

УДК 621.316.925:681.3

РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОДАЧИ РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ ПРИ НАРУШЕНИЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**В. Ф. Сивокобыленко**Донецкий национальный технический университет
пл. Шибанкова, 2, г. Красноармейск, 85300, Украина. E-mail: svf1934@gmail.com**С. В. Деркачев**Донецкий национальный технический университет
ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина. E-mail: sergey_derkachev@mail.ru

Разработаны алгоритмы цифровых измерительных органов векторов фазных токов, напряжений и углов сдвига между ними, в которых ортогональные составляющие комплексов получают по дискретным мгновенным значениям измеряемых величин и их производным. Повышение быстродействия и качества фильтрации измерительных сигналов достигнуто за счет интегрального усреднения мгновенных значений на скользящем интервале наблюдения длительностью менее полупериода промышленной частоты. Результаты исследований опытного образца устройства, выполненного на базе микроконтроллера STM32F4Discovery, на лабораторной установке показали, что оно позволяет выявить потерю питания по любой причине за время не более 10 мс и обеспечивает синфазную подачу резервного питания на двигательную нагрузку. Применение устройства в действующих электроустановках позволит повысить надежность электроснабжения ответственных потребителей.

Ключевые слова: микропроцессор, быстродействующее автоматическое включение резерва, быстрое переключение, синфазная подача напряжения.

РОЗРОБКА МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПОДАЧІ РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ ПРИ ПОРУШЕННЯХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ СПОЖИВАЧІВ**В. Ф. Сивокобыленко**Донецький національний технічний університет
пл. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, 85300, Україна. E-mail: svf1934@gmail.com**С. В. Деркачов**Донецький національний технічний університет
вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83001, Україна. E-mail: sergey_derkachev@mail.ru

Розроблено алгоритми цифрових вимірювальних органів векторів фазних струмів, напруг і кутів зсуву між ними, в яких ортогональні складові комплексів отримують по дискретним миттєвим значенням вимірюваних величин і їх похідних. Підвищення швидкодії й якості фільтрації вимірювальних сигналів досягнуто за рахунок інтегрального усереднення миттєвих значень на ковзному інтервалі спостереження тривалістю менш півперіоду промислової частоти. Результати досліджень дослідного взірця, виконаного на базі мікроконтролера STM32F4Discovery, на лабораторній установці показали, що він дозволяє виявити втрату живлення з будь-якої причини за час не більше 10 мс і забезпечує синфазну подачу резервного живлення на навантаження, що складається з двигунів. Застосування пристрою в діючих електроустановках дозволить підвищити надійність електропостачання відповідальних споживачів.

Ключові слова: мікропроцесор, швидкодіюче автоматичне включення резерву, швидке переключення, синфазна подача напруги.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Кратковременные перерывы электроснабжения (даже на время 0,2–0,5 с) узлов нагрузки электрических систем с крупными асинхронными и синхронными двигателями приводят к нарушению их устойчивой работы, неуспешному самозапуску и, как следствие, к расстройству сложного технологического процесса ответственных потребителей. Одним из наиболее эффективных способов сохранения устойчивой работы двигательной нагрузки при кратковременных нарушениях электроснабжения является быстрая подача резервного питания. Это можно осуществить с помощью устройств быстродействующего автоматического включения резервного питания (БАВР) в сочетании с вакуумными выключателями с временем включения порядка 0,02 с. При этом перерыв питания двигательной нагрузки не должен превышать 0,1–0,2 с, а угловой сдвиг векторов остаточного

напряжения на двигателях и подаваемого резервного не должен превышать порядка 45–60 градусов.

Применение современной микропроцессорной элементной базы позволяет создавать быстродействующие устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики электрических систем. Поэтому вопросы разработки и дальнейшего совершенствования устройств БАВР являются актуальными. Недостатком существующих устройств БАВР [1, 2] является необходимость использования напряжения здоровой секции для фиксации появления аварийного режима во внешней сети электроснабжения, поскольку оно может изменяться с частотой, отличной от частоты напряжения источника потерявшего питания и может привести к неправильной работе устройства. В современных устройствах БАВР должны быть предусмотрены следующие режимы переключения на резервный источник: быстрое переключение (при угловом сдвиге векторов напряжений менее 60 градусов),

переключення при першому співпадінні фаз (синфазне переключення при углі сдвіга 360 градусів), переключення по остаточному напругенню, не перевищує 0,5 номінального, і переключення с видержкою часу [3–6].

