей

**Sergey Vladimirovich Derkachev**

Donetsk National Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Stations Department, Ukraine, Donetsk, e-mail: sergey\_derkachev@mail.ru

## Microprocessor protection of electrical motors against phase failure in external power supply network

### Abstract

**Background.** Nonsymmetrical modes in the external power supply network during operation can be caused by several reasons: phase failure due to strong wind or glaciation of overhead power lines, wire burnout due to persistent short circuits, open phase automatic reclosing. In case of open phase condition, the external power supply network, synchronous and asynchronous electric motors are powered along the two phases that are in operation. It leads to the negative sequence current, which poses maximum danger for electric motors, since it causes additional heating and, as a result, premature damage. Therefore, the currently important goal of the project is to study transient processes of the motor load when an open phase mode oc-

curs in the external power supply network and to design microprocessor protection of electrical motors against phase failure in the supply network.

**Materials and methods.** To achieve the goal, a computer simulation method is used, based on mathematical models of the elements of electrical network presented as the systems of differential equations in a three-phase coordinate system.

**Results.** The regularities of the flow of transient processes in synchronous and asynchronous electric motors in case of open phase modes in both the internal and external power supply networks have been established. Thus, it is possible to develop an algorithm of the operation of microprocessor protection of electrical motors against phase failure in the external power supply network. The proposed algorithm is based on monitoring the negative sequence current level and the absence of current in one of the phases at the section input.

**Conclusions.** The obtained results show that the proposed algorithm to protect electrical motors against open phase modes in an external power supply network has a high selectivity. Its use as a starting element of the fast-acting automatic transfer switch device allows you to provide uninterrupted power supply for enterprises with a continuous technological process.

**Key words:** synchronous motors, induction electrical motors, starting element of microprocessor device, open phase mode of motors, phase failure, reliability of power supply, microprocessor protection of motor

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2022.1.046-053

**Введение.** Синхронные и асинхронные электродвигатели большой единичной мощности и напряжением статора 6–10 кВ, используемые на промышленных предприятиях в качестве привода основных механизмов, как правило, получают питание от сборных шин главной понизительной подстанции как по воздушным, так и по кабельным линиям. В свою очередь, главная понизительная подстанция представляет собой двухтрансформаторную подстанцию, которая получает питание по воздушным высоковольтным линиям от двух независимых источников питания.

Переходным процессам в синхронных и асинхронных электродвигателях в режимах пуска и самозапуска, переключения на резервный источник питания вследствие потери питания от основного источника и возникновения коротких замыканий в сети внешнего электроснабжения посвящено достаточно большое количество работ [1–6]. Тем не менее вопросам поведения двигательной нагрузки в неполнофазных режимах, возникающих в сети внешнего электроснабжения, уделяется недостаточно внимания. Неполнофазный режим в системе внешнего электроснабжения в процессе эксплуатации может быть вызван обрывом фаз воздушных высоковольтных линий вследствие сильного ветра или оледенения проводов, перегоранием проводов при возникновении коротких замыканий, а также неполнофазным автоматическим повторным включением.

При возникновении неполнофазного режима в сети внешнего электроснабжения синхронные и асинхронные электродвигатели, подключенные к одной секции шин,

начинают получать питание по двум оставшимся в работе фазам. Возникающие при этом токи обратной последовательности представляют наибольшую опасность, поскольку вызывают дополнительный нагрев электродвигателей. Работа синхронных и асинхронных электродвигателей в таком режиме является недопустимой, так как из-за возникающего перегрева возможен их преждевременный выход из строя.

Таким образом, актуальным является исследование переходных процессов в двигательной нагрузке при возникновении неполнофазного режима в сети внешнего электроснабжения и разработка микропроцессорной защиты группы электродвигателей от обрыва фазы в питающей сети.

