

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-5-17>

УДК 621.316.925

Цифровые фильтры симметричных составляющих входных сигналов микропроцессорных защит электроустановок

Ф. А. Романюк¹⁾, В. Ю. Румянцев¹⁾, Ю. В. Румянцев¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. В микропроцессорных защитах применяются измерительные органы, реагирующие на отдельные симметричные составляющие сигналов или их комбинацию. Это позволяет выполнять соответствующие устройства защиты более чувствительными. Из всех разновидностей цифровых фильтров симметричных составляющих преимущественно используются фильтры обратной и нулевой последовательностей. Из известных алгоритмов их программной реализации целесообразно использовать фильтры, формирующие ортогональные составляющие требуемой последовательности из ортогональных составляющих фазных или междуфазных величин сигналов. В качестве формирователей последних применяются цифровые фильтры Фурье, отличающиеся инерционностью. По этой причине их переходные режимы сопровождаются возникновением динамической погрешности, которая может существенно влиять на функционирование фильтров симметричных составляющих, ухудшая их свойства. Значительное снижение указанного влияния может быть достигнуто за счет применения для выделения ортогональных составляющих входных сигналов формирователей с коррекцией динамических погрешностей. Их основой являются нерекурсивные цифровые фильтры Фурье, ортогональные составляющие которых подвергаются программной корректирующей обработке с целью получения эквивалентных составляющих, отличающихся быстрозатухающими динамическими амплитудными погрешностями. Коррекция динамической фазовой погрешности реализуется в процессе получения результирующих ортогональных составляющих, являющихся комбинацией составляющих Фурье и вычисленных по ним расчетных. На основе информации об амплитудах и текущих фазах сигналов, содержащейся соответственно в эквивалентных и результирующих составляющих, формируются итоговые ортогональные составляющие, отличающиеся минимальными амплитудными и фазовыми погрешностями в переходных режимах. По этим составляющим рассчитываются ортогональные составляющие сигнала обратной и нулевой последовательностей в соответствующем фильтре. В среде динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems реализована цифровая модель, в состав которой входят энергосистема, трехфазная группа трансформаторов тока, нагрузка, блок короткого замыкания, а также модели фильтров обратной и нулевой последовательностей. Исследование функциони-

Адрес для переписки

Румянцев Владимир Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

Address for correspondence

Rumiantsev Vladimir Yu.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

рования указанных фильтров выполнялось с использованием двух видов тестовых воздействий: трехфазной системы синусоидальных сигналов и трехфазной системы сигналов, приближенных к реальным вторичным токам при коротких замыканиях. Результаты исследований показали, что разработанные цифровые фильтры обратной и нулевой последовательностей по сравнению с аналогичными фильтрами Фурье, принятыми за эталоны, имеют в 1,1–1,4 раза более высокое быстродействие и отличаются улучшенными динамическими показателями.

Ключевые слова: цифровые фильтры симметричных составляющих, фильтры обратной и нулевой последовательностей, ортогональные составляющие, динамическая погрешность, коррекция амплитудной и фазовой погрешностей, модель, MATLAB-Simulink, тестовое воздействие, быстродействие, динамические показатели

Для цитирования: Романюк, Ф. А. Цифровые фильтры симметричных составляющих входных сигналов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 5–17. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-5-17>

Symmetrical Components Digital Filters for Microprocessor-Based Protection Input Signals

F. A. Romaniuk¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In microprocessor protections, measuring bodies are used that react to individual symmetrical components of signals or a combination of them. This makes the corresponding protection devices more sensitive. Of all the varieties of digital filters of symmetrical components, filters of the negative and zero sequences are mainly used. As for the known algorithms of their software implementation, it is advisable to use filters that form orthogonal components of the required sequence from orthogonal components of phase or phase-to-phase values of signals. Digital Fourier filters, characterized by inertia, are used as formers of the latter. For this reason, their transient modes are accompanied by the appearance of a dynamic error, which can significantly affect the functioning of filters of symmetrical components, worsening their properties. A significant reduction in this effect can be achieved by using shapers with correction of dynamic errors to isolate the orthogonal components of the input signals. They are based on non-recursive digital Fourier filters, the orthogonal components of which are subjected to software correction processing in order to obtain equivalent components characterized by fast-fading dynamic amplitude errors. Correction of the dynamic phase error is realized in the process of obtaining the resulting orthogonal components, which are a combination of Fourier components and calculated ones that have been estimated according to them. Based on the information about the amplitudes and current phases of the signals contained in the equivalent and resultant components, respectively, the resulting orthogonal components are formed, differing in minimal amplitude and phase errors in transient modes. According to these components, the orthogonal components of the signal of the negative and zero sequences in the corresponding filter are calculated. In the dynamic modeling environment of MATLAB-Simulink-SimPowerSystems, a digital model is implemented, which includes a power system, a three-phase group of current transformers, a load, a short-circuit block, as well as models of negative and zero sequence filters. The study of the functioning of these filters was carried out using two types of test actions, viz. a three-phase system of sinusoidal signals and a three-phase system of signals close to real secondary currents in short circuits. The results of the research have demonstrated that the developed digital filters of the negative and zero sequences have 1.1–1.4 times higher performance as compared with similar Fourier filters

accepted as reference and that they are distinguished by improved magnitudes of dynamic indicators.

