

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-317-325>

УДК 621.316.925

Принципы выполнения цифрового органа направления мощности в микропроцессорных токовых защитах

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. А. Романюк,
канд. техн. наук, доц. В. Ю. Румянцев¹⁾,
канд. техн. наук Ю. В. Румянцев¹⁾, канд. техн. наук, доц. Е. А. Дерюгина¹⁾,
инж. П. И. Климович¹⁾

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

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

Реферат. В существующих микропроцессорных направленных токовых защитах линий от междуфазных коротких замыканий используются цифровые органы направления мощности, включаемые, как правило, на полные токи и напряжения по так называемой 90-градусной схеме. При данной схеме включения «мертвая» зона появляется только при близких к месту установки защиты трехфазных коротких замыканиях, составляющих небольшую долю всех возможных видов таких повреждений. Тем не менее ее наличие является существенным недостатком органов направления мощности. Рассмотрены принципы выполнения органа на основе цифровых операций с ортогональными составляющими подводимых напряжений и тока. Результат функционирования органа направления мощности сводится к выработке информационного признака, равного: единице – при прямом направлении мощности; минус единице – при ее обратном направлении. Для устранения «мертвой» зоны организована работа органа с использованием «памяти» напряжения. С целью получения требуемой длительности «памяти» реализована частотная компенсация. Исследование эффективности принятых решений, а также поведения органа направления мощности в нормальном и аварийных режимах выполнено методом вычислительного эксперимента. В системе динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems разработаны модели электрической системы и цифрового органа направления мощности. Результаты исследований показали, что совместное использование существующих и предложенных принципов выполнения цифрового органа направления мощности обеспечивает повышение его технического совершенства и позволяет устранить «мертвую» зону с сохранением его устойчивого функционирования в течение сколь угодно длительного промежутка времени.

Ключевые слова: цифровой орган направления мощности, ортогональные составляющие, цифровые фильтры Фурье, микропроцессорная токовая направленная защита, работа по «памяти», угол максимальной чувствительности, MATLAB-Simulink-SimPowerSystems

Для цитирования: Принципы выполнения цифрового органа направления мощности в микропроцессорных токовых защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 4. С. 317–325. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-317-325>

Principles for Implementation of Digital Power Direction Control in Microprocessor Current Protections

F. A. Romaniuk¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾, A. A. Dziaruhina¹⁾, P. I. Klimkovich¹⁾

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

Abstracts. In the existing microprocessor-based directional current protection lines from phase-to-phase short circuits, digital power direction elements are used, which, as a rule, are switched on at full currents and voltage according to the so-called 90-degree

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

pattern. With this switching scheme, a “dead” zone appears only in case of three-phase short circuits close to the protection installation site, which make up a small fraction of all possible types of such damage. Nevertheless, its presence is a significant drawback of the power direction organs. The principles of organ execution based on digital operations with orthogonal components of input voltages and currents have been considered. The result of the functioning of the power direction body is reduced to the development of an information sign equal to: one – with the direct direction of power; minus one – when it is in the opposite direction. To eliminate the “dead” zone, the work of the organ is organized using the voltage “memory”. In order to obtain the required duration of the “memory”, frequency compensation is implemented. The study of the effectiveness of the decisions made, as well as the behavior of the power direction control in normal and emergency modes, has been carried out by the method of a computational experiment. In the MATLAB-Simulink-SimPowerSystems dynamic simulation system, models of the electrical system and a digital power direction control have been developed. The results of the research have shown that the joint use of the existing and proposed principles for the implementation of a digital power direction control ensures an increase in its technical perfection and eliminates the “dead” zone while maintaining its stable operation for an arbitrarily long period of time.

Keywords: digital power direction control, orthogonal components, Fourier digital filters, microprocessor current directional protection, work from memory, maximum sensitivity angle, MATLAB-Simulink-SimPowerSystems

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A., Klimkovich P. I. (2023) Principles for Implementation of Digital Power Direction Control in Microprocessor Current Protections. *Science and Technique*. 22 (4), 317–325. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-317-325> (in Russian)

Введение

В микропроцессорных токовых направленных защитах линий электропередачи от междофазных коротких замыканий (КЗ) используются цифровые органы направления мощности (ОНМ), включаемые, как правило, на полные токи и напряжения [1]. Наиболее рациональной при этом признается так называемая 90-градусная схема, в которой к обмотке однофазного ОНМ подводится линейное напряжение двух фаз и фазный ток третьей фазы. При данной схеме включения «мертвая» зона может появляться только при близких к месту установки защиты трехфазных КЗ, составляющих небольшую долю всех возможных видов таких повреждений. Тем не менее ее наличие является существенным недостатком ОНМ.

