

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-115-124>

УДК 621.316.925

Использование аварийных составляющих в качестве входных информационных сигналов микропроцессорных защит

И. В. Новаш¹⁾, В. Ю. Румянцев¹⁾, Е. А. Дерюгина¹⁾, Е. В. Булойчик¹⁾,
М. С. Конохов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Предложена методика формирования аварийных составляющих тока и напряжения линии электропередачи методом вычислительного эксперимента в системе динамического моделирования (СДМ) MATLAB-Simulink с целью использования их в качестве входных информационных сигналов дополнительных ступеней микропроцессорных защит с повышенной чувствительностью. Аварийные составляющие тока и напряжения определяются с использованием ортогональных составляющих. Аварийную составляющую тока короткого замыкания (КЗ) определяют как разность между векторами (синусоидами) основной гармоники тока КЗ и тока предшествующего режима, если действующее значение этой разности превышает некоторую заранее установленную величину. Аналогичным образом определяют и аварийную составляющую напряжения с учетом того, что в аварийном режиме напряжение в месте установки защиты не возрастает, а снижается. Разработан компьютерный программный комплекс (КПК) в СДМ MATLAB-Simulink для исследования функциональных свойств микропроцессорной защиты с использованием аварийных составляющих токов и напряжений фаз линии электропередачи 6(10)–35 кВ. Приведены результаты формирования аварийных составляющих моделями цифровых измерительных органов тока и напряжения защиты, подтверждающие работоспособность разработанного программного комплекса. Разработан КПК для расчета аварийных составляющих токов и напряжений линии электропередачи 6(10)–35 кВ с помощью ортогональных составляющих на основе математической модели узла питания защищаемой линии. Приведены результаты расчетов аварийных составляющих, подтверждающие работоспособность разработанного программного комплекса, и проведено сопоставление результатов расчета аварийных составляющих, получаемых моделированием в СДМ MATLAB-Simulink и с помощью КПК на основе математической модели.

Ключевые слова: микропроцессорная защита, органы измерения тока и напряжения, ортогональные составляющие, цифровые фильтры, аварийные составляющие, дискретное преобразование Фурье, MATLAB, Simulink

Для цитирования: Использование аварийных составляющих в качестве входных информационных сигналов микропроцессорных защит / И. В. Новаш [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 2. С. 115–124. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-115-124>

Адрес для переписки

Новаш Иван Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 326-89-51
novashiv@tut.by

Address for correspondence

Novash I. V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 326-89-51
novashiv@tut.by

The Use of Emergency Components as Input Information Signals for Microprocessor Protection

I. V. Novash¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, A. A. Dziaruhina¹⁾, E. V. Bulovichik¹⁾,
M. S. Konakhau¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Abstract. A technique is proposed for the formation of emergency components of current and voltage of a power transmission line by a computational experiment in the MATLAB-Simulink dynamic simulating system (DSS) in order to use them as input information signals of additional stages of microprocessor protections with increased sensitivity. The emergency components of current and voltage are determined using orthogonal components. The emergency component of the short-circuit current is defined as the difference between the vectors (sinusoids) of the main harmonic of the short-circuit current and the current of the previous mode, if the effective value of this difference exceeds some predetermined value. Similarly, the emergency component of the voltage is determined, taking into account the fact that in emergency mode, the voltage at the place of installation of protection does not increase, but decreases. A computer software package (CSP) has been developed in the MATLAB-Simulink DSS to study the functional properties of microprocessor protection using emergency components of currents and phase voltages of a power transmission line of 6(10)–35 kV. The results of the formation of emergency components by models of digital measuring bodies of current and voltage protection are presented, confirming the operability of the developed software package. A CSP has been developed for calculating emergency components of currents and voltages of a power transmission line of 6(10)–35 kV using orthogonal components based on a mathematical model of the power supply unit of the protected line. The results of calculations of emergency components are presented, confirming the operability of the developed software package; a comparison of the results of calculating emergency components obtained by modeling in the MATLAB-Simulink DSS and using a CSP based on a mathematical model is also carried out.