Keywords: digital filters of symmetric components, filters of negative and zero sequences, orthogonal components, dynamic error, correction of amplitude and phase errors, model, MATLAB-Simulink, test action, performance, dynamic indicators

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2023) Symmetrical Components Digital Filters for Microprocessor-Based Protection Input Signals. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 5–17. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-5-17> (in Russian)

Введение

В существующих микропроцессорных защитах электроустановок широко применяются измерительные органы, реагирующие на отдельные симметричные составляющие входных сигналов или их комбинацию [1]. Это, помимо других преимуществ, позволяет выполнять соответствующие устройства защиты более чувствительными. Необходимо отметить, что из всех разновидностей цифровых фильтров симметричных составляющих (ФСС) преимущественно используются фильтры обратной и нулевой последовательностей [2]. При надобности фильтр прямой последовательности может быть организован путем перемены местами двух входов в фильтре обратной последовательности, что делает вполне достаточным подробное рассмотрение только этого фильтра.

Теоретические предпосылки

В микропроцессорных защитах из известных алгоритмов программной реализации ФСС целесообразно использовать фильтры, формирующие ортогональные составляющие (ОС) соответствующей последовательности из ОС фазных или междуфазных величин входных сигналов [3]. При этом в цифровом ФСС вначале формируются ОС контролируемых входных сигналов, по которым в последующем вычисляются значения ОС необходимой последовательности. Главным элементом такого ФСС является формирователь ОС входных сигналов, основные свойства которого определяют динамические показатели формирователя соответствующей последовательности в целом [4].

В качестве формирователей ОС в современных микропроцессорных защитах главным образом используются цифровые фильтры (ЦФ) Фурье различных модификаций с присущей им инерционностью [5]. По этой причине переходные режимы ЦФ сопровождаются возникновением динамической погрешности, включающей амплитудную и фазовую составляющие, которые могут существенно влиять на функционирование ФСС, ухудшая их свойства.

Заметное снижение такого влияния может быть получено за счет применения для выделения ОС входных сигналов предложенных в [6, 7] формирователей с коррекцией динамической погрешности. Их основой явля-

ются нерекурсивные ЦФ Фурье [8], выделяющие косинусные x_{jcn} и синусные x_{jsn} ($j = a, b, c$) ОС основной гармоники входных сигналов x_{jn} .

Ортогональные составляющие Фурье подвергаются специальной программной коррекции, в результате чего формируются эквивалентные ОС x_{jeqcn} , x_{jeqsn} с быстрозатухающими динамическими амплитудными погрешностями.

Коррекция динамической фазовой погрешности осуществляется в процессе получения результирующих ОС x_{jcm} , x_{jsm} , являющихся комбинацией ОС Фурье и вычисленных по ним расчетных ОС по методике, представленной в [7]. На основе информации об амплитудах и текущих фазах сигналов, содержащейся соответственно в эквивалентных и результирующих ОС, формируются итоговые ОС x_{jcvn} , x_{jsvn} , у которых амплитудные и фазовые погрешности в переходных режимах заметно меньше по сравнению с ОС Фурье x_{jcn} , x_{jsn} [9].

По итоговым косинусной x_{acvn} , x_{bcvn} , x_{ccvn} и синусной x_{asvn} , x_{bsvn} , x_{csvn} ОС сигналов фаз с использованием приведенных в [10] выражений вычисляются косинусная x_{2cn} и синусная x_{2sn} ортогональные составляющие сигнала обратной последовательности:

$$x_{2cn} = \frac{1}{3} \left(x_{acvn} - \frac{1}{2} x_{bcvn} + \frac{\sqrt{3}}{2} x_{bsvn} - \frac{1}{2} x_{ccvn} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{csvn} \right); \quad (1)$$

$$x_{2sn} = \frac{1}{3} \left(x_{asvn} - \frac{1}{2} x_{bsvn} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{bcvn} - \frac{1}{2} x_{csvn} + \frac{\sqrt{3}}{2} x_{ccvn} \right),$$

а также нулевой последовательности:

$$x_{0cn} = \frac{1}{3} (x_{acvn} + x_{bcvn} + x_{ccvn}); \quad (2)$$

$$x_{0sn} = \frac{1}{3} (x_{asvn} + x_{bsvn} + x_{csvn}).$$

Необходимо обратить внимание, что принципиально возможен другой вариант реализации ЦФ нулевой последовательности. Он предполагает вычисление по выборкам для одного момента времени входных сигналов фаз x_{jn} составляющей нулевой последовательности

$$x_{0n} = \frac{1}{3} (x_{an} + x_{bn} + x_{cn}), \quad (3)$$

из которой формирователем с коррекцией динамической погрешности выделяются косинусная x_{0cn} и синусная x_{0sn} ОС.