В существующих микропроцессорных защитах ОНМ представляет собой «направленное» цифровое реле, которое не срабатывает при КЗ вне зоны действия защиты и срабатывает, когда КЗ возникает в «прямом» направлении, т. е. в направлении зоны работы защиты [2].

Для определения указанного направления современные ОНМ используют фазовый угол между подводимыми к нему напряжением и током КЗ [3].

Следует отметить, что непосредственный расчет фаз напряжения и тока для вычисления этого угла не является удобным вследствие необходимости получения двух обратных тригонометрических функций. Более рациональным представ-

ляется метод анализа векторных соотношений соответствующих величин с использованием их ортогональных составляющих (ОС) [4].

Теоретические предпосылки

В основе определения направления мощности по ОС подводимых к ОНМ напряжению и току лежат следующие теоретические положения.

Для получения условия срабатывания ОНМ воспользуемся приведенной на рис. 1 векторной диаграммой при 90-градусной схеме включения, где \vec{U} – вектор подводимого линейного напряжения двух фаз, начальная фаза которого ϕ_u ; \vec{I} – то же подведенного фазного тока с начальной фазой ϕ_i . Вектор $\vec{U}e^{\phi_{мч}}$ образован путем поворота вектора \vec{U} на угол $\phi_{мч}$, называемый углом максимальной чувствительности ОНМ, который обеспечивает достоверное определение направления мощности при минимальных значениях напряжения и тока.

Направление мощности определяется по нахождению угла Ψ между векторами \vec{I} и $\vec{U}e^{\phi_{мч}}$

$$\Psi = \phi_u - \phi_i - \phi_{мч} \quad (1)$$

в соответствующем диапазоне.

Если $-\frac{\pi}{2} < \Psi < \frac{\pi}{2}$, то направление мощности прямое и ОНМ должен срабатывать, в противном случае мощность имеет обратное направление, а ОНМ подлежит блокировке.

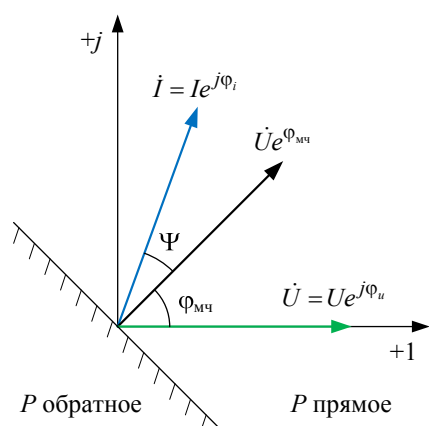


Рис. 1. Векторная диаграмма органов направления мощности при 90-градусной схеме включения

Fig. 1. Vector diagram of power direction control at 90-degree switching circuit

Для фиксации нахождения Ψ в указанном диапазоне можно использовать значение $\cos\Psi$, которое, как вытекает из (1), определяется по выражению

$$\cos\Psi = (\cos\phi_u \cos\phi_i + \sin\phi_u \sin\phi_i) \cos\phi_{мч} + (\sin\phi_u \cos\phi_i - \cos\phi_u \sin\phi_i) \sin\phi_{мч}. \quad (2)$$

Для определения направления мощности достаточно знать знак косинуса угла Ψ . Поэтому в качестве информационного параметра, позволяющего фиксировать указанное направление, можно использовать признак

$$P = \text{sign}(\cos\Psi) \cdot 1. \quad (3)$$

Принимая во внимание [5], что $\cos\phi_u = \frac{u_c}{U_m}$,

$\sin\phi_u = \frac{u_s}{U_m}$, $\cos\phi_i = \frac{i_c}{I_m}$, $\sin\phi_i = \frac{i_s}{I_m}$, после их подстановки в (2) получим

$$\cos\Psi = \frac{1}{U_m I_m} (u_c i_c + u_s i_s) \cos\phi_{мч} + \frac{1}{U_m I_m} (u_s i_c - u_c i_s) \sin\phi_{мч}, \quad (4)$$

где U_m , I_m – амплитудные значения напряжения и тока соответственно; u_c , i_c ; u_s , i_s – мгновенные значения соответственно косинусных и синусных ОС напряжения и тока.

Переходя от непрерывных величин в выше-приведенных выражениях к их выборкам в дискретные моменты времени t_n ($n = 1, 2, \dots, N$), руководствуясь (3), (4) и учитывая, что $U_m I_m > 0$, будем иметь

$$P_n = \text{sign} \left[(u_{cn} i_{cn} + u_{sn} i_{sn}) \cos\phi_{мч} + (u_{sn} i_{cn} - u_{cn} i_{sn}) \sin\phi_{мч} \right] \cdot 1. \quad (5)$$

При известном $\phi_{мч}$ значения $\cos\phi_{мч}$ и $\sin\phi_{мч}$ могут быть заданы как постоянные коэффициенты.