**Методы исследования.** Для исследования переходных процессов в двигательной нагрузке при возникновении неполнофазных режимов работы в сети как внешнего, так и внутреннего электроснабжения воспользуемся математической моделью участка сети с двигательной нагрузкой в виде синхронных и асинхронных электродвигателей, получающих питание от высоковольтной воздушной линии через понижающий трансформатор (рис. 1). Для повышения точности расчетов в несимметричных режимах математические модели элементов, входящих в состав модели (синхронный и асинхронный двигатели, трансформатор, кабельные и воздушные линии), представлены в виде систем дифференциальных уравнений, записанных в трехфазной системе координат. Подробное описание математической модели участка сети с двигательной нагрузкой приведено в

[7], а расчет параметров схем замещения представлен в [8, 9]. В качестве двигательной нагрузки для моделирования были выбраны синхронный двигатель мощностью 3150 кВт и напряжением статора 6 кВ и два асинхронных двигателя мощностью 1500 и 240 кВт и напряжением статора 6 кВ.

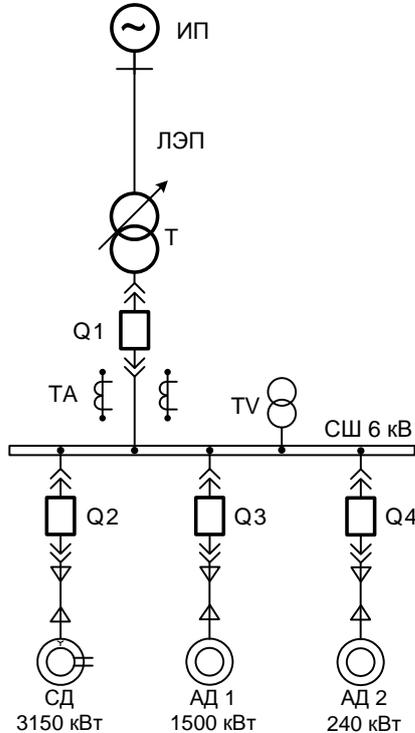


Рис. 1. Участок сети с двигательной нагрузкой

Поскольку в реальных схемах электроснабжения измерительные трансформаторы тока устанавливаются, как правило, в фазе А и фазе С, то для определения токов прямой и обратной последовательностей в используемой математической модели сначала необходимо определить ортогональные составляющие токов на основе токов фазы А и фазы С по следующим формулам:

$$i_{\alpha} = i_a; \quad (1)$$

$$i_{\beta} = \frac{-i_a - 2i_c}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

где  $i_a$  и  $i_c$  – мгновенные значения токов фазы А и фазы С.

Токи прямой и обратной последовательностей на основе ортогональных составляющих  $i_{\alpha}$  и  $i_{\beta}$  могут быть определены по формулам:

$$I_{\text{пп}} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(i_{\alpha} + \frac{d}{dt} i_{\beta}\right)^2 + \left(\frac{d}{dt} i_{\alpha} - i_{\beta}\right)^2}; \quad (3)$$

$$I_{\text{оп}} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(i_{\alpha} - \frac{d}{dt} i_{\beta}\right)^2 + \left(\frac{d}{dt} i_{\alpha} + i_{\beta}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $\frac{d}{dt} i_{\alpha}$  и  $\frac{d}{dt} i_{\beta}$  – производные ортогональных составляющих токов.

Производные ортогональных составляющих токов  $i_{\alpha}$  и  $i_{\beta}$  рассчитываются на основе нескольких выборок по формулам:

$$\frac{d}{dt} i_{\alpha} = \frac{1}{2\omega h} (3i_{\alpha} - 4i_{\alpha n-1} + i_{\alpha n-2}); \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} i_{\beta} = \frac{1}{2\omega h} (3i_{\beta} - 4i_{\beta n-1} + i_{\beta n-2}), \quad (6)$$

где  $h$  – шаг дискретизации;  $\omega$  – частота измеряемого сигнала.

**Результаты исследования.** На рис. 2 показаны результаты компьютерного моделирования несимметричного режима работы двигательной нагрузки, вызванного обрывом фазы В в сети внешнего электроснабжения.