Keywords: microprocessor protection, current and voltage measuring devices, orthogonal components, digital filters, emergency components, discrete Fourier transform, MATLAB, Simulink

For citation: Novash I. V., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A., Bulovichik E. V., Konakhau M. S. (2024) The Use of Emergency Components as Input Information Signals for Microprocessor Protection. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 115–124. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-115-124> (in Russian)

Введение

В настоящее время повсеместно в распределительных сетях 6(10)–35 кВ применяются микропроцессорные токовые защиты (МПТЗ) [1]. В новых разрабатываемых МПТЗ также сохраняется ступенчатый (канальный) принцип с 2–3 ступенями выдержки времени. Первые 1–2 ступени типовых защит – быстродействующие, в большинстве разработок – токовая отсечка мгновенного действия и токовая отсечка с небольшой выдержкой времени (0,3–0,5 с). Последняя ступень с относительно большой выдержкой времени – защита, отстроенная от нормальных рабочих режимов, – может быть максимальной токовой защитой с изменяющейся уставкой.

Одно из возможных направлений повышения чувствительности защит распределительных сетей 6(10)–35 кВ – введение дополнительных ступеней повышенной чувствительности [2]. Повышение чувствительности защиты осуществляется переходом к другому типу, по своему принципу исполнения обладающему более высокой чувствительностью.

Дополнительные ступени могут выполняться в виде токовой защиты, реагирующей на аварийные составляющие тока. При использовании дополнительной ступени в виде дистанционной защиты (ДЗ) она может реагировать на аварийные составляющие тока и напряжения, на аварийные составляющие входных сопротивлений защищаемой линии.

Токовая защита, реагирующая на аварийные составляющие токов фаз, представляется наиболее пригодной для указанных целей вследствие отсутствия необходимости использования цепей напряжения, возможности использования той же входной информации, что и для основных ступеней защиты.

Основная часть.

Аварийные составляющие

Аварийная составляющая входного сигнала – это составляющая сигнала в месте установки защиты, обусловленная наличием короткого замыкания (КЗ) в цепи защищаемого объекта. Аварийная составляющая тока – доля тока в цепи защищаемого объекта, по величине равная току в ветви КЗ. Аварийная составляющая напряжения – доля напряжения в месте установки защиты, обусловленная падением напряжения от протекания тока КЗ в элементах цепи от места КЗ до места установки защиты.

Можно отметить положительные свойства аварийных составляющих:

- они связаны только с КЗ и отсутствуют в нагрузочных режимах;
- появляются при всех режимах КЗ, в том числе симметричных.

Входные сигналы РЗ – токи и напряжения, подводимые к измерительным органам, в общем случае несинусоидальные из-за наличия апериодической составляющей и высших гармоник. В этом случае расчетными интегральными параметрами являются действующие значения и фазы основной гармоники входных сигналов.

Для определения информационных параметров контролируемых величин, в том числе и аварийных составляющих, в устройствах РЗ широко используются ортогональные составляющие (ОС) входных токов и напряжений. Формирование ОС указанных сигналов основывается на применении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [3–5].

Аварийную составляющую тока КЗ $i_{ав}$ определяют как разность между векторами (синусоидами) основной гармоники тока КЗ i_k и тока предшествующего режима $i_{пр}$. Аналогичным образом определяют и аварийную

составляющую напряжения с учетом того, что в аварийном режиме напряжение в месте установки защиты не возрастает, а снижается.