Представленные теоретические предпосылки положены в основу разработанных ЦФ токов обратной и нулевой последовательностей. Анализ их работоспособности и эффективности выполнялся с использованием ре-

ультатов вычислительного эксперимента путем сравнительной оценки ключевых показателей с аналогичными параметрами таких же фильтров, где в качестве формирователей ОС входных токов задействованы ЦФ Фурье, называемые в дальнейшем цифровыми фильтрами соответствующей последовательности Фурье.

Моделирование

Вычислительный эксперимент проводился с использованием разработанной модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems [11]. В структуре этой модели содержится энергосистема, трехфазная группа трансформаторов тока с возможностью воспроизводить насыщение их магнитных систем для моделирования воздействий, приближенных к реальным вторичным токам фаз, нагрузка, блок короткого замыкания, а также модели цифровых элементов, обеспечивающие реализацию функций разработанных фильтров тока обратной и нулевой последовательностей и аналогичных фильтров Фурье. Воспроизведение моделей блоков и элементов структуры выполнено с применением положений, содержащихся в [12].

Результаты исследований

Основными динамическими показателями цифровых ФСС, способными оказывать влияние на поведение измерительных органов, создавая условия для излишних срабатываний при внешних КЗ и замедления срабатывания при внутренних КЗ, а также препятствующими достижению высокой чувствительности, являются быстродействие, динамическая погрешность и выходной сигнал небаланса [10].

Быстродействие ФСС можно оценить временным интервалом с момента подачи на вход соответствующей системы сигналов до момента достижения выходным сигналом заданного значения.

Динамическая фазовая погрешность является функцией времени и представляет собой разность текущих значений фаз выходного и входного сигналов ФСС, последний из которых сформирован по первым гармоникам системы входных сигналов. Сравнительную оценку ФСС по данному показателю можно проводить путем сопоставления уровней и характера изменений указанной погрешности.

Выходной сигнал небаланса представляет собой сигнал на выходе ФСС при подаче на его вход системы сигналов, не содержащей выделяемой последовательности. Сравнить ФСС по этому показателю можно, оценивая уровни и характер изменения выходных сигналов небаланса.

На рис. 1 представлены зависимости, отражающие динамические показатели разработанного фильтра токов обратной последовательности (ФТОП) и аналогичного фильтра Фурье при двухфазном КЗ с входным воздействием, приближенным к синусоидальному сигналу.

В момент времени 0,04 с (рис. 1а) возникает двухфазное КЗ, при котором вторичные токи i_a , i_b , i_c являются синусоидальными. При этом в разработанном фильтре и фильтре Фурье появляется ток обратной последовательности (рис. 1б).