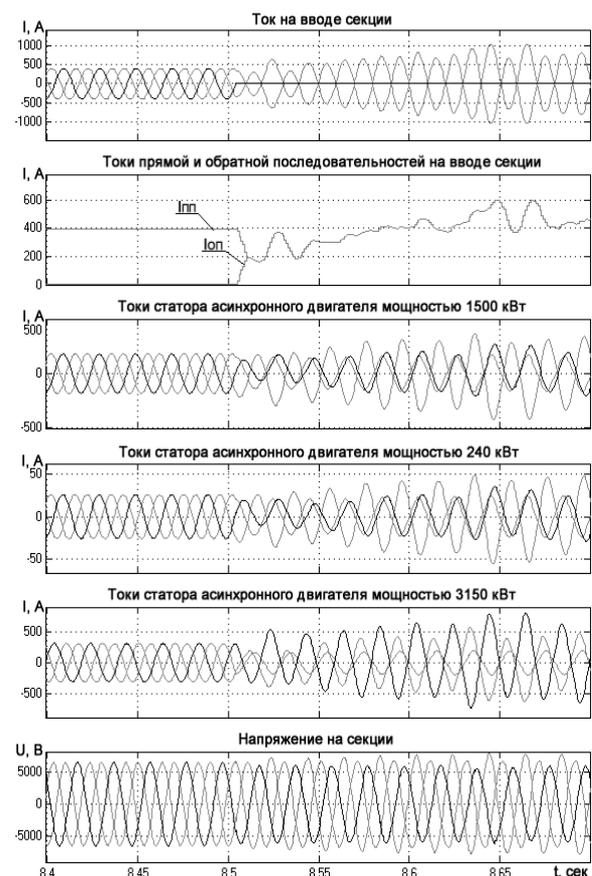


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования неполнофазного режима работы электродвигателей при обрыве фазы в сети внешнего электроснабжения

Анализ полученных результатов (рис. 2) показывает, что при возникновении несимметричного режима в сети внешнего электроснабжения

троснабжения, вызванного отключением фазы В, на вводе секции возникает ток обратной последовательности, равный току прямой последовательности. В этом режиме несимметрия по току составляет 100 %, а по напряжению – 17,9 %, при этом двигательная нагрузка продолжает потребление электроэнергии по двум оставшимся фазам и на общих шинах начинает генерировать ток в третьей фазе. Работа электродвигателей в таком режиме является недопустимой, поскольку возникший ток обратной последовательности значительно превышает допустимый уровень тока обратной последовательности, что приводит к перегреву обмоток электродвигателей и, как следствие, к их отключению собственными тепловыми защитами или полному их выходу из строя, что является недопустимым для предприятий с непрерывным технологическим процессом.

На рис. 3 показаны результаты компьютерного моделирования несимметричного режима работы двигательной нагрузки, вызванного обрывом фазы В в сети внутреннего электроснабжения.

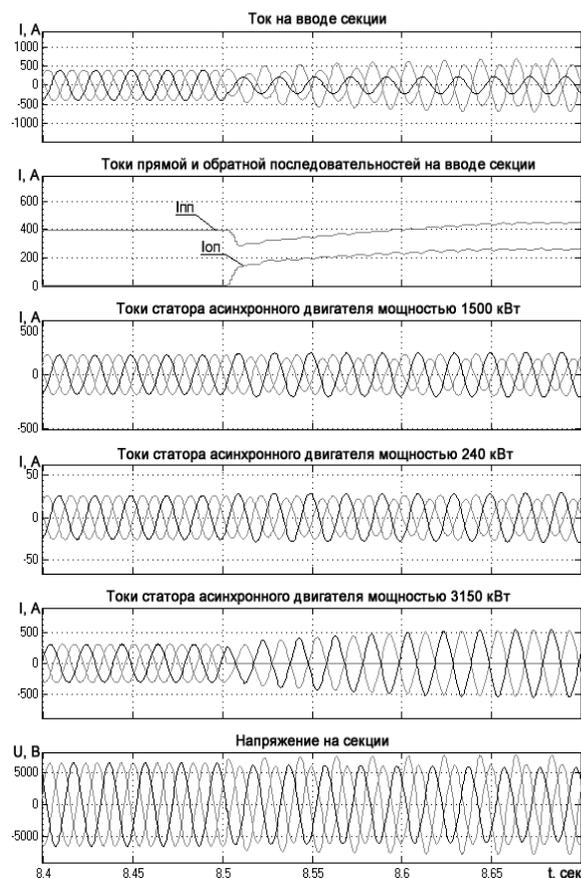


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования неполнофазного режима работы электродвигателей при обрыве фазы в сети внутреннего электроснабжения