Разность между двумя синусоидальными сигналами тока i_k , $i_{пр}$ одной и той же частоты, но с другой амплитудой и фазой может быть представлена:

$$\begin{aligned} i_{m\text{ ав}} &= I_{m\text{ к}} \sin(\omega t + \psi_{\text{к}}) - I_{m\text{ пр}} \sin(\omega t + \psi_{\text{пр}}) = \\ &= (I_{sn\text{ к}} - I_{sn\text{ пр}}) \cos(\omega t) + (I_{cs\text{ к}} - I_{cs\text{ пр}}) \sin(\omega t) = I_{m\text{ ав}} \sin(\omega t + \psi_{\text{ав}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $I_{sn\text{ к}}$, $I_{cs\text{ к}}$ – ортогональные составляющие основной гармоники сигнала режима КЗ; $I_{sn\text{ пр}}$, $I_{cs\text{ пр}}$ – то же основной гармоники сигнала предшествующего режима.

Действующее значение и фаза основной гармоники аварийной составляющей сигнала тока также может быть определена через ортогональные составляющие:

$$\begin{aligned} I_{\text{ав}} &= I_{m\text{ ав}} / \sqrt{2}, \text{ где } I_{m\text{ ав}} = \sqrt{(I_{sn\text{ ав}} - I_{sn\text{ пр}})^2 + (I_{cs\text{ ав}} - I_{cs\text{ пр}})^2}; \\ \psi_{\text{ав}} &= \arcsin\left(\frac{I_{sn\text{ к}} - I_{sn\text{ пр}}}{I_{m\text{ ав}}}\right) \text{ при } I_{cs\text{ к}} - I_{cs\text{ пр}} > 0; \\ \psi_{\text{ав}} &= \pi - \arcsin\left(\frac{I_{sn\text{ к}} - I_{sn\text{ пр}}}{I_{m\text{ ав}}}\right) \text{ при } I_{cs\text{ к}} - I_{cs\text{ пр}} < 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Для формирования аварийных составляющих тока и напряжения линии электропередачи разработана структурная модель узла питания линии [6] в СДМ MATLAB-Simulink [7, 8].

Модель узла питания линии электропередачи

Структурная модель узла питания линии в СДМ MATLAB-Simulink для формирования аварийных составляющих тока и напряжения приведена на рис. 1, где S1 – питающая система; CT1 – трехфазная группа трансформаторов тока [9, 10], сигнал вторичного тока фазы A, от которой подается на вход подсистемы, моделирующей измерительный орган тока МПТЗ DIGITAL EC.

Аварийная составляющая тока формируется в подсистеме DIGITAL EC с использованием блоков, моделирующих функции цифровых фильтров и формирователей ОС для получения аварийной составляющей. Аварийная составляющая напряжения фазы A формируется в подсистеме DIGITAL EC1 по тем же принципам, что и аварийная составляющая тока, с использованием сигнала напряжения фазы A, подаваемого на вход подсистемы от трехфазной группы трансформаторов тока CT1.

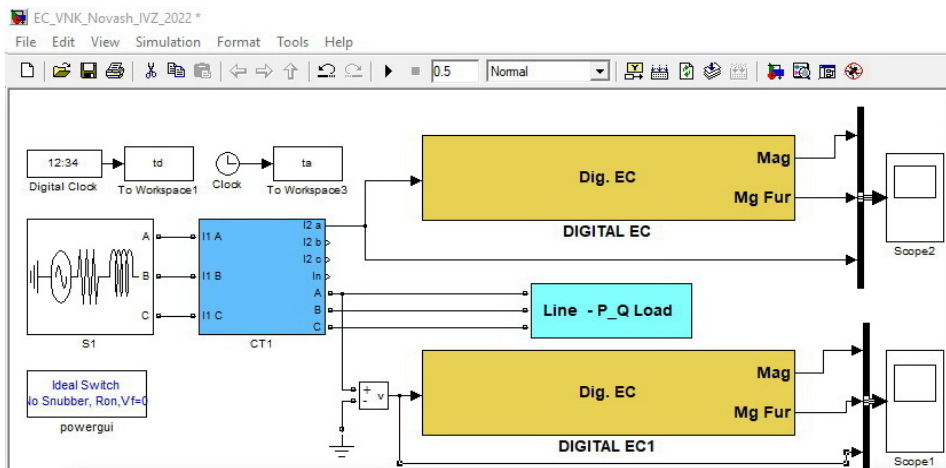


Рис. 1. Структура модели узла питания защищаемой линии

Fig. 1. The structure of the model of the power supply unit of the protected line