Цілью даної роботи являється розробка алгоритма і оптимального зразка мікропроцесорного пристрою БАПР для вузлів енергосистем з синхронними і асинхронними двигачами, дозволяючого виявити порушення електропостачання за часом, не більше 5 мс, і забезпечити дальнішу синфазну подачу резервного живлення з урахуванням часу дії силових комутаційних пристроїв.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ІССЛЕДОВАНИЙ.

Для досягнення поставленої цілі повинні бути розв'язані наступні задачі:

- розроблені алгоритми пускових пристроїв для ідентифікації появи аварійного режиму зовнішньої мережі електропостачання, викликаного виникненням короткого замикання;
- розроблені алгоритми пристроїв синфазного

переключення живлення на резервний джерело при відключенні живлення робочого;

- реалізація алгоритмів пристрою БАПР на мікропроцесорній елементній базі і дослідження їх режимів роботи на фізичній моделі.

Пристрій БАПР будемо розглядати применливо до типової системи електропостачання, що містить дві секції з живлячим вводом в кожній і міжсекційною зв'язкою для подачі резервного живлення при втраті робочого на одній з них.

Структурна схема розробленого пристрою БАПР представлена на рис. 1,а, його реалізація здійснюється на базі мікроконтролера STM32F4Discovery [7], в якій використовуються 12-бітні аналогово-цифрові перетворювачі з частотою дискретизації 1 кГц. Для гальванічної розв'язки напруг і струмів живлячих входів використані проміжні трансформатори напруги і датчики струму типу LA-55р фірми Lem.