Анализ полученных результатов (рис. 3) показывает, что при возникновении несимметричного режима, вызванного обрывом фазы в сети внутреннего электроснабжения на вводе секции, питающей двигательную нагрузку, также возникает ток обратной последовательности, величина которого значительно меньше, чем при возникновении несимметричного режима в сети внешнего электроснабжения. Величина несимметрии по току в этом режиме составляет 57,5 %, а по напряжению – 7,4 %. В этом случае все электродвигатели испытывают перегрузку током обратной последовательности, однако отключение электродвигателя, в цепи питания которого произошло нарушение, будет выполнено собственными защитами, а остальные электродвигатели при этом останутся в работе.

Поскольку при возникновении несимметричного режима работы в сети внешнего электроснабжения наблюдается отсутствие тока в одной из фаз на вводе секции (рис. 2), а при возникновении несимметричного режима в сети внутреннего электроснабжения на вводе секции ток присутствует во всех трех фазах (рис. 3), то предлагается выполнить защиту группы электродвигателей на основе контроля уровня тока обратной последовательности на вводе секции, дополненную контролем отсутствия тока в одной из фаз на вводе секции для обеспечения селективного действия защиты. Предложенная защита должна действовать на отключение вводного выключателя секции и на включение выключателя резервного источника питания.

На рис. 4 приведена структурная схема предлагаемой защиты группы электродвигателей от обрыва фазы в сети внешнего электроснабжения.

Анализ представленной на рис. 4 структурной схемы показывает, что предлагаемая защита состоит из следующих блоков: блок обработки входных сигналов; блок определения производных ортогональных составляющих тока; блок определения амплитудных значений фазных токов; блок определения тока обратной последовательности и блок логической обработки сигналов.

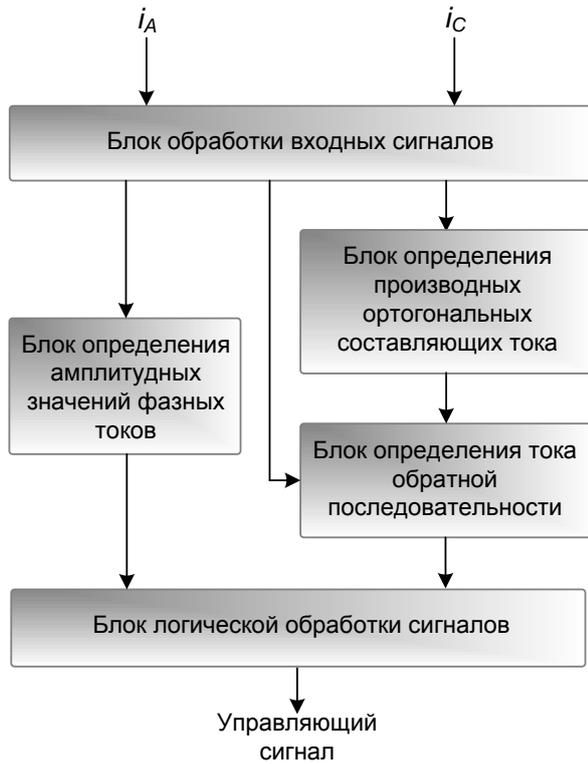


Рис. 4. Структурная схема защиты группы электродвигателей при обрыве фазы в сети внешнего электроснабжения

Блок обработки входных сигналов предназначен для фильтрации сигналов, поступающих от измерительных трансформаторов тока, и математического определения тока в третьей фазе. Фильтрация измеряемого сигнала выполняется путем интегрального усреднения мгновенных дискретных значений измеряемого сигнала на основе пяти выборок. Подробно алгоритм фильтрации измеряемого сигнала описан в [10], а на рис. 5 приведена структурная схема алгоритма фильтрации входного сигнала тока.