Формирование аварийных составляющих тока и напряжения

На рис. 2 представлена структура подсистем DIGITAL EC и DIGITAL EC1, в которых происходит формирование аварийных составляющих. Основу указанных подсистем (рис. 1) составляют блоки, в которых формируются ОС токов (напряжений) в режиме нагрузки (блок Delay signal) и при КЗ (блок Discrete Furier KZ).

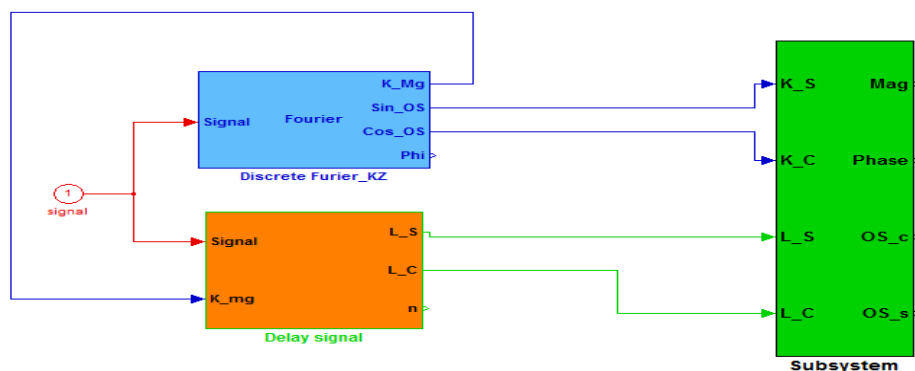


Рис. 2. Структура подсистем DIGITAL EC и DIGITAL EC1, моделирующих измерительные органы формирования аварийных составляющих тока и напряжения

Fig. 2. The structure of DIGITAL EC and DIGITAL EC 1 subsystems, which simulate measuring bodies for the formation of emergency components of current and voltage

В блоке Discrete Furier_KZ (рис. 2) выполняется моделирование контролируемого тока (напряжения) фазы *A* защищаемой линии в аварийном режиме на основе ОС для дискретного сигнала контролируемого тока (напряжения) линии фазы *A*. Расчет амплитуды контролируемого тока фазы *A* производится на основе теории ортогональных составляющих с применением ДПФ [1, 3].

Моменты возникновения аварийного режима КЗ и отключения КЗ, после которого восстанавливается рабочий послеаварийный режим, определяются с помощью функционального блока контроля возникновения аварийного режима, который входит в состав структур подсистем формирования аварийных составляющих и интегрируется в блок Delay signal. Структура блока Delay signal представлена на рис. 3.

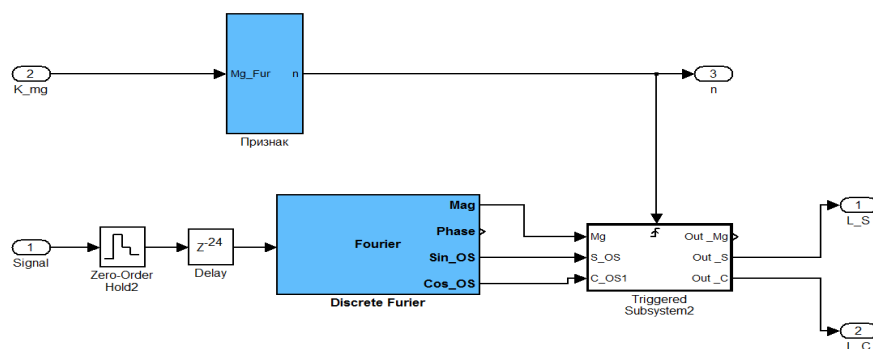


Рис. 3. Структура блока Delay signal

Fig. 3. The structure of Delay signal box

Методика определения момента возникновения КЗ и его отключения состоит в следующем [6]. Через заданные промежутки времени обычно кратные нескольким отсчетам (один отсчет принимается равным $\frac{0,02}{24}$ с), в блоке «Признак» вычисляется отношение:

$$\Delta = \frac{I_n}{I_{n-1}}. \quad (3)$$

При равенстве отношений в точках неизменного значения контролируемого тока $\left(\Delta = \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_3}{I_2} = 1 \right)$ сигнал, определяющий момент возникновения КЗ $t_{КЗ}$, не формируется. Таким образом, принимается, что при $\Delta = 1$ значение контролируемого тока не меняется, и такое состояние контролируемого тока соответствует доаварийному или послеаварийному установившемуся режиму.

Если $\Delta > 1$, то это будет являться признаком момента возникновения КЗ.

В этом случае в блоке «Признак» вырабатывается прямоугольный импульсный сигнал n , который определяет момент возникновения КЗ и подается на вход f блока Triggered Subsystem2. Этим импульсом запускается процесс запоминания предшествующего установившегося режима. Для формирования сигнала с такой же, как в момент КЗ фазой, контролируемый сигнал сдвигается на период (на 24 отсчета). В блоке Discrete Fourier определяются ОС предшествующего режима L_c , L_s , которые поступают в подсистему Subsystem (рис. 2) совместно с ОС режима КЗ – K_c и K_s . На основе указанных ОС в соответствии с выражениями (1) и (2) вычисляются амплитуда и фаза аварийных составляющих тока (напряжения).

На рис. 4 представлены графики сигналов контролируемого тока линии (сигнал 1), амплитуды контролируемого тока линии фазы *A* (сигнал 2), получаемый на основе дискретного преобразования Фурье и аварийной составляющей тока (сигнал 3). На рис. 5 представлены графики сигналов контролируемого напряжения фазы *A* линии (сигнал 1), амплитуды контролируемого напряжения линии фазы *A* (сигнал 2), получаемый на основе дискретного преобразования Фурье и аварийной составляющей напряжения (сигнал 3). Сигналы амплитуд тока и напряжения существуют в течение всего расчетного режима, а сигналы аварийных составляющих тока и напряжения формируются только на интервале времени аварийного режима КЗ.

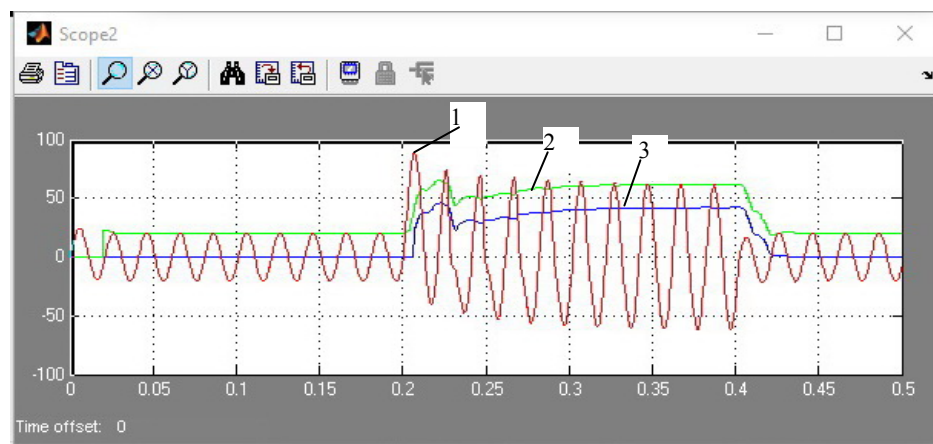


Рис. 4. Сигналы контролируемого тока линии и его аварийная составляющая:

1 – контролируемый токовый сигнал линии фазы *A*; 2 – сигнал амплитуды контролируемого тока линии фазы *A*; 3 – аварийная составляющая тока