В конечном итоге результат функционирования ОНМ сводится к следующему:

- при $P_n = 1$ – направление мощности прямое;
- при $P_n = -1$ – обратное.

Если выражение, заключенное в квадратные скобки, в формуле (5) приобретает нулевое значение, то это свидетельствует об отсутствии одного или двух сигналов, что может быть использовано в системе контроля исправности входных цепей.

Необходимо иметь в виду, что при близких к месту установки защиты КЗ подводимое к ОНМ напряжение может быть очень малым (теоретически нулевым). Это обуславливает «мертвую» зону, достоверное определение направления мощности в которой невозможно. В цифровых ОНМ пороговое линейное напряжение указанной зоны устанавливается на уровне 1 В [6]. Следует отметить, что это значение напряжения гарантирует вполне достаточную помехоустойчивость органа.

Для устранения «мертвой» зоны может быть организована работа ОНМ по «памяти». Наиболее эффективным представляется обеспечение функционирования ОНМ в «мертвой» зоне с использованием «памяти» напряжения, поскольку обеспечивается практически непрерывное определение направления мощности.

Однако следует отметить, что длительное сохранение опорного напряжения требует частотной компенсации, так как любое отклонение частоты системы от номинальной повлечет за собой угловое изменение характеристики направленности и приведет к неустойчивой работе ОНМ.

Для быстросрабатывающих ступеней токовых направленных защит требуется ОНМ с памятью в течение примерно 100 мс, а для резервных ступеней – до 2 с.

В алгоритме функционирования ОНМ на основе изложенных выше теоретических предпосылок в качестве исходной информации выступают выборки подводимых напряжения u_n и тока i_n ($n = 1, 2, \dots, N$). При этом из входных сигналов u_n, i_n с помощью нерекурсивных цифровых фильтров (ЦФ) Фурье или их модификаций [7, 8] выделяются косинусные u_{cn}, i_{cn} и синусные u_{sn}, i_{sn} ОС основных гармоник, которые непосредственно используются в процессе выполнения операций алгоритма ОНМ.

Для реализации частотной компенсации при работе ОНМ по «памяти» по трем смежным выборкам синусной либо косинусной ОС тока $i_{on}, i_{o(n-1)}, i_{o(n-2)}$ вычисляется косинус фазового угла выборок по выражению [9]

$$\cos(\omega\Delta t)_n = \frac{i_{on} + i_{o(n-2)}}{2i_{o(n-1)}}. \quad (6)$$

Если на данном шаге $i_{o(n-1)}$ близко к нулю,

что проверяется выполнением условия $\frac{|i_{o(n-1)}|}{I_{mn}} < i_{*min}$, где I_{mn} – амплитуда тока; i_{*min} – относительное минимальное значение выборки тока, то $\cos(\omega\Delta t)_n$ не вычисляется, а ему присваивается значение с предыдущего шага $\cos(\omega\Delta t)_n = \cos(\omega\Delta t)_{(n-1)}$, в противном случае проверяется, не выходит ли величина косинуса за пределы диапазона, граничные значения которого определяются выбранными частотами. При необходимости косинус фазового угла выборок устанавливается на уровне ближайшего граничного значения. Затем вычисляется синус фазового угла выборок с учетом, что $\omega\Delta t < \frac{\pi}{2}$:

$$\sin(\omega\Delta t)_n = \sqrt{1 - \cos^2(\omega\Delta t)_n}. \quad (7)$$

Если амплитуда подводимого напряжения $U_{mn} = \sqrt{u_{sn}^2 + u_{cn}^2}$ превышает пороговое напряжение $U_{mmin} = 1,4$ В [6], то это свидетельствует

о том, что ОНМ не находится в «мертвой» зоне и функционирует в обычном режиме с определением признака P по (5) с использованием ОС $u_{cn}, u_{sn}, i_{cn}, i_{sn}$.

При $U_{mn} \leq U_{mmin}$ ОНМ переводится в режим работы по «памяти». Так как используется «память» напряжения, выборки ОС напряжения в этом режиме u_{sxn}, u_{cxn} вычисляются в соответствии с приведенными в [9] выражениями по их значениям с предыдущего шага $u_{sx(n-1)}, u_{cx(n-1)}$:

$$u_{sxn} = u_{sx(n-1)} \cos(\omega\Delta t)_n + u_{cx(n-1)} \sin(\omega\Delta t)_n; \quad (8)$$

$$u_{cxn} = u_{cx(n-1)} \cos(\omega\Delta t)_n - u_{sx(n-1)} \sin(\omega\Delta t)_n.$$

В этом случае признак P определяется по (5) с использованием ОС напряжения u_{sxn}, u_{cxn} и тока i_{cn}, i_{sn} .

Оценка качества функционирования и эффективности ОНМ на основе изложенных принципов действия выполнена с использованием метода вычислительного эксперимента.