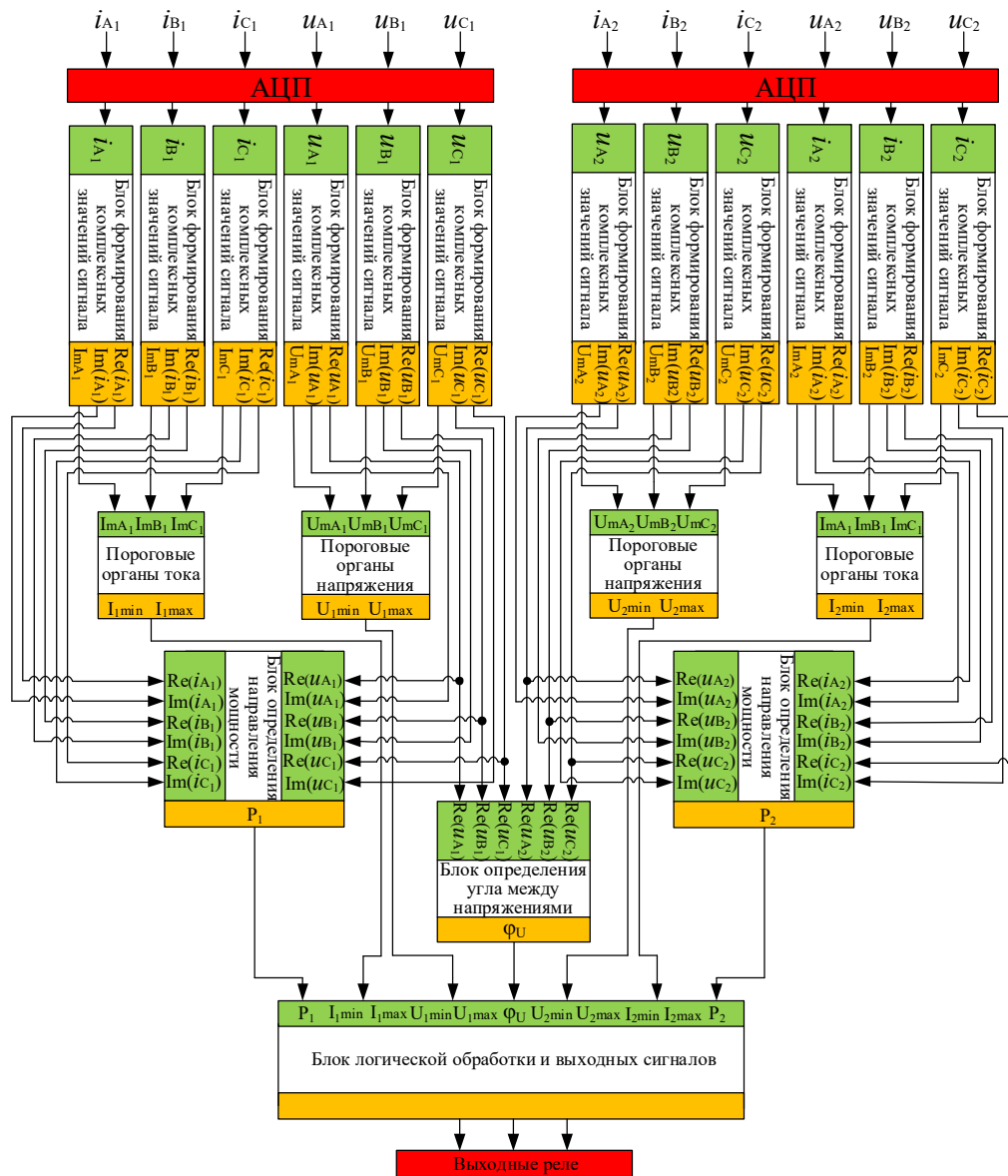


Рисунок 1 – Структурна схема пристрою БАПР

Работа блоков формирования комплексных значений входных сигналов (токов, напряжений) основана на алгоритмах, подробно описанных в [8, 9], и заключается в использовании усредненных значений входных сигналов и их центральных производных. Такой подход обеспечивает фильтрацию входных сигналов, т.к., согласно [9], позволяет в переходных режимах ускорить затухание апериодических составляющих сигналов и уменьшить влияние случайных помех. Как показано на рис. 1, в структурной схеме содержится 12 таких блоков, входными сигналами которых являются сигналы от АЦП, а выходными – дискретные мгновенные значения реальной и мнимой частей комплексного числа и его амплитуда. Структурная схема блока формирования комплексных значений сигнала приведена на рис. 2. Усреднение производится по пяти дискретным значениям, поступающим с шагом $h = 0,001c$. Значение коэффициента усреднения A при этом, согласно [8], равно 3,52, производная входного сигнала определяется по трем мгновенным дискретным значениям сигналов, а мгновенное значение амплитуды – как корень квадратный из суммы квадратов.

Для реализации быстрого и синфазного переключения на резервный источник питания в схему работы устройства БАВР введен блок определения косинуса угла между векторами напряжений основной и резервной секций, расчет которого выполняется по выражению, в котором используются полученные ранее (рис. 2) мгновенные значения реальной и мнимой составляющих:

$$\cos(\varphi_u) = \frac{0,5(u_{xa1}u_{xa2} + u_{xb1}u_{xb2} + u_{xc1}u_{xc2})}{\sqrt{(u_{xa1}^2 + u_{xb1}^2 + u_{xc1}^2)(u_{xa2}^2 + u_{xb2}^2 + u_{xc2}^2)}} + \frac{0,5(u_{ya1}u_{ya2} + u_{yb1}u_{yb2} + u_{yc1}u_{yc2})}{\sqrt{(u_{ya1}^2 + u_{yb1}^2 + u_{yc1}^2)(u_{ya2}^2 + u_{yb2}^2 + u_{yc2}^2)}}.$$

Структурная схема блока для определения первой составляющей в этом выражении показана на рис. 3. В качестве входных величин на данный косинусный блок подаются усреднённые значения измеряемых фазных напряжений, а его пороговые значения на выходе используются при формировании команд на включение и отключение соответствующих выключателей.