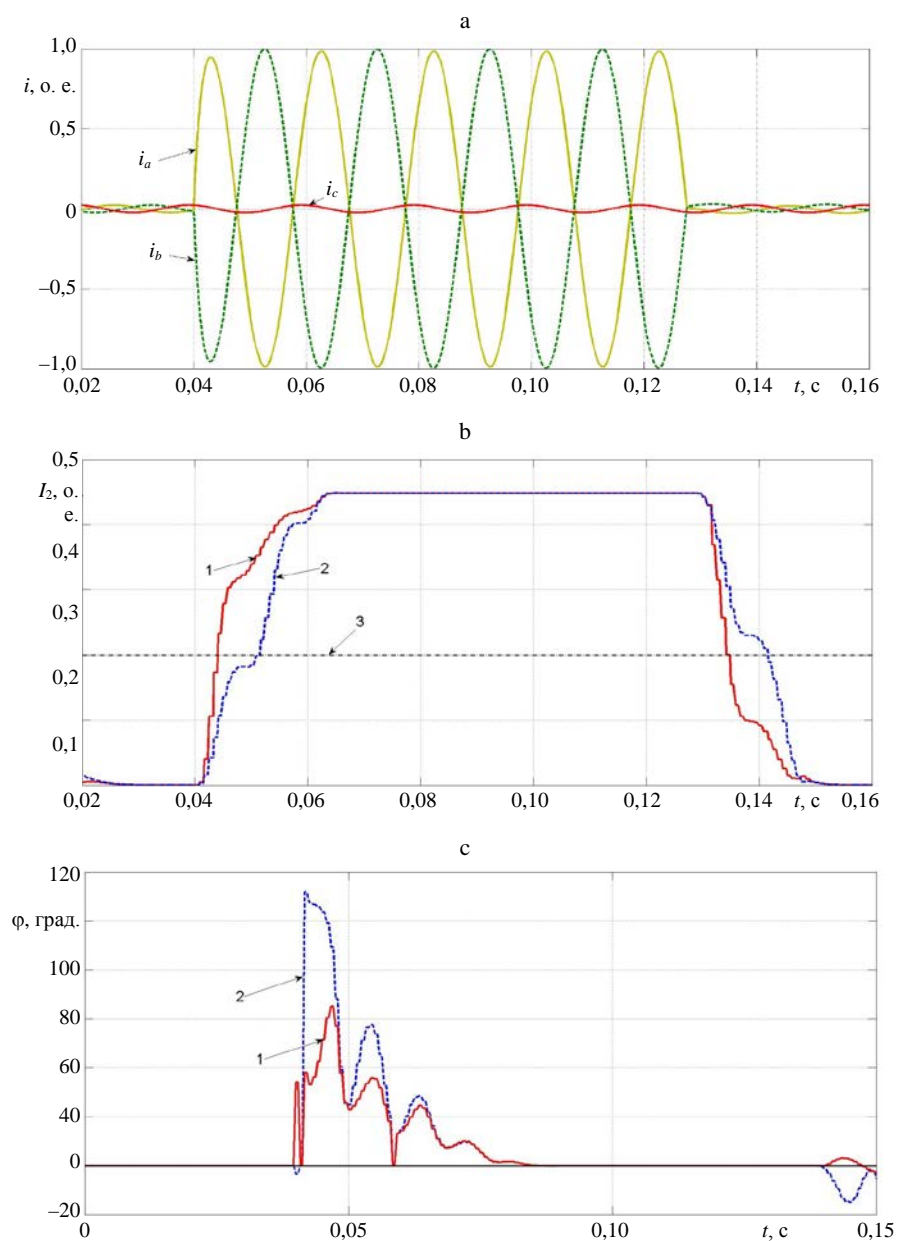


Рис. 1. Динамика фильтра токов обратной последовательности при двухфазном коротком замыкании с входным воздействием, приближенным к синусоидальному сигналу: а – вторичные синусоидальные токи фаз i_a , i_b , i_c ; б – ток обратной последовательности в фильтре; в – динамическая фазовая погрешность; 1 – в разработанном фильтре токов обратной последовательности; 2 – в фильтре токов обратной последовательности Фурье; 3 – заданный ток

Fig. 1. Dynamics of the negative sequence current filter in case of a two-phase short circuit with an input effect close to a sinusoidal signal:
а – secondary sinusoidal currents of i_a , i_b , i_c phases; б – negative sequence current in the filter; в – dynamic phase error; 1 – in the negative sequence current filter that has been developed; 2 – in the negative sequence current Fourier filter; 3 – set current

Очевидно, что в разработанном ФТОП указанный ток (рис. 1b, кривая 1) нарастает быстрее, чем в ФТОП Фурье (рис. 1b, кривая 2): в первом случае он достигает значения заданного тока (рис. 1b, кривая 3) в момент времени 0,042 с, а во втором – 0,05 с. После отключения двухфазного КЗ в момент времени 0,13 с (рис. 1a) ток обратной последовательности в разработанном ФТОП (рис. 1b, кривая 1) спадает быстрее, чем в ФТОП Фурье (рис. 1b, кривая 2).

Представленные на рис. 1с зависимости показывают, что в разработанном ФТОП динамическая фазовая погрешность (рис. 1с, кривая 1) существует в течение того же промежутка времени, что и в ФТОП Фурье (рис. 1с, кривая 2), однако ее уровень на начальном этапе КЗ значительно меньше.

Анализ результатов исследования поведения ФТОП в других несимметричных режимах при синусоидальных входных воздействиях свидетельствует, что разработанный фильтр в сравнении с фильтром Фурье имеет более высокое быстродействие и обладает лучшими динамическими свойствами.

На рис. 2 представлены зависимости, аналогичные приведенным на рис. 1, при входном воздействии, приближенном к реальному вторичному току.

После возникновения двухфазного КЗ в момент времени 0,04 с (рис. 2a) трансформаторы тока поврежденных фаз входят в режим насыщения сердечников под воздействием содержащихся в токах апериодических составляющих. Анализ изменений токов обратной последовательности (рис. 2b) и динамических фазовых погрешностей (рис. 2с) в разработанном ФТОП и ФТОП Фурье при несимметричных КЗ с реальными вторичными токами дает основания для вывода о более высоких динамических свойствах первого фильтра по сравнению с вторым в этих режимах. Различие в быстродействии исследуемых ФТОП возрастает с увеличением степени насыщения сердечников трансформаторов тока (рис. 2b).

На рис. 3 показано изменение токов небаланса в ФТОП при трехфазном КЗ с входным воздействием, приближенным к синусоидальному сигналу.