Моделирование

В системе динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems [10] реализована структура модели для испытаний рассмотренного выше цифрового ОНМ, которая позволяет исследовать процессы в электроэнергетической системе с двусторонним питанием. Она включает в себя: модели двух энергосистем с возможностью задания у них произвольных значений частот, двух линий электропередачи с нагрузками, модели трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН), блоки задания вида КЗ, а также модель испытуемого ОНМ. За исключением последней модели, реализация всех указанных блоков подробно рассмотрена в [11].

Цифровой ОНМ моделируется согласно приведенным выше выражениям в виде отдельной подсистемы, в которой, согласно [12], формируются эквивалентные ОС фазного тока и линейного напряжения, а также вычисляется в относительных единицах признак P . Кроме того, в модели реализована возможность работы ОНМ по «памяти», необходимость в кото-

рой возникает в том случае, когда уровень подводимого к ОНМ амплитудного значения вторичного напряжения U_{mn} становится ниже предварительно заданного минимального уровня $U_{m\min}$, принятого для наглядности в настоящей работе равным 5 В.

Еще одним параметром, который сложно контролировать в реальном устройстве, является угол $\Delta\varphi = \Psi + \varphi_{\text{мч}}$ между векторами напряжения и тока, подводимых к ОНМ. В модели для этой цели используются стандартные библиотечные блоки *Discrete Fourier*, позволяющие определять значение разности фаз $\Delta\varphi$, которое в переходных режимах можно сглаживать усредняющим частотным фильтром.

Результаты исследования

Функционирование модели цифрового ОНМ проверялось в различных режимах работы электроэнергетической системы. Для этих целей использовались токи и напряжения, приближенные к реальным вторичным сигналам соответствующих измерительных трансформаторов, и только для определения зоны действия ОНМ применялись синусоидальные тестовые воздействия.

1. Определение зоны действия ОНМ

В работе исследовался цифровой ОНМ с углом максимальной чувствительности $\varphi_{\text{мч}} = 45^\circ$, расчетная зона действия которого лежит в диапазоне от -45° до 135° .

Входные сигналы ОНМ – синусоидальные ток 1 и напряжение 2 с частотой 50 Гц. В нормальном режиме уровни тока и напряжения составляют соответственно 0,1 и 1 о. е. При КЗ,

которое длится от 0,1 с до 0,2 с, величина тока увеличивается до 1 о. е., а значение напряжения уменьшается до 0,2 о. е.

При угле 135° наблюдается неустойчивая работа ОНМ (рис. 2). Признак P , для наглядности умноженный на 100 (кривая 3), многократно меняет знак, хотя усредненное значение разности фаз $\Delta\varphi$ (кривая 1) находится в зоне срабатывания. При уменьшении угла на 1° (до 134°) действие ОНМ становится стабильным. Аналогичные процессы происходят и с противоположной стороны зоны действия ОНМ.

Таким образом, реальная зона стабильной работы ОНМ в прямом направлении лежит в пределах от -44° до 134° , то есть составляет 178° , причем снижение частоты сети не изменяет зону действия ОНМ.

2. Реакция ОНМ на трехфазное КЗ в прямом и обратном направлениях

Входные сигналы тока (кривая 1) и напряжения (кривая 2) частотой 50 Гц приближены к реальным воздействиям в нагрузочных режимах и при трехфазных КЗ (рис. 3а). В моменты времени 0–0,2 с; 0,4–0,6 с; 0,8–1,0 с моделируются режимы нагрузки, в моменты времени 0,2–0,4 с – трехфазное удаленное КЗ в обратном направлении, а в моменты 0,6–0,8 с – воспроизводится трехфазное удаленное КЗ в прямом направлении.

На рис. 3б приведены временные характеристики ОНМ. Как видно из рисунка, срабатывание ОНМ происходит только при КЗ в прямом направлении (кривая 3) и не происходит при КЗ за «спиной» ОНМ.

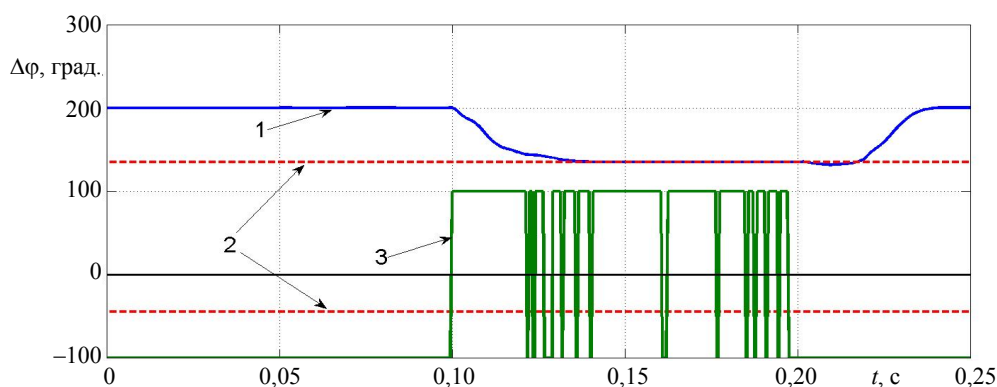


Рис. 2. Поведение органов направления мощности на границе срабатывания: 1 – разность фаз $\Delta\varphi$; 2 – диапазон углов от -45° до 135° , при которых ОНМ срабатывает; 3 – признак P