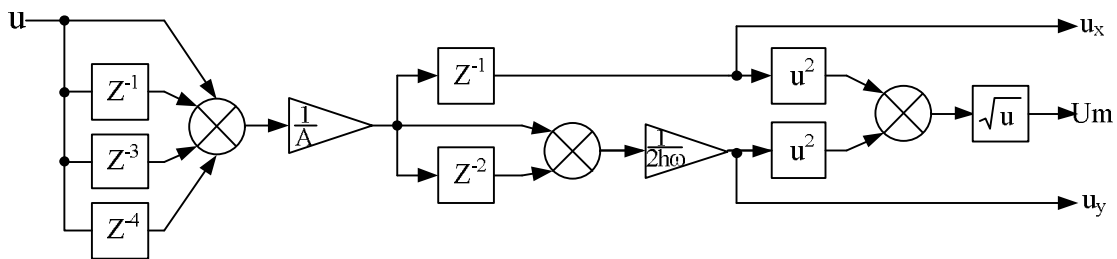


Рисунок 2 – Структурная схема блока определения комплексных значений сигнала

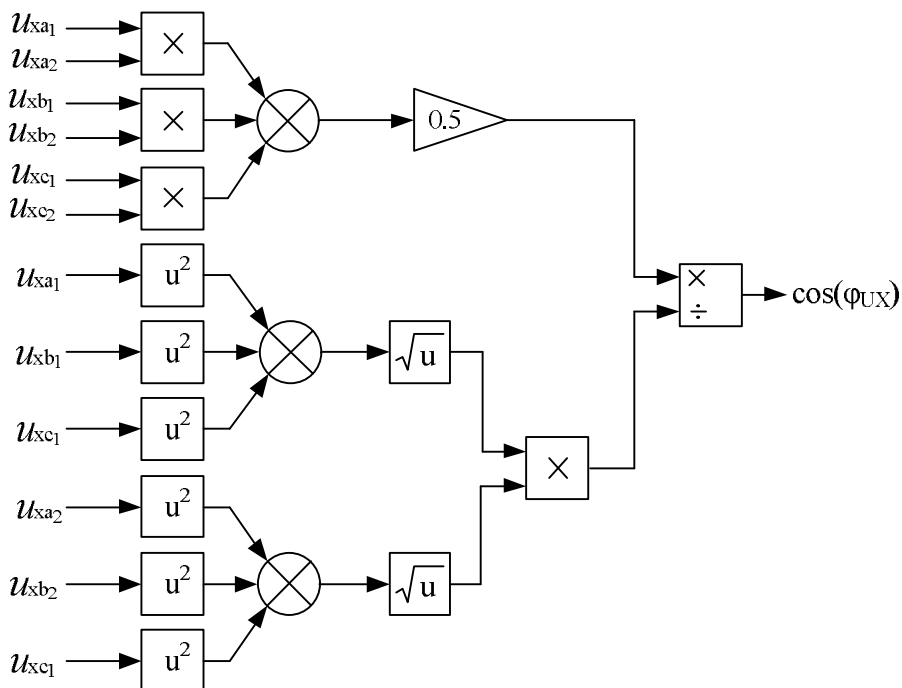


Рисунок 3 – Структурная схема блока определения косинуса угла между напряжениями секций

В качестве пускового органа, реагирующего на появление аварийного режима во внешней сети электроснабжения в данной схеме (рис. 1) используется реле направления мощности, принцип построения которого приведен в [9]. Для его пофазной реализации используется выражение, в котором с помощью угла α выбирается требуемая зона работы реле:

$$P_{a1} = (u_{xa1}i_{xa1} + u_{ya1}i_{ya1}) \cos(\alpha) + (u_{ya1}i_{xa1} - u_{xa1}i_{ya1}) \sin(\alpha).$$

При значении α , равном 0, реле контролирует направление активной мощности, при α , равном 1, – реактивной, а при других значениях α получаем реле направления мощности смешанного типа. В данной работе значение угла принято 60 градусов.

Структурная схема блока определения направления мощности фазы А на первом вводе показана на

рис. 4. В ней входными сигналами являются комплексные составляющие токов и напряжений фазы А.

Для осуществления логики работы устройства БАВР в его состав входят блоки пороговых значений токов и напряжений, в которых происходит сравнение амплитудных значений токов и напряжений с заданными минимальной и максимальной уставками.

На рис. 5 показана структурная схема блока логической логики и выходных сигналов.

В данном блоке происходит логическая непрерывная обработка всех рассчитанных сигналов и на ее основе принимается решение об отключении вводных выключателей секций в случае внешних коротких замыканий, а также выбор способа переключения на резервный источник при потере питания по иной причине.

