

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-411-417>

УДК 621.316.925

Динамические свойства алгоритма дистанционных измерений в цифровых органах сопротивления

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. А. Ромانيук¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты В. Ю. Румянцев¹⁾, И. В. Новаш¹⁾,
канд. техн. наук Ю. В. Румянцев¹⁾

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

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

Реферат. В микропроцессорных дистанционных защитах линий цифровые органы сопротивления используются в качестве измерительных для определения компонентов вектора входного сопротивления и последующего их математического сравнения с границами выбранных характеристик срабатывания. Значения компонентов вектора сопротивления вычисляются по измеренным в месте установки защиты напряжениям и токам. Наиболее распространенными являются алгоритмы дистанционных измерений входного сопротивления на основе: двух выборок мгновенных значений напряжения и тока линии; модели линии; использования ортогональных составляющих напряжения и тока. В органах сопротивления современных микропроцессорных защит линий для дистанционных измерений наиболее широко применяется последний из вышеназванных алгоритмов. Его динамические свойства определяются главным образом реализуемым методом формирования ортогональных составляющих входных сигналов. В измерительных органах дистанционных защит для этой цели преимущественно используются нерекурсивные цифровые фильтры Фурье. Для улучшения динамических свойств алгоритма дистанционных измерений на их основе предложено дополнительно осуществлять коррекцию динамических погрешностей в переходных режимах. В среде динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems реализована цифровая модель, позволяющая осуществлять сравнительную оценку динамических свойств предложенного алгоритма дистанционных измерений входного сопротивления по результатам вычислительного эксперимента. Результаты исследований показали, что предложенный алгоритм дистанционных измерений входного сопротивления обладает более высокими динамическими свойствами по сравнению с известными.

Ключевые слова: дистанционные измерения, орган сопротивления, динамические свойства, алгоритм измерений, модель, MATLAB-Simulink-SimPowerSystems, тестовые воздействия, результаты исследований

Для цитирования: Динамические свойства алгоритма дистанционных измерений в цифровых органах сопротивления / Ф. А. Романиук [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 411–417. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-411-417>

Dynamic Properties of Remote Sensing Algorithm in Digital Resistance Elements

F. A. Romaniuk¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, I. V. Novash¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾

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

Abstract. In microprocessor-based distance protection of lines, digital resistance elements are used as measuring instruments for determining the components of the input resistance vector and their subsequent mathematical comparison with

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

the boundaries of the selected response characteristics. The values of the resistance vector components are calculated from the voltages and currents measured at the installation site of the protection. The most common are algorithms for remote measurements of input resistance based on: two samples of instantaneous values of line voltage and current; line models; using orthogonal voltage components and current. In the resistance elements of modern microprocessor line protections for remote measurements, the last of the above algorithms is most widely used. Its dynamic properties are determined mainly by the implemented method of generating the orthogonal components of the input signals. In distance protection measuring device, non-recursive digital Fourier filters are predominantly used for this purpose. To improve the dynamic properties of the remote measurement algorithm based on them, it is proposed to correct additionally dynamic errors in transient modes. In the dynamic modeling environment MATLAB-Simulink-SimPowerSystems, digital model is implemented that allows for a comparative assessment of the dynamic properties of the proposed algorithm for remote measurements of input resistance based on the results of a computational experiment. The research results have shown that the proposed algorithm for remote measurements of input resistance has higher dynamic properties compared to the known ones.