Fig. 2. Behavior of power direction control at pickup limit: 1 – phase difference $\Delta\varphi$; 2 – angle range from -45° to 135° , at which power direction control operates; 3 – sign P

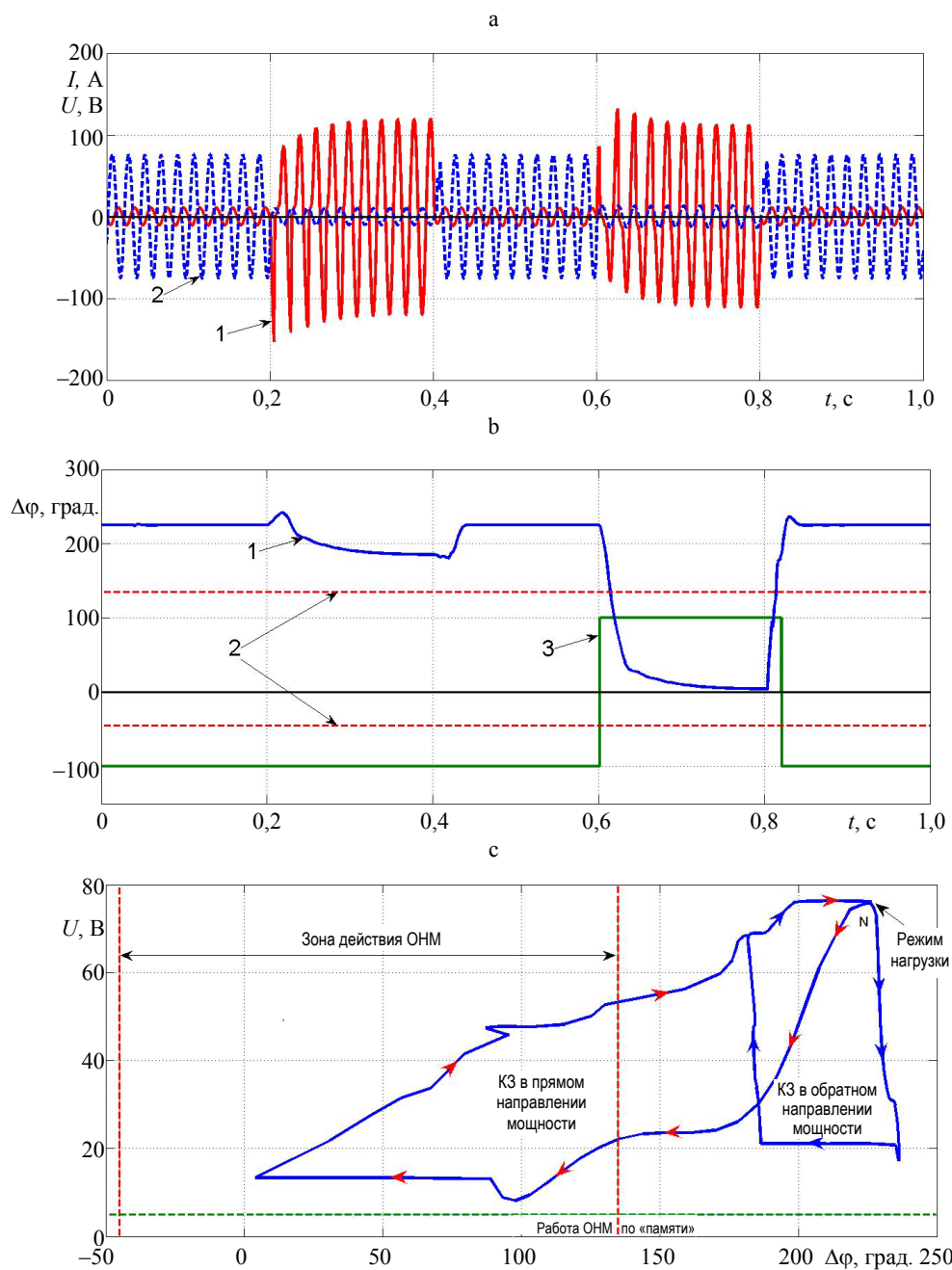


Рис. 3. а – удаленные трехфазные КЗ в обратном и прямом направлениях: 1 – ток; 2 – напряжение;
 б – временные характеристики органов направления мощности: 1 – разность фаз $\Delta\phi$;
 2 – диапазон углов от -45° до 135° , при которых ОНМ срабатывает; 3 – признак P ; с – траектория рабочей точки