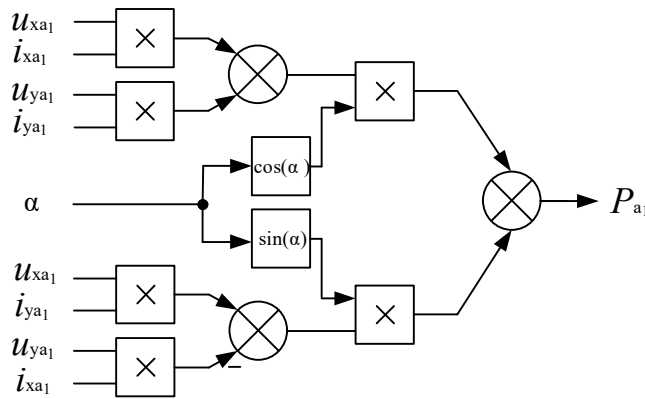


Рисунок 4 – Структурная схема блока определения направления мощности

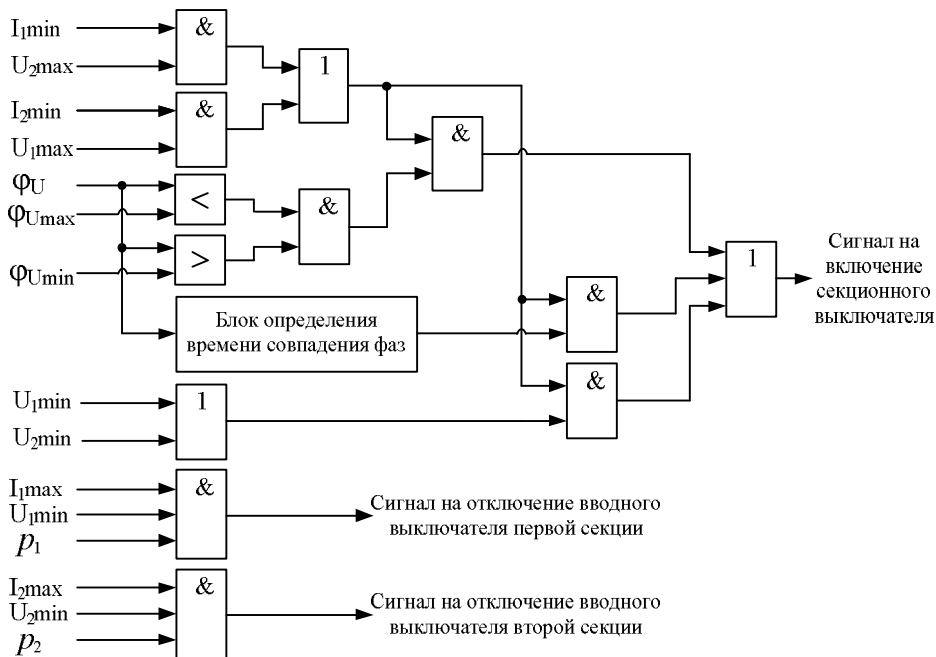
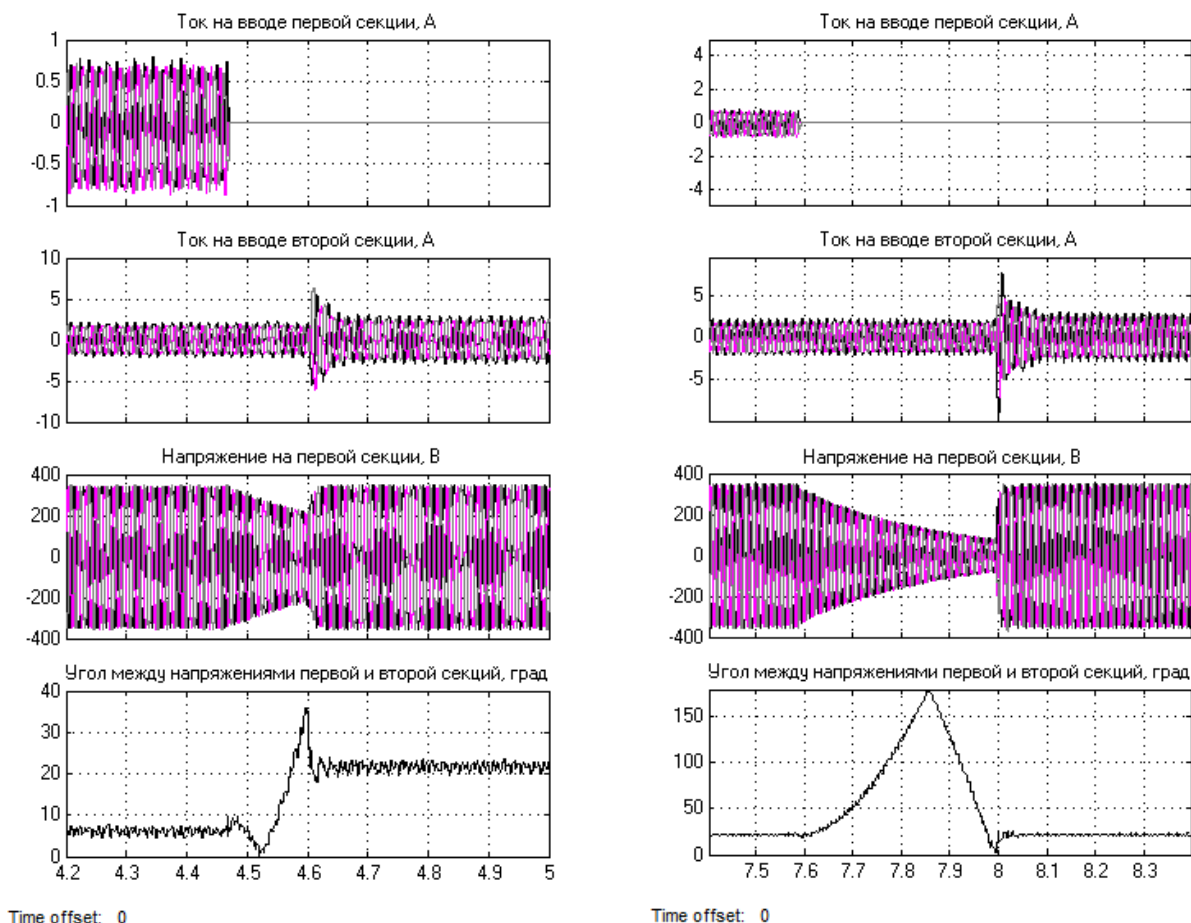