Keywords: remote measurements, resistance element, dynamic properties, measurement algorithm, model, MATLAB-Simulink-SimPowerSystems, test influences, research results

For citation: F. A. Romaniuk, V. Yu. Rumiantsev, I. V. Novash, Yu. V. Rumiantsev (2023) Dynamic Properties of Remote Sensing Algorithm in Digital Resistance Elements. *Science and Technique*. 22 (5), 411–417. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-411-417> (in Russian)

Введение

Цифровые органы сопротивления используются в микропроцессорных дистанционных защитах ЛЭП в качестве измерительных для определения компонентов (R , X) вектора входного сопротивления $\dot{Z}_{вх}$ и последующего их математического сравнения с границами выбранных характеристик срабатывания [1]. Значения R и X вычисляются по измеренным в месте установки защиты напряжению и току. Для выполнения измерительных органов сопротивления (ИОС) защит от многофазных коротких замыканий (КЗ) в одной точке вполне приемлемыми свойствами обладают пофазные органы, включаемые на полные междуфазные напряжения и соответствующие им разности фазных токов [2].

Наиболее распространенными и используемыми в цифровых ИОС являются алгоритмы цифровых измерений входного сопротивления [3] на основе:

- двух выборок мгновенных значений напряжения и тока линии;
- модели линии;
- использования ортогональных составляющих (ОС) первых гармоник напряжения и тока линии.

Первый из вышеуказанных алгоритмов в частном случае при частоте входных сигналов 50 Гц и шаге их дискретизации $\Delta t = 0,005$ с отличается достаточно простыми выражениями

для R и X . Он является быстродействующим, поскольку результат измерения, в принципе, может быть получен за время Δt . Однако при отличии входных сигналов от синусоидальных данный алгоритм имеет низкую точность, которая будет повышаться по мере затухания апериодических составляющих в первичных токах КЗ.

В этой связи практическое применение рассматриваемого алгоритма обуславливает необходимость цифровой фильтрации подводимых напряжений и токов, что ухудшает его динамические свойства.

Второй из рассматриваемых алгоритмов малочувствителен к искажениям форм напряжений и тока, возникающим при КЗ на линии. С теоретических позиций, является достаточно быстродействующим. Вместе с тем имеет невысокую точность и может давать неправильные результаты при наличии дуги в месте КЗ. Алгоритм, основанный на модели линии, отличается подверженностью влиянию помех. Практическая его реализация требует осуществления цифровой фильтрации входных сигналов, которая отрицательно сказывается на динамических свойствах алгоритма.

В ИОС современных микропроцессорных защит линий для дистанционных измерений наиболее широко применяется третий из вышеуказанных алгоритмов, основанный на использовании ОС первых гармоник напряжения и тока [4].

Основная часть

В алгоритме с обработкой ортогональных составляющих входных сигналов выборки активной R_n и реактивной X_n компонент сопротивления петли КЗ в дискретные моменты времени t_n ($n=1, 2, 3, \dots, N$) определяются по выборкам синусных и косинусных ОС напряжения u_{sn} , u_{cn} и тока i_{sn} , i_{cn} с использованием известных выражений [2]:

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{u_{sn}i_{sn} + u_{cn}i_{cn}}{i_{sn}^2 + i_{cn}^2}, \\ X_n &= \frac{u_{sn}i_{cn} - u_{cn}i_{sn}}{i_{sn}^2 + i_{cn}^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Непосредственное вычисление R_n , X_n по (1) не вносит задержку в алгоритм дистанционных измерений. Однако этому предшествует формирование из входных сигналов составляющих взаимно ортогональных функций, которое обладает фильтрующими свойствами и замедляет получение достоверных значений R_n , X_n . Поэтому динамические свойства алгоритма дистанционных измерений на основе использования ОС входных сигналов определяются главным образом динамикой формирователей ортогональных составляющих напряжения и тока.

В настоящее время существует значительное разнообразие цифровых формирователей ОС сигналов в микропроцессорных защитах электроэнергетических объектов [4]. При этом наиболее широко в качестве указанных формирователей используются нерекурсивные цифровые фильтры (ЦФ) Фурье и их модификации.