Fig. 3. a – remote three-phase short circuits in reverse and forward directions: 1 – current; 2 – voltage;
 б – time characteristics of power direction controls: 1 – phase difference $\Delta\phi$;
 2 – angle range from -45 to 135 , at which power direction control operates; 3 – sign P ; с – operating point trajectory

На рис. 3с представлена траектория движения рабочей точки, воспроизводящей зависимость амплитуды вторичного напряжения U_{\max} от разности фаз между током и напряжением $U_{\max} = f(\Delta\phi)$. Траектория рабочей точки зависит от режима энергосистемы. В нагрузочном режиме U_{\max} и $\Delta\phi$ не изменяются и поэтому рабочая точка

остается неподвижной (точка N). При КЗ в обратном направлении мощности движение рабочей точки происходит по замкнутому контуру, который не попадает в зону действия ОНМ. В случае прямого направления мощности ($t = 0,6-0,8$ с на рис. 3а) траектория движения рабочей точки имеет форму петли, которая входит в зону дей-

ствия ОНМ (пунктирные линии, соответствующие диапазону углов от -45° до 135°) в начальный момент КЗ и выходит из нее при его исчезновении. Направление перемещения рабочей точки при обоих видах КЗ обозначено стрелками.

3. Удаленное КЗ в прямом направлении при различных частотах сети

Входные сигналы тока 1 и напряжения 2 приведены на рис. 4а. Трехфазное КЗ происходит в моменты времени от 0,1 до 0,3 с, при этом сравнивается поведение ОНМ при частотах 50 и 48 Гц.

На рис. 4б, по аналогии с рис. 3с, представлены траектории перемещения рабочей точки при частоте 50 Гц (кривая 1) и 48 Гц (кривая 2). Начало и окончание перемещения – правый верхний угол рисунка, где располагается нагрузочный режим. Обе петли входят в зону срабатывания, что свидетельствует о частотонезависимости функционирования ОНМ.

4. Близкое КЗ в прямом направлении при различных частотах сети

Трехфазное КЗ на шинах, где установлен ОНМ, происходит в момент времени $t = 0,1$ с (рис. 5а). Напряжение, подводимое к ОНМ, становится меньше U_{\min} , которое для наглядности принято $U_{\min} = 5$ В. Запоминаются параметры предаварийного режима при частоте 50 Гц и вырабатывается признак работы по «памяти» (кривая 4). При этом признак P (кривая 3) больше нуля и держится на этом уровне все время существования КЗ.

На рис. 5б представлены траектории перемещения рабочей точки при работе ОНМ по «памяти» на частотах 50 Гц (кривая 1) и 48 Гц (кривая 2). Предполагается, что аварийный и предаварийный режимы происходят при одинаковых частотах. Признак P для этих режимов находится в зоне действия ОНМ на протяжении всего времени существования КЗ. При этом траектории рабочих точек в обоих случаях попадают в зону работы ОНМ по «памяти».