Fig. 4. Signals of the controlled line current and its emergency component:

1 – controlled current signal of the phase *A* line; 2 – amplitude signal of the controlled current of the phase *A* line; 3 – emergency current component

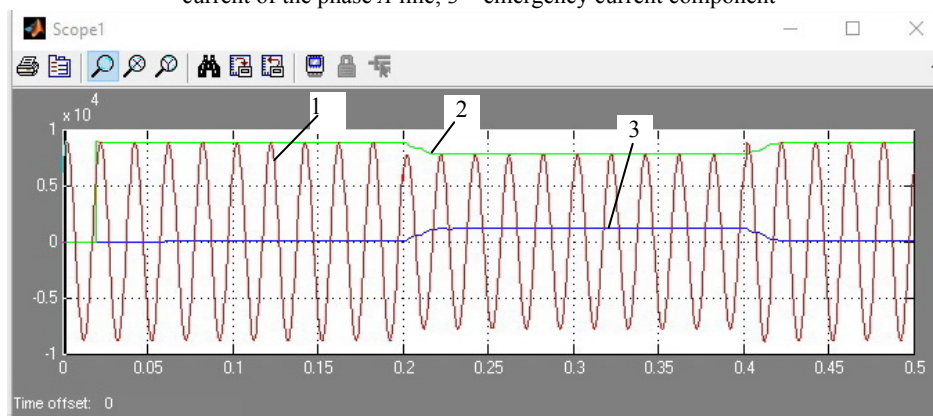


Рис. 5. Сигналы контролируемого напряжения линии и его аварийная составляющая:

1 – контролируемый сигнал напряжения линии фазы *A*; 2 – сигнал амплитуды контролируемого напряжения линии фазы *A*; 3 – аварийная составляющая напряжения

Fig. 5. Signals of the controlled line voltage and its emergency component:

1 – controlled voltage signal of the phase *A* line; 2 – amplitude signal of the controlled voltage of the phase *A* line; 3 – emergency voltage component