Динамические свойства алгоритма дистанционных измерений R_n , X_n на основе ОС Фурье (в дальнейшем алгоритм Фурье) могут быть улучшены в части как быстродействия, так и погрешности измерений в переходных режимах. Это может быть достигнуто за счет использования в указанном алгоритме разработанных формирователей ОС с коррекцией динамических погрешностей. Принципы их выполнения подробно изложены в [5].

В предлагаемом алгоритме дистанционных измерений R_n , X_n сформированные ОС Фурье подвергаются дополнительной цифровой обработке в соответствии с описанными в [6] вычислительными процедурами, в результате чего выделяются итоговые выборки составляющих напряжения и тока, отличающиеся меньшими динамическими погрешностями по сравнению с исходными.

С целью повышения точности измерений из ряда рассчитанных по (1) значений R_n , X_n возможна реализация метода исправления ошибок (усреднения).

Для сравнительной оценки динамических свойств предлагаемого алгоритма дистанционных измерений входного сопротивления можно использовать следующие показатели:

- быстродействие, оценивается отрезком времени от момента возникновения КЗ до вхождения измеряемой величины в область срабатывания. Если указанная область неизвестна, то показателем быстродействия может быть отрезок времени от момента возникновения КЗ до вхождения измеряемой величины в зону установившегося значения;

- динамическую погрешность. В качестве оценочного параметра для сравнительной оценки динамических свойств двух алгоритмов дистанционных измерений входного сопротивления возможно использование относительной разности их погрешностей в переходных режимах КЗ, определяемой как

$$\Delta Z_n = \frac{Z_{нпр} - Z_{нФ}}{Z_б}, \quad (2)$$

где $Z_{нпр}$, $Z_{нФ}$ – входные сопротивления, полученные соответственно по предлагаемому алгоритму и алгоритму Фурье; $Z_б$ – базисное значение, в качестве которого можно принять полное сопротивление линии.

Если $\Delta Z_n > 0$, то лучшими динамическими свойствами обладает алгоритм Фурье, в противном случае при $\Delta Z_n < 0$ лучшие динамические свойства имеет предлагаемый алгоритм дистанционных измерений.

При $\Delta Z_n = 0$ сравниваемые алгоритмы равноценны по динамическим свойствам либо имеет место установившийся режим;

- траекторию замеров входного сопротивления. Оценка траекторий замеров входного сопротивления производится визуально по положению конца вектора указанного сопротивления в осях R, X на экране дисплея или на бумажном носителе.

Исследование динамических свойств предложенного алгоритма дистанционных измерений входного сопротивления выполнялось методом вычислительного эксперимента.

Моделирование. Структура модели для испытаний ИОС с использованием вышеназванных алгоритмов измерений сопротивления выполнена в системе динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems [7]. Ее основу составляют модели энергосистемы, трансформаторов тока и напряжения, линии электропередачи, построение которых подробно рассмотрено в [8]. Модель ИОС реализована из библиотечных блоков Simulink [9, 10] на основании рассмотренной выше методики.

ИОС установлен на линии длиной $l = 20$ км с удельными сопротивлениями $R_y = 0,02$ Ом/км

и $X_y = 0,3$ Ом/км. В процессе испытаний моделируются КЗ в начале линии на расстоянии 0,5 км от места установки защиты (близкое КЗ) и в конце линии на расстоянии 19,5 км от места установки защиты (удаленное КЗ). Входные величины, подводимые к ИОС (междуфазное напряжение $\dot{U}_p = \dot{U}_{AB}$, разность фазных токов $\dot{I}_p = \dot{I}_A - \dot{I}_B$), позволяют фиксировать с минимальными погрешностями сопротивление Z_{AB} при КЗ ABC, AB, ABO [11, 12]. Характеристика срабатывания ИОС – окружность радиусом 0,75 Ом, проходящая через начало координат.

