

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-411-422>

УДК 621.316.925

Формирование мгновенных дифференциальных и тормозных токов дифференциальной защиты сборных шин

В. С. Каченя¹⁾, М. С. Ломан¹⁾

¹⁾ОАО «Белэлектромонтажналадка» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Рассмотрены способы формирования тормозных и дифференциальных токов для дифференциальной защиты шин, их преимущества и недостатки. Отмечено, что дифференциальная защита по мгновенным значениям имеет меньшее собственное время срабатывания, чем по действующим, поскольку не использует цифровые фильтры. Исследованы характеристика срабатывания и принципы выбора уставок. Проанализировано влияние дискретизации на работу дифференциальной защиты по мгновенным значениям. Выявлено, что без применения специальных мер в зависимости от шага дискретизации и частоты сигнала ток срабатывания будет колебаться в пределах математической погрешности, вызываемой дискретизацией. Предложено решение данной проблемы. Способ заключается в применении кусочно-квадратической интерполяции и в определении значений точек перегиба сигналов мгновенного дифференциального и тормозного токов. Произведена оценка эффективности предложенного способа. Установлено, что его использование уменьшает погрешность определения тока срабатывания. Для синусоидального сигнала максимально возможная погрешность составила 0,02 %. Проанализированы траектории движения рабочих точек дифференциальной защиты при внешнем коротком замыкании с насыщением трансформаторов тока. В данном режиме защита по мгновенным значениям более подвержена ложным срабатываниям, чем по действующим. Рассмотрен и исследован метод экспоненциального сглаживания тормозного тока. Предложен и проанализирован алгоритм экспоненциального сглаживания. Сделан вывод, что экспоненциальное сглаживание повышает устойчивость дифференциальной защиты по мгновенным значениям к внешним коротким замыканиям. Экспоненциальное сглаживание не исключает возможность ложного срабатывания дифференциальной защиты при внешних коротких замыканиях.

Ключевые слова: дискретизация, векторные значения, мгновенные значения, ошибка дискретизации, дифференциальная защита шин, дифференциальный ток, тормозной ток, экспоненциальное сглаживание, характеристика дифференциальной защиты, интерполяция, пиковый фиксатор

Для цитирования: Каченя, В. С. Формирование мгновенных дифференциальных и тормозных токов дифференциальной защиты сборных шин / В. С. Каченя, М. С. Ломан // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 5. С. 411–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-411-422>

Адрес для переписки

Каченя Владислав Станиславович
ОАО «Белэлектромонтажналадка»
ул. Плеханова, 105а
220101, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 368-09-05
v.s.kachenya@gmail.com

Address for correspondence

Kachenya Vladislav S.
JSC “Belelektromontazhnaladka”
105a, Plekhanov str.,
220101, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 368-09-05
v.s.kachenya@gmail.com

Formation of Instantaneous Differential and Restraining Currents for Differential Protection of Busbar Assemblies

V. S. Kachenya¹⁾, M. S. Loman¹⁾

¹⁾JSC “Belelektromontazhnaladka” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The methods of forming differential and restraining currents for busbar differential protection are reviewed; their advantages and disadvantages are considered. It is noted that differential protection according to instantaneous values has a shorter proper response time than for current ones, since it does not use digital filters. The response characteristic and principles of setting selection are studied. The effect of sampling on the operation of differential protection according to instantaneous values is analyzed. It was found that without the use of special measures, depending on the sampling step and the frequency of the signal, the response current would fluctuate within the mathematical error caused by sampling. A solution to this problem has been proposed. The method consists in applying piecewise quadratic interpolation and determining the values of inflection points of instantaneous differential and restraining current signals. The efficiency of the proposed method has been evaluated. It was found that its use reduces the error in determining the response current. For a sinusoidal signal, the maximum possible error was 0.02 %. The trajectories of operating points of differential protection in case of external fault with saturation of current transformers have been analyzed. In this mode, protection for instantaneous values is more susceptible to false positives than for active ones. The method of exponential smoothing of the restraining current was considered and investigated. An exponential smoothing algorithm has been proposed and analyzed. It is concluded that exponential smoothing increases the stability of the differential protection according to instantaneous values to external faults. Exponential smoothing does not exclude the possibility of false positive of differential protection in case of external fault.