В момент времени 0,04 с возникает трехфазное КЗ (рис. 3a), в результате чего в ФТОП появляется ток небаланса (рис. 3b), который изменяется во времени и после завершения переходного процесса исчезает. Максимальное значение тока небаланса в разработанном ФТОП (рис. 3b, кривая 1) несколько больше, чем в ФТОП Фурье (рис. 3b, кривая 2). При этом указанный ток в разработанном фильтре затухает более интенсивно, чем в фильтре Фурье. После отключения трехфазного КЗ в момент времени 0,125 с (рис. 3a) также появляется ток небаланса (рис. 3b), характер изменения и время существования которого примерно такие же, как и при возникновении КЗ.

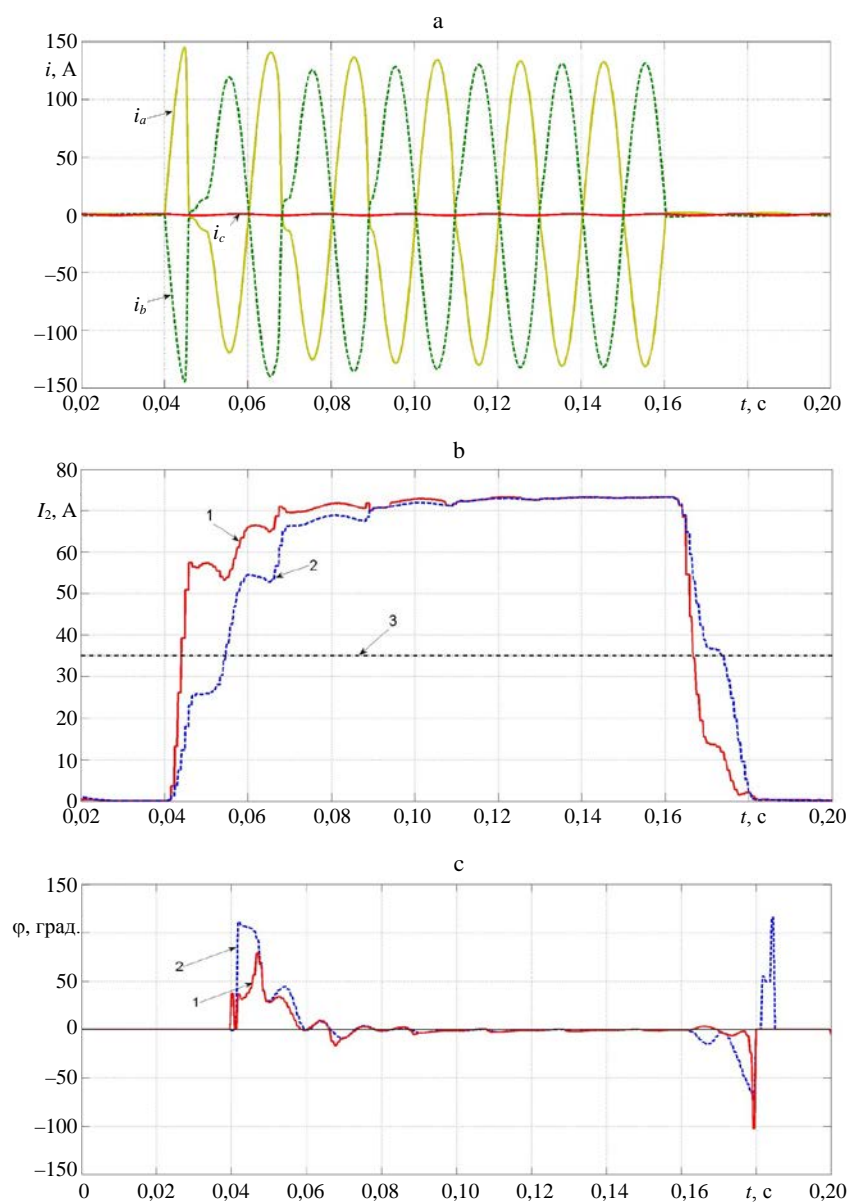


Рис. 2. Динамика фильтра токов обратной последовательности при двухфазном коротком замыкании с входным воздействием, приближенным к реальному вторичному току:
а – реальные вторичные токи фаз i_a , i_b , i_c ; б – ток обратной последовательности в фильтре;
с – динамическая фазовая погрешность; 1 – в разработанном фильтре токов обратной последовательности; 2 – в фильтре токов обратной последовательности Фурье;
3 – заданный ток

Fig. 2. Dynamics of the negative sequence current filter in case of a two-phase short circuit with an input effect close to a real secondary current:
а – real secondary currents of i_a , i_b , i_c phases; б – negative sequence current in the filter;
с – dynamic phase error; 1 – in the negative sequence current filter that has been developed;
2 – in the negative sequence current Fourier filter;
3 – set current