Компьютерный программный комплекс для расчета аварийных составляющих

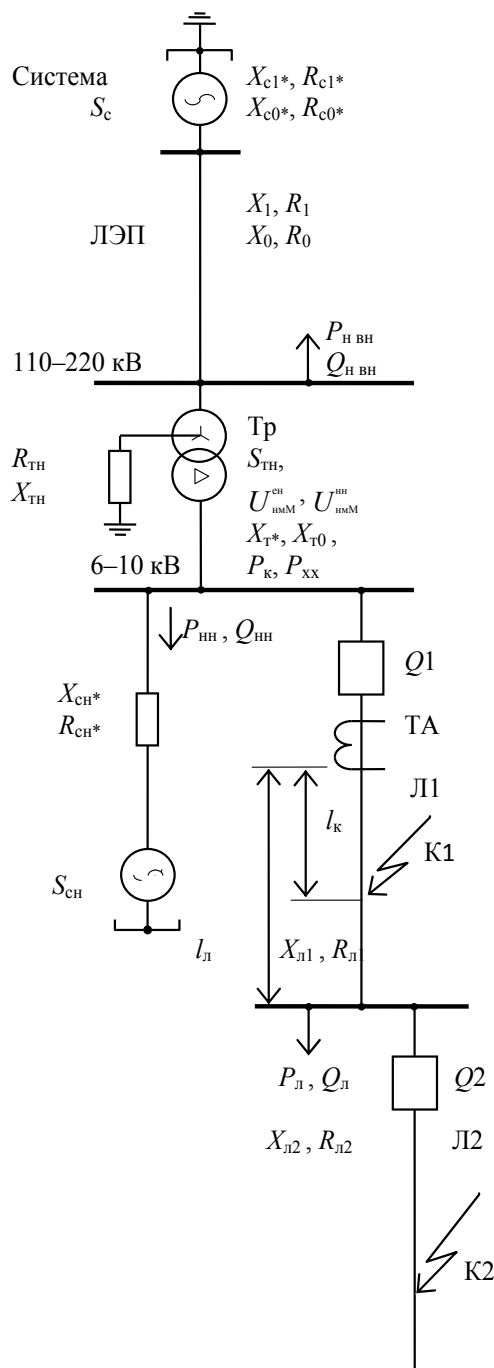


Рис. 6. Однолинейная электрическая схема узла электропитания линии

Fig. 6. Single-line electrical diagram of the power supply unit of the line

Для сопоставления результатов моделирования аварийных составляющих в СДМ MATLAB-Simulink был разработан КПК для расчета аварийных составляющих токов и напряжений линии электропередачи 6(10)–35 кВ с помощью ортогональных составляющих на основе математической модели узла питания защищаемой линии.

КПК последовательно во времени воспроизводит нормальный установившийся режим, предшествующий КЗ, переходный режим внезапного КЗ на линии, режим после отключения КЗ. Исходными данными для расчета являются параметры элементов расчетной схемы рис. 6, параметры режима, предшествующего КЗ, признак вида и места КЗ [6]. Результаты расчета – мгновенные и действующие значения токов в элементах расчетной схемы, напряжений на шинах ВН и НН и аварийных составляющих. Для сохранения результатов расчета используются внешние файлы. Для визуализации результатов расчета использовался математический пакет MathCad [11].

На рис. 7 приведены графики фазных токов линии при двухфазном замыкании фаз A и B . Графики аварийных составляющих токов линии при двухфазном КЗ на линии фаз A и B приведены на рис. 8.

Сопоставление результатов моделирования в СДМ MATLAB-Simulink и расчета аварийных составляющих с помощью КПК на основе математической модели узла электропитания линии подтверждают достоверность получаемых результатов.

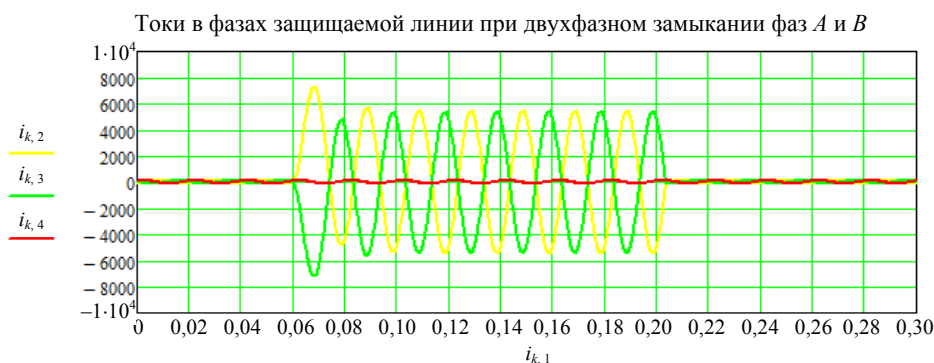


Рис. 7. Графики фазных токов линии при двухфазном замыкании фаз A и B

Fig. 7. Graphs of the phase currents of the line with two-phase closure of phases A and B