Keywords: sampling, vector values, instantaneous values, sampling error, busbar differential protection, differential current, restraining current, exponential smoothing, differential protection characteristic, interpolation, peak values hold element

For citation: Kachenya V. S., Loman M. S. (2020) Formation of Instantaneous Differential and Restraining Currents for Differential Protection of Busbar Assemblies. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (5), 411–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-5-411-422> (in Russian)

Введение

Сборные шины – один из наиболее ответственных объектов силовых электрических сетей. Короткие замыкания (КЗ) на сборных шинах обычно сопровождаются большими токами и требуют быстрой и селективной ликвидации. Для этих целей лучшим образом подходит дифференциальная токовая защита, которая является защитой с абсолютной селективностью и, как правило, выполняется без выдержек времени [1]. Для работы дифференциальной токовой защиты необходимо вычислять дифференциальный и тормозной токи на основании токов присоединений, входящих в зону защиты. Расчет дифференциальных и тормозных токов может выполняться по векторным и мгновенным величинам.

Для получения векторных значений необходимы предварительная аналоговая фильтрация входного сигнала, дискретизация полученного сигнала и цифровая фильтрация дискретизированного сигнала [2]. Процесс цифровой фильтрации носит инерционный характер. Степень инерционности зависит от набора коэффициентов цифровых фильтров и шага дискретизации. Как правило, время цифровой фильтрации для сетей с частотой 50 Гц

составляет не менее 20 мс [3]. Таким образом, при реализации измерительного органа по векторным значениям время устранения КЗ определяется инерционностью цифровых фильтров.

При определении мгновенных величин достаточно производить аналоговую фильтрацию и дискретизацию входного сигнала. Следовательно, измерительный орган дифференциальной защиты сборных шин (ДЗШ) по мгновенным значениям имеет меньшее время срабатывания, чем по действующим. Мгновенные величины носят дискретно-периодический характер и получаются из выходного сигнала трансформатора тока (ТТ), что необходимо учитывать при реализации ДЗШ. В статье рассматривается способ формирования тормозных и дифференциальных токов для измерительного органа ДЗШ по мгновенным значениям.

Принцип работы дифференциальных защит

Принцип работы дифференциальных защит основан на первом правиле Кирхгофа [4]. Следствием данного правила является то, что в нормальном режиме или при внешнем КЗ сумма токов плеч узла электрической сети равна нулю (рис. 1а), а при внутреннем – току короткого замыкания $i_{КЗ}$ (рис. 1б).

Модуль суммарного тока всех плеч принято называть дифференциальным током. Его величина может рассчитываться как по мгновенным, так и по векторным значениям [5]:

$$i_{Д} = |i_1 + i_2 + \dots + i_n|; \quad (1)$$

$$I_{Д} = |\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \dots + \underline{I}_n|, \quad (2)$$

где i_1, i_2, i_n – мгновенное значение тока плеч, входящих в защищаемый объект; $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_n$ – векторное значение тока плеч, входящих в защищаемый объект; $i_{Д}, I_{Д}$ – мгновенный и действующий дифференциальные токи.