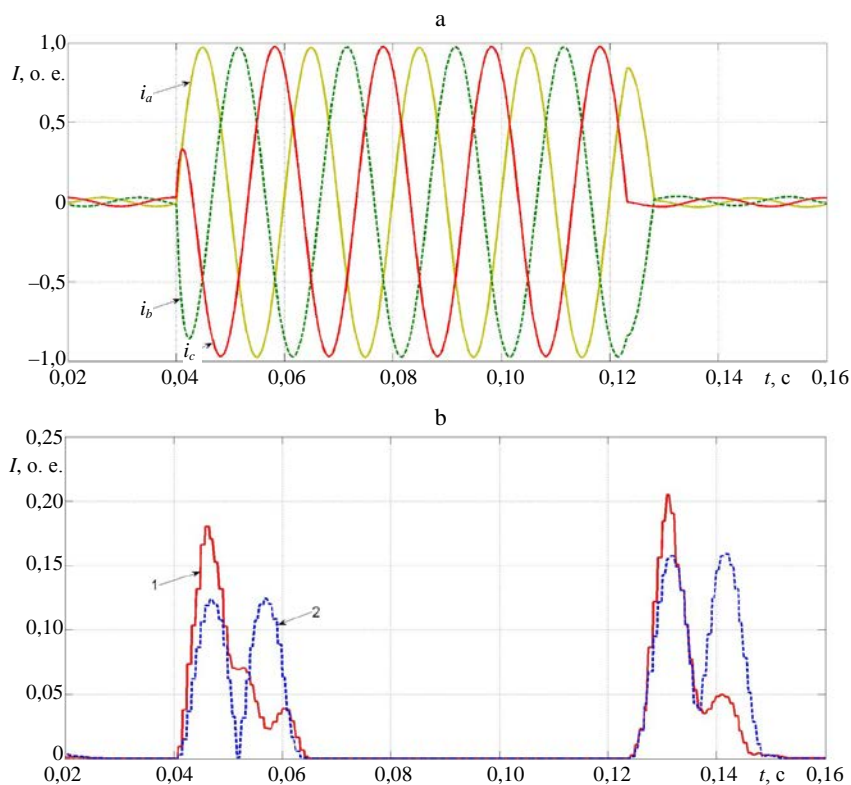


Рис. 3. Ток небаланса фильтра токов обратной последовательности при трехфазном коротком замыкании с входным воздействием, приближенным к синусоидальному сигналу:

- a – вторичные синусоидальные токи фаз i_a , i_b , i_c ; б – ток небаланса в фильтре;
 1 – в разработанном фильтре токов обратной последовательности;
 2 – в фильтре токов обратной последовательности Фурье

Fig. 3. The unbalance current of the negative sequence current filter in case of a three-phase short circuit with an input effect close to a sinusoidal signal takes place:

- a – secondary sinusoidal currents of i_a , i_b , i_c phases; б – unbalance current in the filter;
 1 – in the negative sequence current filter that has been developed;
 2 – in the negative sequence current Fourier filter

При трехфазном КЗ со сложным входным воздействием, приближенным к реальному вторичному току, в обоих ФТОП ток небаланса имеет почти одинаковый сложный характер изменения, а длительность его существования зависит от степени насыщения сердечников трансформаторов тока.

Резюмируя изложенное выше, следует отметить, что разработанный ФТОП имеет в 1,2–1,4 раза более высокое быстродействие и лучшие динамические показатели по сравнению с аналогичными фильтрами Фурье.

Из предложенных выше вариантов реализации фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП) более предпочтительным представляется второй, в основе которого лежит выражение (3). Очевидно, что этот вариант существенно проще в алгоритмическом отношении и отличается более высокими динамическими свойствами.

На рис. 4 приведены зависимости, характеризующие динамические свойства ФТНП при КЗ на землю с входным воздействием, приближенным к вторичному току нулевой последовательности (рис. 4а). Анализ измене-

ний токов в фильтрах (рис. 4б, кривые 1, 2), а также динамических фазовых погрешностей (рис. 4с, кривые 1, 2) дает основания для вывода о более высоких динамических свойствах разработанного ФТНП в сравнении с ФТНП Фурье. Это подтверждается результатами исследований и при КЗ на землю с синусоидальным входным воздействием.