Рисунок 5 – Структура блока логики и выходных сигналов

Реализация предложенной структурной схемы была выполнена с использованием математического пакета MATLAB и его библиотек SimPowerSystem [10] и Waijung [11]. Проверка работы была выполнена на лабораторном стенде, моделирующем двухсек-

ционную подстанцию с двигательной нагрузкой в виде асинхронных двигателей напряжением 0,4 кВ. Результаты проверки устройства при переключении на резервный источник питания по алгоритму быстрого переключения приведены на рис. 6,а.



а) б)
Рисунок 6 – Осциллограммы напряжений первой и второй секций и угол между ними при быстром переключении на резервный источник питания

Из рис. 6,а видно, что переключение на резервный источник по алгоритму быстрого переключения произошло до достижения углом между напряжениями первой и второй секции значения 40 градусов, что является допустимым. Длительность перерыва составила порядка 0,1 с.

На рис. 6,б показаны результаты работы устройства БАВР при потере питания без короткого замыкания. При этом синфазная подача резервного питания осуществлена при угле расхождения векторов напряжений 0 градусов (первое совпадение фаз).

Из осциллограмм, приведенных на рис. 6,б видно, что синфазное переключение на резервный источник питания было успешным, а длительность перерыва питания составила 0,4 с.

Осциллограммы, приведенные на рис. 7, показывают действие БАВР при нарушении электроснаб-

жения из-за короткого замыкания в питающей сети. Переключение на резервный источник питания было успешным, а длительность перерыва питания составила 0,25 с. Характер изменения токов и напряжений первой и второй секций, органа направления мощности и угла между напряжениями секций свидетельствует о том, что после отключения короткого замыкания со стороны питающей сети было выполнено переключение на резервный источник питания по алгоритму быстрого переключения.

Согласование действия БАВР с защитами питающего трансформатора не требуется, т.к. при направлении мощности в сторону шин 6 кВ работа БАВР блокируется, а разрешается только при обратном потоке мощности и при токе подпитки от двигателей, превышающем значение тока короткого замыкания в конце питающей линии.