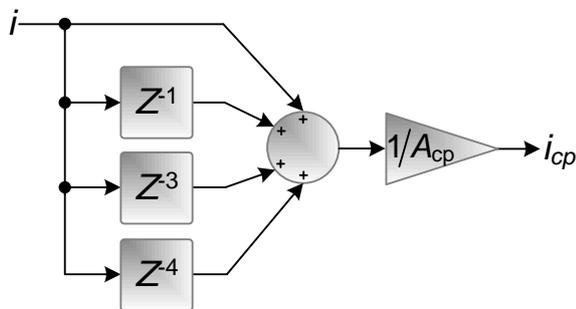


Рис. 5. Структурная схема алгоритма фильтрации входных сигналов тока

Коэффициент усреднения  $A_{cp}$  (рис. 5) представляет собой отношение суммы всех

выборок измеряемого сигнала к центральной выборке. Выходными сигналами блока обработки входных сигналов являются усредненные значения токов трех фаз на вводе секции.

Для определения амплитудных значений измеряемых токов на вводе секции используется блок определения амплитудных значений фазных токов, структурная схема которого показана на рис. 6.

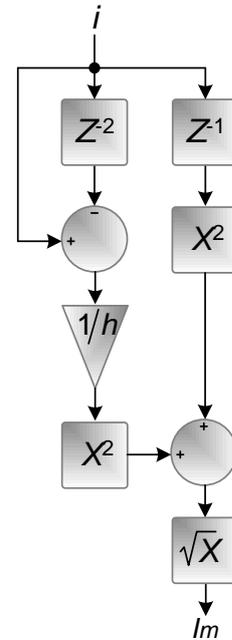


Рис. 6. Структурная схема блока определения амплитудных значений фазных токов на примере одной фазы

Входными сигналами блока определения амплитудных значений фазных токов являются усредненные значения токов на вводе секции, а выходными сигналами блока являются амплитудные значения фазных токов на вводе секции. Показанный на рис. 6 коэффициент  $h$  равен шагу дискретизации измеряемых сигналов тока на вводе секции.

Блок определения ортогональных составляющих тока, показанный на рис. 4, реализует формулы (1), (2), (5) и (6). В качестве входных сигналов блок использует усредненные значения токов на вводе секции. Выходными сигналами блока являются значения ортогональных составляющих тока обратной последовательности, которые в свою очередь являются входными сигналами блока определения тока обратной последовательности. Работа блока определения тока обратной последовательности основана на реализации формулы (4).

На рис. 7 приведена структурная схема блока логической обработки сигналов, который предназначен для обеспечения селективного действия предлагаемой защиты группы двигателей.

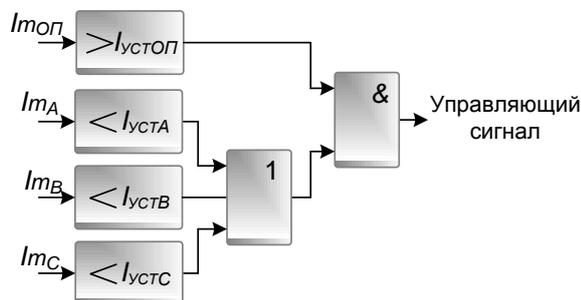


Рис. 7. Структурная схема блока логической обработки сигналов

Входными сигналами блока являются амплитудные значения фазных токов и значение тока обратной последовательности на вводе секции. Работа блока логической обработки сигналов заключается в следующем: в режиме реального времени блок контролирует значение величины тока обратной последовательности на вводе секции и наличие тока во всех трех фазах. При возникновении несимметричного режима работы в сети внешнего электропитания, обусловленного различными причинами, в случае превышения уровнем тока обратной последовательности на вводе секции заданной уставки и отсутствия тока в одной из трех фаз на вводе секции на выходе блока формируется сигнал на отключение вводного выключателя секции и включение выключателя резервного источника питания.

В случае возникновения несимметричного режима в сети внутреннего электропитания защита не подаст сигнал на отключение вводного выключателя секции, поскольку на вводе секции в этом случае ток будет присутствовать во всех трех фазах.

Поскольку обеспечение бесперебойного питания при нарушении нормального режима электропитания является основным требованием для промышленных предприятий с непрерывным технологическим процессом, то предложенная защита группы электродвигателей может быть использована в качестве дополнительного пускового органа микропроцессорных устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР).