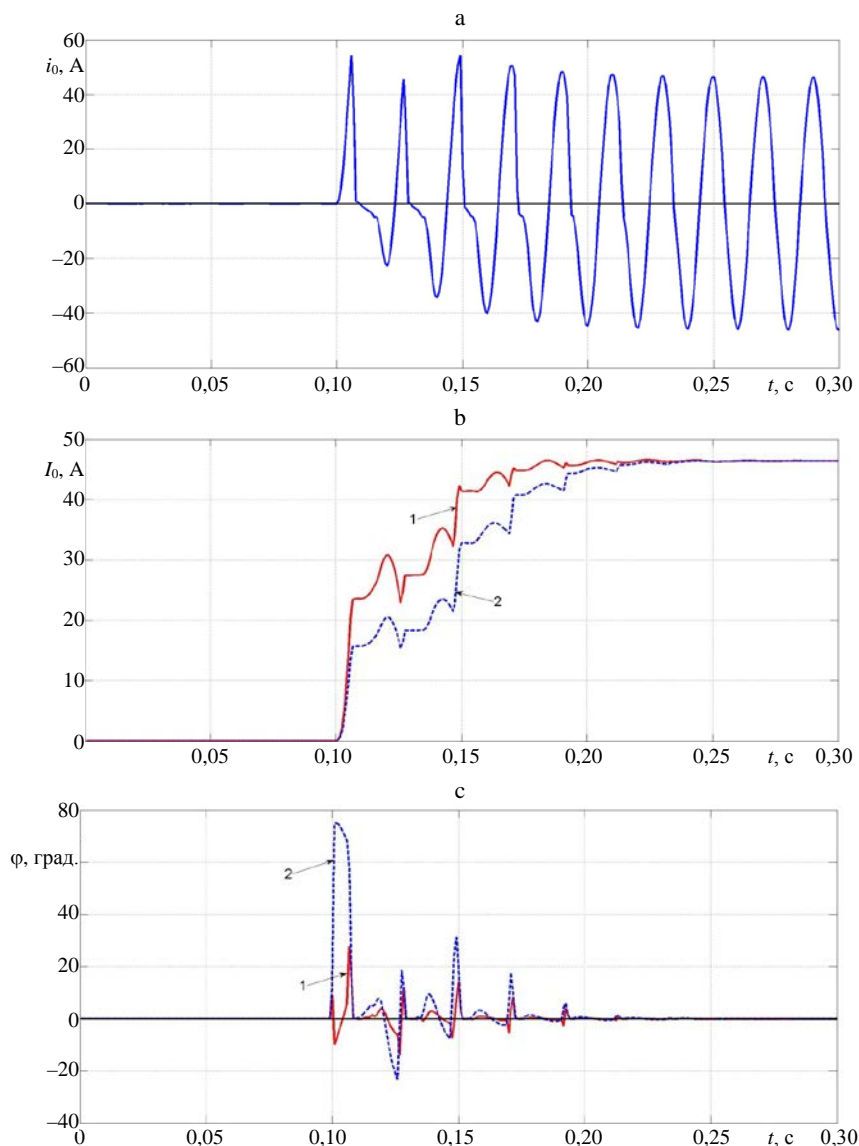


Рис. 4. Динамика фильтра токов нулевой последовательности при коротком замыкании на землю с входным воздействием, приближенным к реальному вторичному току: а – реальный вторичный ток нулевой последовательности; б – ток нулевой последовательности в фильтре; с – динамическая фазовая погрешность; 1 – в разработанном фильтре токов нулевой последовательности; 2 – в фильтре токов нулевой последовательности Фурье

Fig. 4. Dynamics of the zero sequence current filter in case of a short circuit to the ground with an input effect close to the real secondary current: а – real secondary current of the zero sequence; б – zero sequence current in the filter; с – dynamic phase error; 1 – in the zero sequence current filter that has been developed; 2 – in the zero sequence current Fourier filter

На рис. 5 приведены зависимости, отражающие изменение тока небаланса в ФТНП при трехфазном КЗ. При синусоидальном входном воздействии токи небаланса в разработанном ФТНП и ФТНП Фурье имеют схожий характер изменения при отличающихся максимальных значениях (рис. 5а). В случае сложного входного воздействия появляются более высокие значения токов небаланса (рис. 5б). Основное отличие состоит в том, что в разработанном ФТНП ток небаланса затухает быстрее, чем в ФТНП Фурье.