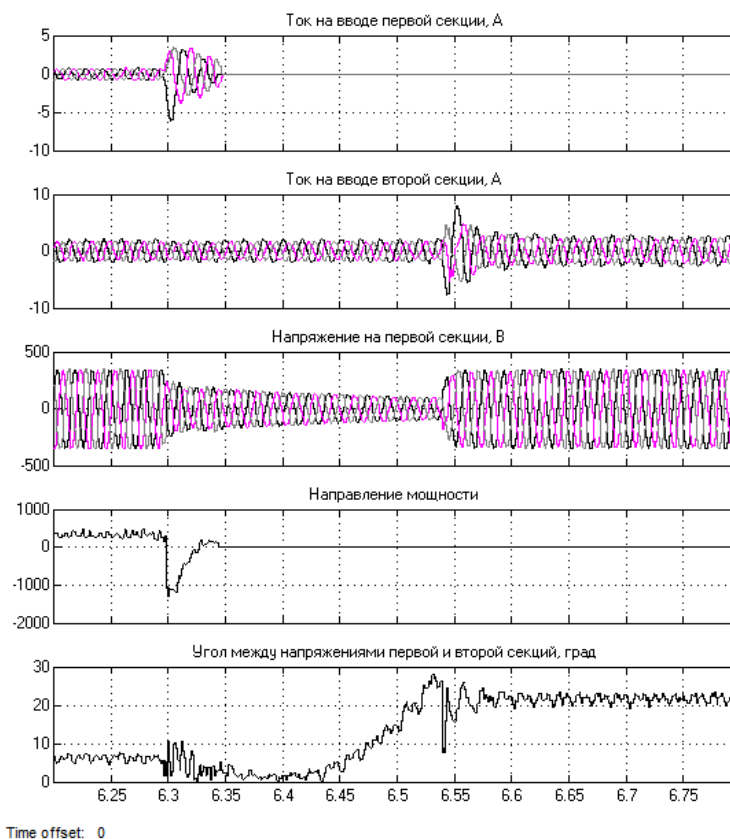


Рисунок 7 – Осциллограммы токов и напряжений первой и второй секций, органа направления мощности и угла между напряжениями секций при внешнем коротком замыкании

ВЫВОДЫ. 1. Разработано микропроцессорное устройство БАВР для переключения питания на резервный источник питания в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой. Приведены алгоритмы блоков формирования комплексных дискретных значений токов, напряжений, мощности и углов между векторами токов и напряжений.

2. Результатами исследований опытного образца БАВР подтверждена достоверность научных положений, принятых за основу при его разработке, и показано его соответствие требуемым характеристикам. Устройство может быть рекомендовано для внедрения в опытную эксплуатацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков В.А., Пупин В.М., Гамазин С.И. и др. Быстродействующее устройство АВР с однократным принципом определения нарушения нормального электроснабжения потребителей // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – Вып. 9. – С. 11–18.
2. Киреева Э., Пупин В., Гумиров Д. Современные устройства быстродействующего АВР // Главный энергетик. – 2005. – Вып. 11. – С. 23–25.
3. Thakur M., Kasztenny B., Earpen J. Implementation of automatic bus transfer scheme on multi-function microprocessor based relays // Proc. of 57th Annual

Conference for Protective Relay Engineers. – Texas A&M University, Texas, Mar. 30–Apr. 1, 2004.

4. Hunswadkar G., Viju N.R. “Considerations and Methods for an Effective Fast Bus Transfer System” Tutorials and 5th international Conference Power System Protection and Automation 6–9 December 2010, New Delhi, India.

5. Gardell J., Fredrickson Ch. D., Chairman V. “J9 Working Group Report to the Rotating Machinery Protection Subcommittee of the IEEE-Power System Relay Committee”, May 2012.

6. Tarlochan S.S., Balamourougan V., Thakur M., Kasztenny B. A Modern Automatic Bus Transfer Scheme // International Journal of Control, Automation and Systems. – Iss. 3/2005 (2). – PP. 376–385.

7. Официальный сайт STMicroelectronics [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.st.com/web/en/home.html>.

8. Сивокобыленко В.Ф., Деркачев С.В. Метод эквивалентных синусоид для цифровых измерительных органов релейной защиты // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». – 2015. – Вип. 1 (28). – С. 215–221.

9. Сивокобыленко В.Ф., Деркачев С.В. Особенности измерительных органов цифровых устройств быстродействующего автоматического включения резерва для систем электроснабжения с двигательной нагрузкой // Електромеханічні і

енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3/2015 (31). – С. 126–133.

10. Черных И.В. Simulink: среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. к.т.н. В.Г. Подемкина. – М.: Диалог–МИФИ, 2003. – 496 с.

11. Официальный сайт Waijung Blockset [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://waijung.aimagin.com/index.htm?software_installation.htm.