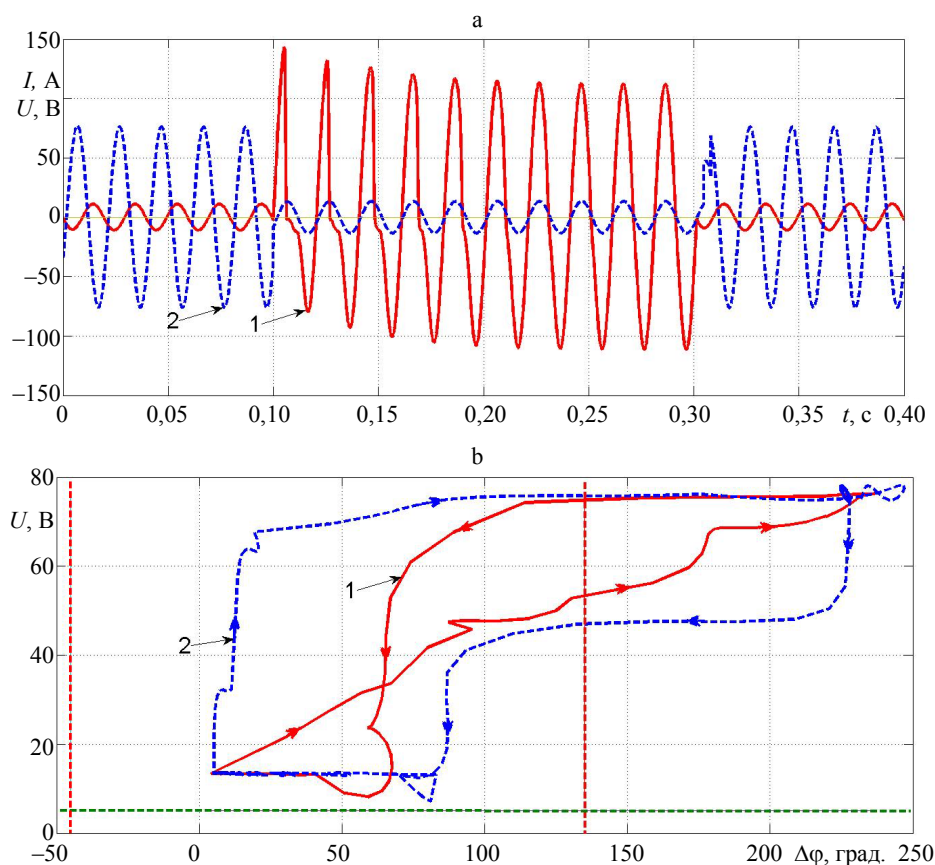


Рис. 4. а – входные сигналы, приближенные к реальным воздействиям: 1 – тока, 2 – напряжения; б – траектории рабочих точек: 1 – при 50 Гц; 2 – при 48 Гц

Fig. 4. a – input signals close to real impacts: 1 – current; 2 – voltage; б – operating point trajectory: 1 – at 50 Hz; 2 – at 48 Hz

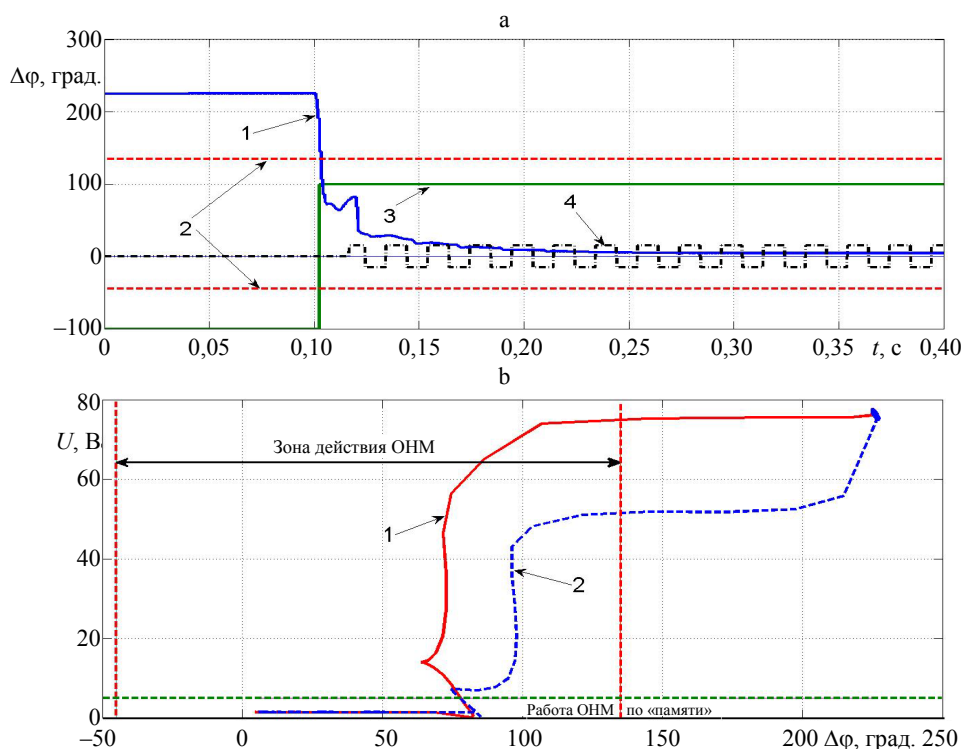


Рис. 5. а – работа по «памяти» ОНМ при близком трехфазном КЗ; б – сравнение действия ОНМ при близких КЗ и различных частотах: 1 – 50 Гц; 2 – 48 Гц

Fig. 5. а – “memory” operation of the power direction control in the event of a close three-phase short circuit; б – comparison of the action of the power directional control at close short circuits and different frequencies: 1 – 50 Hz; 2 – 48 Hz

Более реалистичный случай работы по «памяти» представлен на рис. 6. По-прежнему моделируется близкое КЗ в прямом направлении, возникающее в момент времени 0,2 с (кривая 1), однако частоты сети в аварийном и предаварийном режимах – разные. При КЗ, когда происходит работа по «памяти», частота снижается до 48 Гц. В этом случае использование отсчетов напряжений U_{mn} для вычислений косинуса и синуса фазового угла выборок на всем протяжении работы по «памяти» будет приводить к накоплению

ошибки, связанной с различием запомненных при частоте 50 Гц параметров и их текущими значениями при пониженной частоте. При этом, в отличие от выборок напряжений, выборки токов за все время КЗ остаются на приемлемом уровне для получения достоверных значений указанных величин, определяемых по формулам (6) и (7). Как видно из рис. 6, использование выборок тока позволяет ОНМ оставаться работоспособным все время существования КЗ, независимо от его длительности (кривая 2).