Результаты исследования

Оценка быстродействия. На рис. 1 представлены результаты сравнения двух ИОС: первого, реализованного по предлагаемому алгоритму с входным сопротивлением Z_{np} (кривая 1), и второго, реализованного по алгоритму Фурье с входным сопротивлением Z_{ϕ} (кривая 2). Для обоих ИОС уставка срабатывания (прямая 3) одинакова и составляет 0,75 Ом.

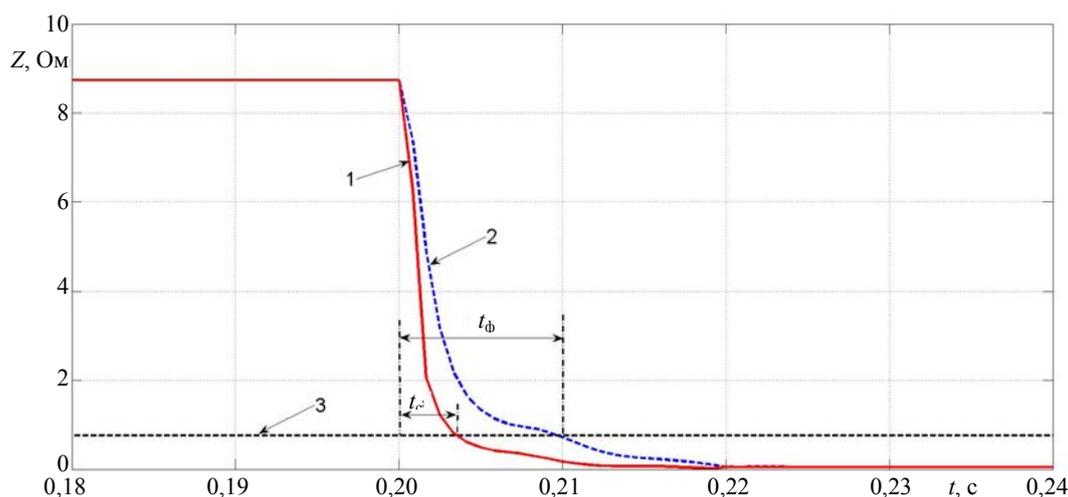


Рис. 1. Зависимости $Z = f(t)$ при близком междуфазном КЗ AB для ИОС с предлагаемым алгоритмом (кривая 1) и ИОС с алгоритмом Фурье (кривая 2); уставка срабатывания – прямая 3

Fig. 1. Dependences $Z = f(t)$ with a close phase-to-phase short circuit AB for a resistance measuring element with the proposed algorithm (curve 1) and a resistance measuring element with the Fourier algorithm (curve 2); trigger setting – straight 3

Двухфазное КЗ AB происходит в момент времени $t = 0,2$ с. Сопротивление предлагаемого ИОС Z_{np} достигает уровня срабатывания за $t_c = 0,004$ с от момента возникновения КЗ, а ИОС на основе алгоритма Фурье срабатывает за время $t_\phi = 0,01$ с, т. е. в 2,5 раза медленнее.

Рис. 2 позволяет по-другому интерпретировать временные зависимости рис. 1. Режим нагрузки – верхний угол рис. 2, при котором входные сопротивления обоих ИОС одинаковые и составляют порядка 9 Ом. В момент возникновения КЗ входное сопротивление Z_{np} ИОС с предлагаемым алгоритмом начинает изменяться быстрее, чем входное сопротивление Z_ϕ ИОС с алгоритмом Фурье. Это приводит к тому, что в осях $Z_{np} - Z_\phi$ кривая 2 будет располагаться ниже прямой 3, соответствующей условию равенства сопротивлений $Z_{np} = Z_\phi$ и представляющей идеальную траекторию движения входного сопротивления.

Оценка динамической погрешности. На рис. 3 приведены результаты моделирования относительной разности динамической погрешностей ΔZ по выражению (2) в переходных режи-

мах трехфазных КЗ – удаленного (кривая 1) и близкого (кривая 2). Как видно из рисунка, в обоих случаях КЗ $\Delta Z < 0$, что свидетельствует о лучших динамических свойствах ИОС с предлагаемым алгоритмом дистанционных измерений входного сопротивления.