На рис. 8 приведены результаты компьютерного моделирования переключения на резервный источник питания двигательной нагрузки при возникновении несимметричного режима работы.

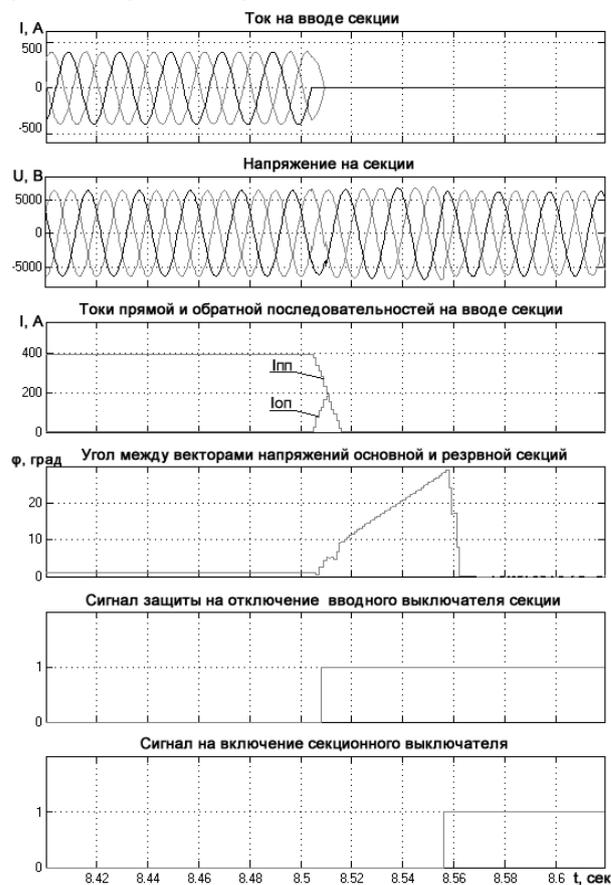


Рис. 8. Результаты компьютерного моделирования переключения на резервный источник питания при возникновении несимметричного режима работы.

Анализ полученных результатов (рис. 8) показывает, что при возникновении несимметричного режима в сети внешнего электропитания в момент времени 8,5 с через 0,01 с была подана команда на отключение вводного выключателя секции, питающей двигательную нагрузку. Резервное питание было подано в момент времени 8,555 с. Таким образом, время перерыва питания двигательной нагрузки составило 0,055 с, а включение резервного источника питания произошло с углом рассогласования между векторами напряжения основного и резервного источников питания, равным 30 градусам, что не превышает предельно допустимого значения, равного 40 градусам [7].

Таким образом, использование предлагаемой защиты группы электродвигателей от обрыва фаз в сети внешнего электропитания в качестве пускового органа

БАВР позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение промышленных предприятий со сложным непрерывным технологическим процессом при возникновении несимметричных режимов в питающей сети.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Метод математического моделирования позволяет установить особенности протекания переходных процессов в синхронных и асинхронных электродвигателях при возникновении несимметричных режимов в сети как внутреннего, так и внешнего электроснабжения.

2. Использование предложенного алгоритма защиты группы электродвигателей от неполнофазных режимов в сети внешнего электроснабжения в качестве пускового органа устройства БАВР позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей на предприятиях с непрерывным технологическим процессом.

#### Список литературы

1. **Слодарж М.И.** Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.
2. **Носов К.Б., Дворак Н.М.** Способы и средства самозапуска электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 144 с.
3. **Голоднов Ю.М.** Самозапуск электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
4. **Беляев А.В.** Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными электродвигателями большой мощности. – М.: Энергопресс, 2004. – 80 с.
5. **Киреева Э., Пупин В., Гумиров Д.** Современные устройства быстродействующего АВР // Главный энергетик. – 2005. – № 11. – С. 23–25.
6. **Быстродействующее** устройство АВР с однократным принципом определения нарушения нормального электроснабжения потребителей / В.А. Жуков, В.М. Пупин, С.И. Гамазин и др. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 9. – С. 11–18.
7. **Сивокобыленко В.Ф., Деркачев С.В.** Анализ переходных процессов в двигательной нагрузке при переключениях питания на резервный источник // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 5. – С. 69–74. DOI:10.17213/0136-3360-2016-5-69-74.
8. **Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К.** Определение параметров схем замещения и характеристик синхронных турбодвигателей //

Научные труды ДонНТУ. Сер. Электротехника и энергетика. – 2014. – № 1(16). – С. 189–193.