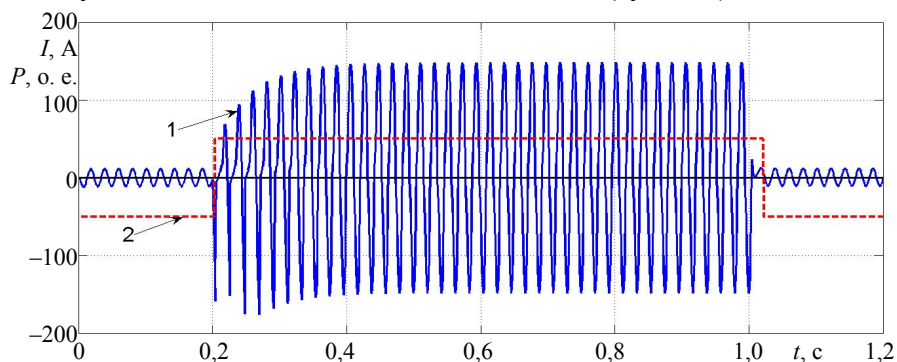


Рис. 6. Работа ОНМ по «памяти» при близком трехфазном КЗ: 1 – вторичный ток ТТ частотой 50 Гц в нормальном режиме и 48 Гц при КЗ; 2 – признак P

Fig. 6. “Memory” operation of the power direction control in the event of a close three-phase short circuit: 1 – secondary current of the current transformer with a frequency of 50 Hz in normal mode and 48 Hz in the event of of a short circuit; 2 – sign P

ВЫВОД

Совместное использование существующих и предложенных принципов выполнения цифрового органа направления мощности в микропроцессорных токовых защитах линий обеспечивает повышение его технического совершенства и позволяет устранить «мертвую» зону с сохранением устойчивого функционирования в течение сколь угодно длительного промежутка времени благодаря реализации частотной компенсации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд, Я. С. Релейная защита распределительных сетей / Я. С. Гельфанд. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987. 368 с.
2. Фадке Арун, Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / Арун Г. Фадке, Джеймс С. Торп; пер. с англ. под ред. Г. С. Нудельмана. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
3. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
4. Гурьянчик, О. А. Организация функционирования органа направления мощности в микропроцессорных токовых направленных защитах / О. А. Гурьянчик // Наука и техника. 2013. № 3. С. 56–58.
5. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок: учеб. пособие / Ф. А. Романюк. Минск: УП «Технопринт», 2001. 133 с.
6. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / Г. Циглер; пер. с англ. под ред. А. Ф. Дьякова. М.: Энергоиздат. 2005. 322 с.
7. 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>.
8. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
9. Романюк, Ф. А. Способы формирования ортогональных составляющих входных сигналов для релейной защиты / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, В. С. Каченя // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14>.
10. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
11. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. – Минск: БНТУ, 2021. 168 с.
12. Романюк, Ф. А. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев, // 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. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.

Поступила 18.04.2023

Подписана к печати 20.06.2023

Опубликована онлайн 31.07.2023

REFERENCES

1. Gelfand Ya. S. (1987) *Relay Protection of Distribution Networks*. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 368 (in Russian).
2. Phadke A. G., Thorp J. S. (2009) *Computer Relaying for Power Systems*. John Wiley & Sons. 344. <https://doi.org/10.1002/9780470749722>.
3. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems. Relay Protection of Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
4. Gurianchik O. A. (2013) Organization of Power Directional Element Operation in Micro-Processor Current Directional Protections. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 56–58 (in Russian).
5. Romaniuk F. A. (2001) *Information Support for Microprocessor Protection of Electrical Installations*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 133 (in Russian).
6. Ziegler G. (2006) *Numerical Distance Protection: Principles and Applications*. 2nd ed. Publicis Corporate Pub., Publicis. 378.
7. 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).
8. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
9. Romaniuk F. A., Loman M. S., Kachenya V. S. (2019) Methods of Forming Orthogonal Components of Input Signals for Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-5-14> (in Russian).
10. Chernykh I. V. (2011) *Modeling Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems u Simulink*. Moscow, DMK Press Publ.; Saint Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
11. Novash I. V., Romanyuk F. A., Rumyantsev V. Yu., Rumyantsev Yu. V. (2021) *Testing of Microprocessor Current Protection: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, Belarusian National Technical University. 168 (in Russian).
12. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. A., 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).

Received: 18.04.2023

Accepted: 20.06.2023

Published online: 31.07.2023