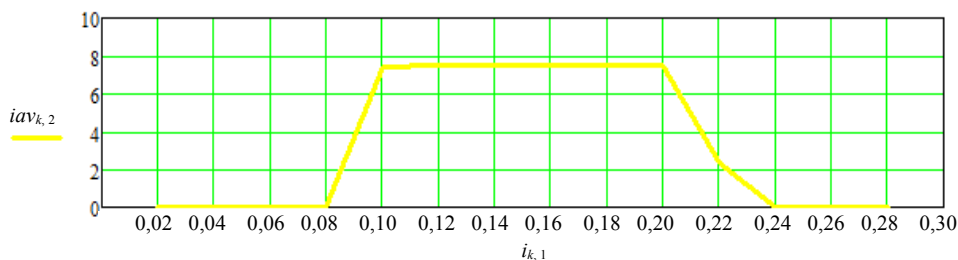


Рис. 8. Аварийная составляющая тока фазы A защищаемой линии

Fig. 8. Emergency component of phase A current of the protected line

ВЫВОДЫ

1. Разработана структурная модель узла питания линии электропередачи совместно с моделями измерительных органов тока и напряжения микропроцессорной защиты, использующей аварийные составляющие тока и напряжения в качестве входных информационных сигналов.
2. Проведены исследования методом вычислительного эксперимента режимов формирования аварийных составляющих при различных КЗ на защищаемой линии.
3. Разработан КПК для расчета аварийных составляющих тока и напряжения линии электропередачи на основе математической модели узла питания защищаемой линии.
4. Сопоставление результатов моделирования в СДМ MATLAB-Simulink и расчета аварийных составляющих тока с помощью КПК на основе математической модели узла питания линии электропередачи подтверждает достоверность получаемых результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк. Минск: УП «Технопринт», 2001. 133 с.
2. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
3. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417>.
4. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.

5. Динамические свойства алгоритма дистанционных измерений в цифровых органах сопротивления / Ф. А. Романюк [и др.] // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 5. С. 411–417. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-411-417>.
6. Разработка методик и средств вычислительного эксперимента для исследования новых функциональных свойств микропроцессорных защит: отчет о НИР (заключительный по ГБ 21-06/1) / БНТУ; рук. темы И. В. Новаш. Минск, 2023. 111 с. № ГР 20211675–2023.
7. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
8. SimPowerSystems. User's Guide. Version 5 [Electronic Resource]. The MathWorks, 2011. Mode of access: <https://all-guidesbox.com/manual/545991/matlab-simpowersystems-5-operation-user-s-manual-403.html>.
9. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ Энергетика. 2015. № 5. С. 23–38.
10. Romanyuk, F. Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MATLAB–Simulink / F. Romanyuk, I. Novash, Y. Rumiantsev, P. Węgierek // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). 2015. Vol. 91, No 11. С. 292–295. <https://doi.org/10.15199/48.2015.11.67>.
11. Макаров, Е. Г. Mathcad: учебный курс (+CD) / Е. Г. Макаров. СПб.: Питер, 2009. 384 с.

Поступила 16.11.2023

Подписана к печати 23.01.2024

Опубликована онлайн 29.03.2024

REFERENCES

1. Romanyuk F. A. (2001) *Information Support for Microprocessor Protection of Electrical Installations*. Minsk, Technoprint Publ. 133 (in Russian).
2. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
3. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417> (in Russian).
4. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412> (in Russian).
5. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Y., Novash I. V., Rumiantsev Y. V. (2023) Dynamic Properties of Remote Sensing Algorithm in Digital Resistance Elements. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (5), 411–417. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-411-417> (in Russian).
6. Novash I. V. (2023) *Development of Methods and Means of Computational Experiment for the Study of New Functional Properties of Microprocessor Protections: Research Work Report (the Final One on GB 21-06/1)*. State Registration Number 20211675. Minsk, BNTU. 111 (in Russian).
7. Chernykh I. V. (2011) *Simulation of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMC Press. 288 (in Russian).
8. SimPowerSystems. User's Guide. Version 5. The MathWorks, 2011. Available at: <https://all-guidesbox.com/manual/545991/matlab-simpowersystems-5-operation-user-s-manual-403.html>.
9. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) A Simplified Model of Three-Phase Bank of Current Transformers in the Dynamic Simulation System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 23–38 (in Russian).
10. Romanyuk F., Novash I., Rumiantsev Y., Węgierek P. (2015) Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MATLAB–Simulink. *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (11), 292–295. <https://doi.org/10.15199/48.2015.11.67>.
11. Makarov E. G. (2009) *Mathcad: Training Course (+CD)*. St. Petersburg, Peter Publ. 384 (in Russian).

Received: 16 November 2023

Accepted: 23 January 2024

Published online: 29 March 2024