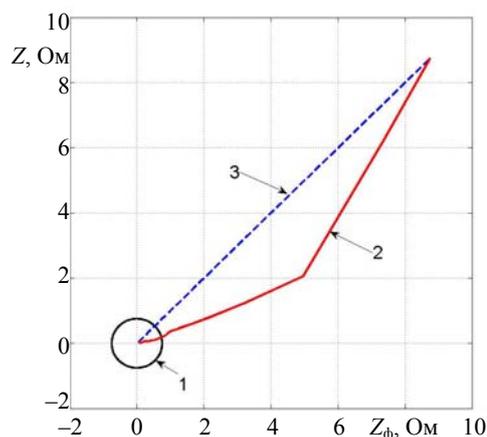


Рис. 2. Зависимость $Z_{np} = f(Z_\phi)$ (кривая 2) при близком междуфазном КЗ AB для ИОС с предлагаемым алгоритмом измерений и алгоритмом Фурье; характеристика срабатывания – окружность 1; идеальная траектория – прямая 3

Fig. 2. Dependence $Z_{np} = f(Z_\phi)$ (curve 2) with a close phase-to-phase short circuit AB for a resistance measuring element with the proposed measurement algorithm and Fourier algorithm; response characteristic – circle 1; ideal trajectory – straight 3

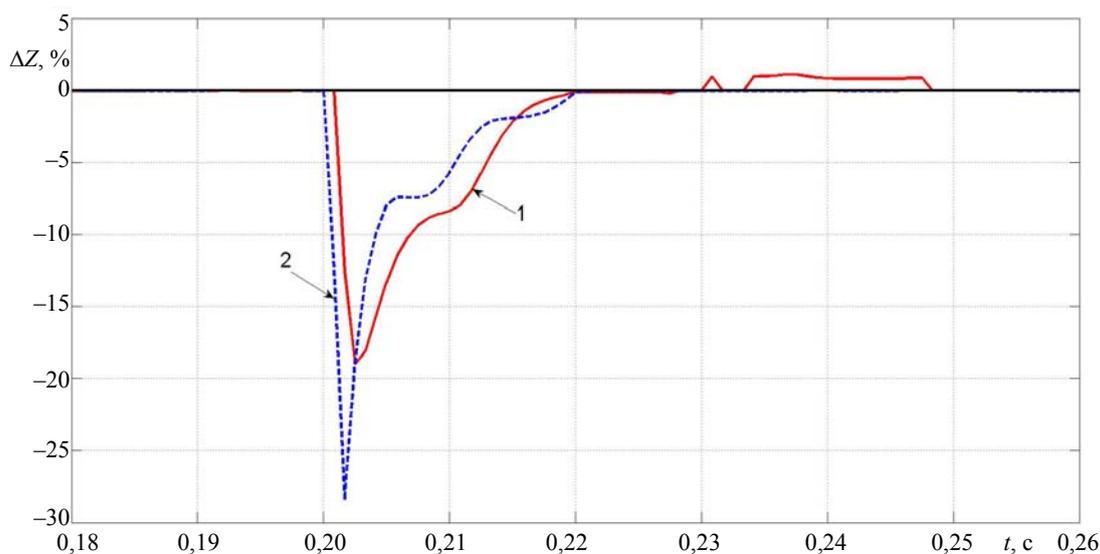


Рис. 3. Относительная разность динамических погрешностей при трехфазном удаленном КЗ (кривая 1) и трехфазном близком КЗ (кривая 2)

Fig. 3. Relative difference in dynamic errors for a three-phase remote short circuit (curve 1) and three-phase close short circuit (curve 2)

Выполненные методом вычислительного эксперимента многочисленные исследования, представленные вышеприведенными зависимостями для частных наиболее характерных режимов КЗ, свидетельствуют о более высоких динамических свойствах алгоритма дистанционных измерений входного сопротивления на основе использования формирователей ОС сигналов с коррекцией динамических погрешностей в сравнении с аналогичным алгоритмом, в котором ОС токов и напряжений выделяются с помощью ЦФ Фурье.