9. **Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н., Деркачев С.В.** Определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей // Электричество. – 2014. – № 10. – С. 38–44.

10. **Сивокобыленко В.Ф., Деркачев С.В.** Особенности измерительных органов цифровых устройств быстродействующего автоматического включения резерва для систем электроснабжения с двигательной нагрузкой // Электромеханические и энергосберегающие системы. Ежеквартальный научно-производственный журнал. – 2015. – № 3(31). – С. 126–133.

#### References

1. Slodarz, M.I. *Rezhimy raboty, reley'naya zashchita i avtomatika sinkhronnykh elektrodvigateley* [Operation Modes, Relay Protection and Automation of Synchronous Motors]. Moscow: Energiya, 1977. 216 p.
2. Nosov, K.B., Dvorak, N.M. *Sposoby i sredstva samozapuska elektrodvigateley* [Means and Methods of Self-Starting Electric Motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 144 p.
3. Golodnov, Yu.M. *Samozapusk elektrodvigateley* [Self-Starting Electric Motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 136 p.
4. Belyaev, A.V. *Protivoavariynoe upravlenie v uzлах nagruzki s sinkhronnymi elektrodvigateleyami bol'shoy moshchnosti* [Emergency Control in Loads Nodes with High Power Synchronous Motors]. Moscow: Energopress, 2004. 80 p.
5. Kireeva, E., Pupin, V., Gumirov, D. *Sovremennye ustroystva bystrodeystvuyushchego AVR* [Modern devices for high-speed ATS]. *Glavnyy energetik*, 2005, no. 11, pp. 23–25.
6. Zhukov, V.A., Pupin, V.M., Gamazin, S.I., Kulikov, A.I., Tsyruk, S.A. *Bystrodeystvuyushchee ustroystvo AVR s odnokratnym printsipom opredeleniya narusheniya normal'nogo elektrosnabzheniya potrebiteley* [Fast-Acting ATS Device with a One-time Principle for Determining a Violation of Normal Power Supply of Consumers]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2011, no. 9, pp. 11–18.
7. Sivokobylenko, V.F., Derkachev, S.V. *Analiz perekhodnykh protsessov v dvigatel'noy nagruzke pri pereklyucheniakh pitaniya na rezervnyy istochnik* [Analysis of Transients Processes in Motor Load at Switching on to Reserve Power Supply Source]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2016, no. 5, pp. 69–74. DOI: 10.17213/0136-3360-2016-5-69-74.
8. Sivokobylenko, V.F., Lebedev, V.K. *Opredelenie parametrov skhem zameshcheniya i kharakteristik sinkhronnykh turbodvigateley* [Determination of Parameters of Equivalent

Circuits and Characteristics of Synchronous Turbo Motors]. *Nauchnye trudy DonNTU. Seriya: Elektrotehnika i energetika*, 2014, no. 1(16), pp. 189–193.

9. Sivokobylenko, V.F., Tkachenko, S.N., Derkachev, S.V. Opredelenie parametrov skhem zameshcheniya i kharakteristik asinkhronnykh dvigateley [Determination of Parameters of Equivalent Circuits and Characteristics of Induction Motors]. *Elektrichestvo*, 2014, no. 10, pp. 38–44.

10. Sivokobylenko, V.F., Derkachev, S.V. Osobennosti izmeritel'nykh organov tsifrovyykh ustroystv bystrodeystvuyushchego avtomaticheskogo vklyucheniya rezerva dlya sistem elektrosnabzheniya s dvigatel'noy nagruzkoy [Measurement Features of Digital Device of Fast-acting automatic transfer switch for Power Supply Systems with Motor Load]. *Elektromekhanicheskie i energosberegayushchie sistemy. Ezhekvartal'nyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal*, 2015, no. 3(31), pp. 126–133.