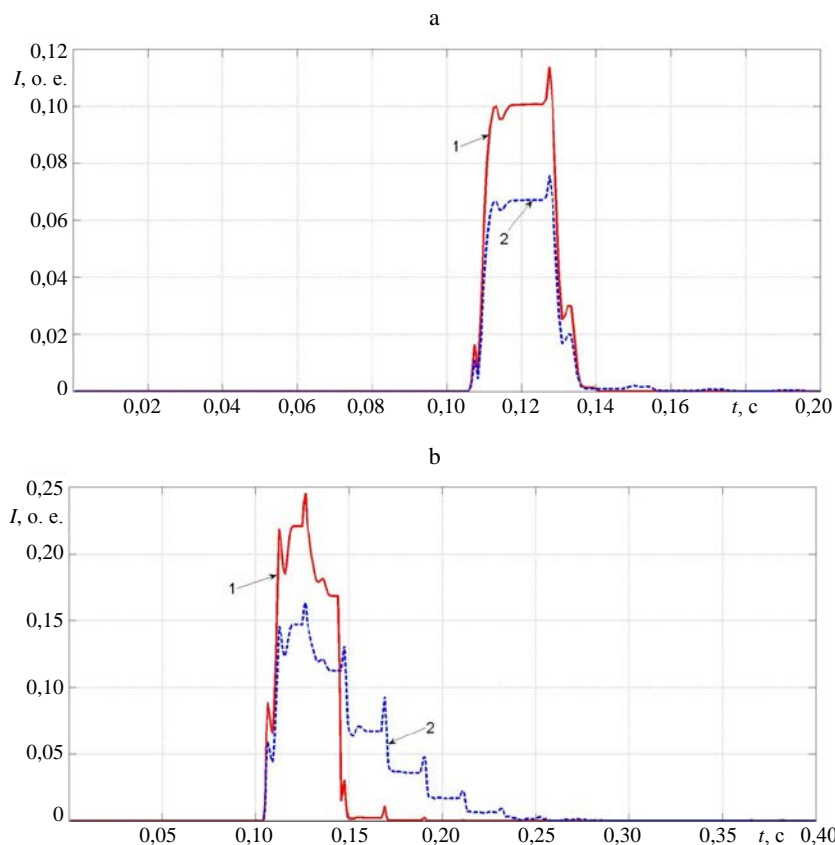


Рис. 5. Ток небаланса фильтра токов нулевой последовательности при трехфазном коротком замыкании: а – с входным синусоидальным воздействием; б – со сложным воздействием, приближенным к реальному вторичному току; 1 – в разработанном фильтре токов нулевой последовательности; 2 – в фильтре токов нулевой последовательности Фурье

Fig. 5. The unbalance current of the zero sequence current filter in case of a three-phase short circuit with an input effect close to a sinusoidal signal: a – with an input sinusoidal effect; b – with a complex effect, close to the real secondary current; 1 – in the zero sequence current filter that has been developed; 2 – in the zero sequence current Fourier filter

Резюмируя вышеизложенное, можно отметить, что разработанный ФТНП в сравнении с ФТНП Фурье имеет в 1,1–1,5 раза более высокое быстродействие и отличается улучшенными динамическими показателями.

ВЫВОДЫ

1. Реализацию цифровых фильтров симметричных составляющих входных сигналов микропроцессорных защит предпочтительно осуществлять с использованием формирователей ортогональных составляющих с коррекцией динамической погрешности.

2. Разработанные цифровые фильтры тока обратной и нулевой последовательностей с коррекцией динамической погрешности по сравнению с аналогичными на основе ортогональных составляющих Фурье имеют в 1,1–1,5 раза более высокое быстродействие и отличаются улучшенными динамическими показателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчаренко, Н. И. Аналоговые и цифровые элементы автоматических устройств энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1989. 320 с.
2. Романюк, Ф. А. Формирование симметричных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1998. № 5. С. 13–19.
3. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
4. Шнеерсон, Э. М. Измерительные органы релейной защиты на основе микропроцессорных структур / Э. М. Шнеерсон. М.: Информэлектро, 1984. 92 с.
5. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
6. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108>.
7. Компенсация динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208>.
8. Фадке Арун, Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / Г. Фадке Арун, С. Торп Джеймс. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
9. Романюк, Ф. А. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в цифровых измерительных органах защит с коррекцией динамических погрешностей / Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 4. С. 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300>.
10. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк. Минск: Технопринт, 2001. 133 с.
11. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
12. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2001. 168 с.

REFERENCES

1. Ovcharenko N. I. (1989) *Analog and Digital Elements of Automatic Devices of Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 320 (in Russian).
2. Romaniuk F. A. (1998) Formation of Symmetric Components of Input Signals in Microprocessor Protections. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 13–19 (in Russian).
3. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems. Relay Protection of Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
4. Schneerson E. M. (1984) *Measuring Elements of Relay Protection Based on Microprocessor Structures*. Moscow, Informelectro Publ. 92 (in Russian).
5. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
6. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Improvement of Algorithm for Formation of Orthogonal Components of Input Quantities in Microprocessor Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108> (in Russian).
7. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2022) Compensation of Dynamic Phase Error in the Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Microprocessor Protections. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208> (in Russian).
8. Phadke A. G., Thorp J. S. (2019) *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd ed. Moscow, Tekhnosfera Publ. 370 (in Russian).
9. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2022) Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Digital Measuring Protection Elements with Correction of Dynamic Errors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (4), 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300> (in Russian).
10. Romaniuk F. A. (2001) *Information Support of Microprocessor Protection of Electrical Installations*. Minsk, Technoprint Publ. 133 (in Russian).
11. Chernykh I. V. (2011) *Modeling of Electrical Devices in MatLab, SimowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press Publ; Saint-Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
12. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumyantsev V. Yu., Rumyantsev Yu. V. (2021). *Tests of Microprocessor Current Protections: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, BNTU Publ. 168 (in Russian).