DEVELOPMENT OF MICROPROCESSOR DEVICE FOR EMERGENCY POWER SUPPLYING AT POWER FAILURE OF RESPONSIBLE CONSUMERS

V. Sivokobilenko

Donetsk National Technical University

pl. Shibankova, 2, Krasnoarmeisk, 85300, Ukraine. E-mail: svf1934@gmail.com

S. Derkachev

Donetsk National Technical University

ul. Artema, 58, Donetsk, 83001, Ukraine. E-mail: sergey_derkachev@mail.ru

Purpose. The purpose is creating of the algorithm and the test sample of microprocessor fast-acting automatic transfer switch device for power system nodes with synchronous and asynchronous motors, which allows to reveal power supply interruption in less than 5 ms and provide further-phase supply of backup power based on the lifetime of power switching devices. **Methodology.** Analyzed forming methods of starting devices of fast-acting automatic transfer switch. Developed block diagrams and chosen the device realization way based on STM32F4 Discovery microcontroller. Researched operation of test sample device on physical model. **Results.** Developed and implemented algorithms for digital measurement devices of the phase currents and voltages vectors and shift angles between them, starting devices algorithms for occurrence identifying of emergency operation in the external power supply network caused by the short circuit and algorithms of synchronous switching on the reserve power supply source at power loss from main supply source. The research results of a test sample device in a laboratory, simulating a two-section substation with motor load as asynchronous motors with voltage of 0.4 kV, have shown that it reveals a power loss power for any reason in less than 10 ms and provides in-phase supply of backup power to the motor load. **Originality.** Achieved filtering speed and quality increasing of measurement signals by the integral averaging instantaneous values on a sliding observation interval, which is shorter than the half-period of industrial frequency. **Practical value.** The device application in functioning electrical installations can improve power supply reliability of responsible consumers.

Key words: microprocessor, fast-acting automatic transfer switch, fast switching, synchronous switching of voltage supply.

REFERENCES

1. Gukov, V., Pupin V., Gamazin S. et al. (2011), "Fast-acting ATS devices with a single principle determining disruption of the normal electricity supply to consumers", *Electrooborudovanie: Eksploatatsia i remont*, Vol. 9, pp. 11–18. (in Russian)

2. Kireeva, E., Pupin, V. and Gumirov, D. (2005), "Modern devices of fast-acting ATS", *Glavnyy energeticheskyy zhurnal*, Vol. 11, pp. 23–25. (in Russian)

3. Thakur, M., Kasztenny, B. and Eapen, J. (2004), "Implementation of automatic bus transfer scheme on multi-function microprocessor based relays," *Proc. of 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, Texas A&M University, Texas, Mar. 30–Apr. 1, 2004.

4. Hunswadkar, G. and Viju, N.R. (2010), "Considerations and Methods for an Effective Fast Bus Transfer System", *Tutorials and 5th International Conference Power System Protection and Automation 6–9 December 2010*, New Delhi, India.

5. Gardell, J., Chairman, D.F. and Chairman, V. (2012), "J9 Working Group Report to the Rotating Machinery Protection Subcommittee of the IEEE-Power System Relay Committee", May 2012.

6. Tarlochan, S.S., Balamourougan, V., Thakur, M. and Kasztenny, B. (2005), "A Modern Automatic Bus Transfer Scheme", *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 3, no. 2, pp. 376–385, June 2005.

7. The official website STMicroelectronics, available at: <http://www.st.com/web/en/home.html> (accessed March 30, 2016). (in Russian)

8. Syvokobylenko, V.F. and Derkachev, S.V. (2015), Equivalent sinusoids method for digital measuring devices of relay protection, *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya "Obchislyvalna tehnika ta avtomatizatsiya"*. Vol. 1, no. 28, pp. 215–221. (in Russian)

9. Syvokobylenko, V.F. and Derkachev, S.V. (2015), Measurement features of digital device of fast-acting ats for power supply systems with motor load, *Elektromehanični i energozberigayuchi sistemy*, Vol. 3, no. 31, pp. 126–133. (in Russian)

10. Chernyh, I.V. (2003), Simulink: sreda sozdaniya inzhenernyih prilozheniy [Simulink: environment for creation of engineering application], Dialog–MIFI, Moscow. (in Russian)

11. The official website Waijung Blockset, available at: http://waijung.aimagin.com/index.htm?software_installation.htm (accessed March 30, 2016). (in Russian)

Стаття надійшла 11.02.2016.