При этом следует отметить, что режим электрической системы оказывает влияние на динамические свойства ИОС. Это обусловлено тем, что при КЗ и коммутациях возникают переходные процессы как в самой системе, так и в цепях ИОС. В этой связи представляет интерес оценка влияния переходного сопротивления в месте КЗ на динамические свойства предложенного алгоритма дистанционных измерений входного сопротивления.

На рис. 4 представлены результаты сравнения быстродействия ИОС с предложенным алгоритмом дистанционных измерений сопротивления при трехфазных КЗ. Кривая 1 отражает изменение входного сопротивления при близком «металлическом» КЗ, кривая 2 – при КЗ через переходное сопротивление $R_{п} = 4$ Ом.

Для обоих режимов КЗ уставка срабатывания ИОС (прямая 3) составляет 0,75 Ом.

В обоих случаях КЗ происходит в момент времени $t = 0,2$ с. При «металлическом» КЗ сопротивление Z достигает уровня срабатывания за $t_c = 0,004$ с от момента возникновения КЗ, а при КЗ через переходное сопротивление – за $t_{сп} = 0,008$ с, т. е. в два раза медленнее.

Проведенные вычислительные эксперименты с другими значениями переходного сопротивления в различных режимах КЗ показывают, что наличие указанного сопротивления в месте повреждения ухудшает быстродействие алгоритма дистанционных измерений, степень которого возрастает с увеличением $R_{п}$.

Оценка влияния переходного сопротивления на динамическую погрешность предложенного алгоритма дистанционных измерений выполнялась с использованием в качестве оценочного параметра относительной разности погрешностей определения входного сопротивления в переходных режимах «металлических» КЗ и КЗ через $R_{п}$ с помощью выражения, аналогичного (2).

В результате выполненных исследований выявлено, что переходное сопротивление в месте КЗ не влияет на время существования динамической погрешности и не приводит к значительным изменениям ее уровня.

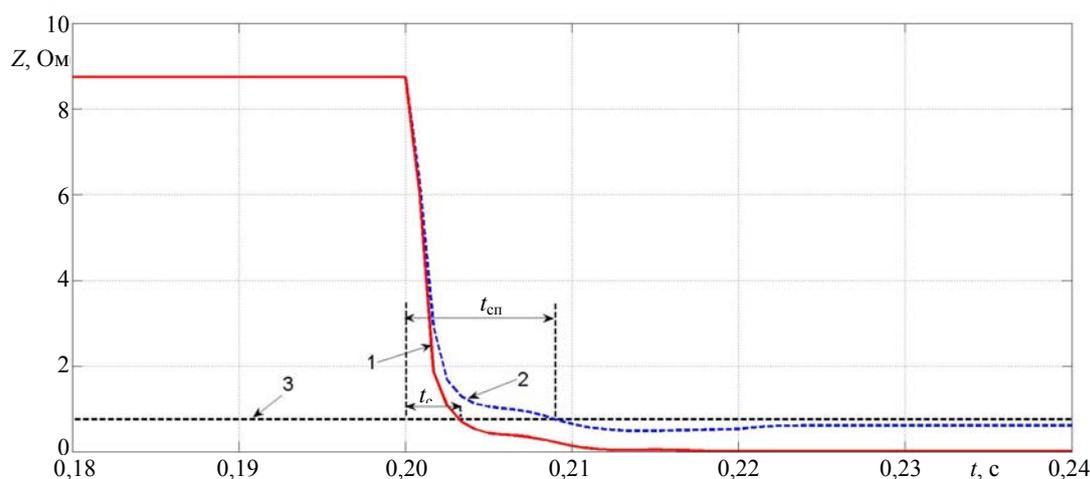


Рис. 4. Зависимости $Z = f(t)$ при близком трехфазном «металлическом» КЗ (кривая 1) и близком трехфазном КЗ через переходное сопротивление $R_{п} = 4$ Ом (кривая 2); уставка срабатывания – прямая 3

Fig 4. Dependences $Z = f(t)$ for a close three-phase “metal” short circuit (curve 1) and close three-phase short circuit through the contact resistance $R_{п} = 4$ Ohm (curve 2); response setting – straight 3

ВЫВОДЫ

1. Разработанный алгоритм дистанционных измерений на основе ортогональных составляющих тока и напряжения с коррекцией динамической погрешности обеспечивает достоверное определение входного сопротивления в нормальном режиме и при всех видах междоузельных коротких замыканий.

2. Предложенный алгоритм позволяет изменить входное сопротивление за время менее периода промышленной частоты, а его быстродействие в 1,4–1,6 раза выше, чем у аналогичного алгоритма на основе ортогональных составляющих Фурье.

3. Динамическая погрешность определения входного сопротивления в переходных режимах коротких замыканий в разработанном алгоритме, за редким исключением, существенно меньше, чем в алгоритме Фурье.

4. Предложенный алгоритм дистанционных измерений входного сопротивления в сравнении с аналогичным алгоритмом Фурье в целом имеет более высокие динамические свойства и может использоваться в измерительных органах микропроцессорных защит линий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
2. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
3. Новаш, В. И. Частотные свойства алгоритмов функционирования измерительных органов сопротивления цифровых дистанционных защит ЛЭП / В. И. Новаш, В. В. Шмыгин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2004. № 5. С. 15–23.
4. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / Г. Циглер; пер. с англ. под ред. А. Ф. Дьякова. М.: Энергоиздат. 2005. 322 с.
5. 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>.
6. Романюк, Ф. А. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в цифровых измерительных органах защит с коррекцией динамической погрешности / 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>.
7. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
8. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
9. Дэбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Дэбни, Т. Харман; пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.

10. Дьяконов, В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2011. 975 с.
11. Фабрикант, В. Л. Дистанционная защита / В. Л. Фабрикант. М.: Высш. шк., 1978. 215 с.
12. Атабеков, Г. П. Релейная защита высоковольтных сетей / Г. П. Атабеков. М.; Л.: ГЭИ, 1949. 424 с.

Поступила 30.06.2023

Подписана в печать 31.08.2023

Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
2. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electrical Power Systems. Relay Network Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
3. Novash V. I., Shmyhin V. V. (2004) Frequency Characteristics of Resistance Metering Units Operating Algorithms in Overhead Lines Digital Distance Protection Devices. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 15–23 (in Russian).
4. Tsigler G. (2000) *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. Wiley-VCH. 310.
5. 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).
6. 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).
7. Tchernykh I. V. (2011) *Modeling of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK-Press Publ.; Saint Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
8. Novash I. V., Romanyuk F. A., Rummyantsev V. Yu., Rummyantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor Current Protection: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, Belarusian National Technical University. 168 (in Russian).
9. Dabney J., Harman T. (2003) *Simulink 4. Secrets of Mastery*. Moscow, BINOM – Laboratoriya Znaniy Publ. 403 (in Russian).
10. Dyakonov V. P. (2011) *MATLAB and Simulink for Radio Engineers*. Moscow, DMK-Press Publ. 975 (in Russian).
11. Fabrikant V. L. (1978) *Distance Protection*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 215 (in Russian).
12. Atabekov G. P. (1949) *Relay Protection of High-Voltage Networks*. Moscow; Leningrad, State Publishing House of Literature on Energy. 424 (in Russian).

Received: 30.06.2023

Accepted: 31.08.2023

Published online: 29.09.2023