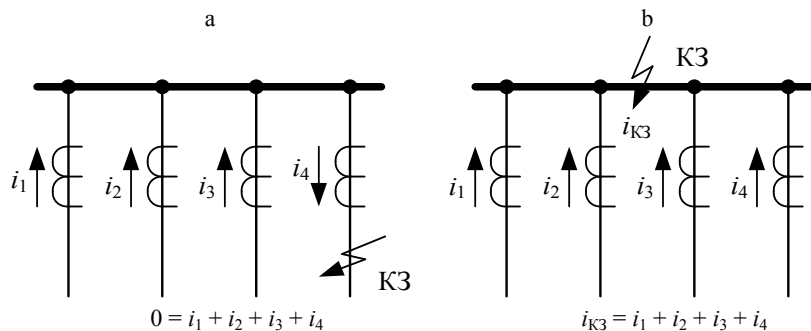


Рис. 1. Направления токов плеч сборных шин при коротком замыкании:
а – внешнем; б – внутреннем

Fig. 1. Directions of busbar assemblies arm currents in case of fault:
a – external; b – internal

Для повышения устойчивости защиты к внешним КЗ производят торможение. Тормозной ток определяется по мгновенным и векторным величинам:

$$i_T = |i_1| + |i_2| + \dots + |i_n|; \quad (3)$$

$$I_T = |I_1| + |I_2| + \dots + |I_n|, \quad (4)$$

где i_T , I_T – мгновенное и действующее значения тормозного тока.

Сравнивая по определенным правилам значения токов i_D и i_T либо I_D и I_T , реализуют ДЗШ по мгновенным или действующим значениям соответственно.

Характеристика срабатывания дифференциальной защиты шин

Производить анализ работы ДЗШ можно с использованием двумерной плоскости [5], на которой строится характеристика срабатывания и анализируется поведение рабочей точки. В соответствии с рис. 2 на оси абсцисс располагаются значения тока I_T , а на оси ординат I_D . Координаты точек I_T и I_D для конкретного момента времени называются рабочими точками.

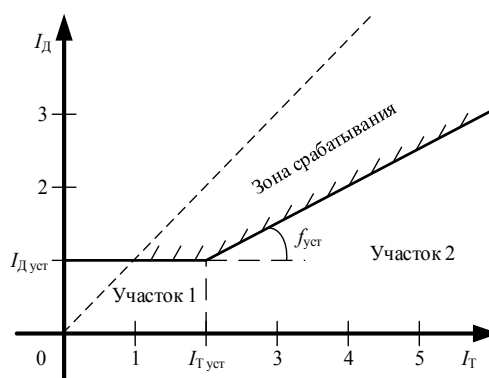


Рис. 2. Характеристика срабатывания дифференциальной защиты шин

Fig. 2. The response characteristic of busbar differential protection

Зона срабатывания формируется характеристикой срабатывания, которая имеет два участка:

– участок 1 определяется уставками $I_{Dуст}$, $I_{Tуст}$ и учитывает небаланс нагрузочного режима. В общем случае $I_{Dуст}$ и $I_{Tуст}$ отстраиваются от тока наиболее нагруженного присоединения таким образом, чтобы при обрыве токовых цепей не произошло ложное срабатывание защиты;

– участок 2 определяется погрешностью ТТ и использует торможение [6]. Интенсивность торможения регулируется углом наклона $f_{уст}$, который выбирается исходя из характеристик ТТ.

Условия срабатывания можно описать логическим выражением

$$I_D \geq I_{Dуст} \ \& \ I_D \geq \operatorname{tg}(f_{уст})(I_T - I_{Tуст}) + I_{Dуст}. \quad (5)$$

Интерполирование пиковых значений

Для функционирования микропроцессорных устройств требуется преобразование непрерывного аналогового сигнала в цифровой дискретный [7]. При дискретизации с высокой вероятностью теряется пиковое значение

ние (рис. 3). Данная ошибка приводит к колебанию величины срабатывания, что снижает надежность защиты. Для синусоидального сигнала значение погрешности определяется шагом дискретизации Δt и частотой переменного напряжения f

$$\varepsilon_{\sin} = (1 - \cos(\pi f \Delta t)) \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где ε_{\sin} – погрешность определения пикового значения модуля синусоидального сигнала, %; Δt – шаг дискретизации.

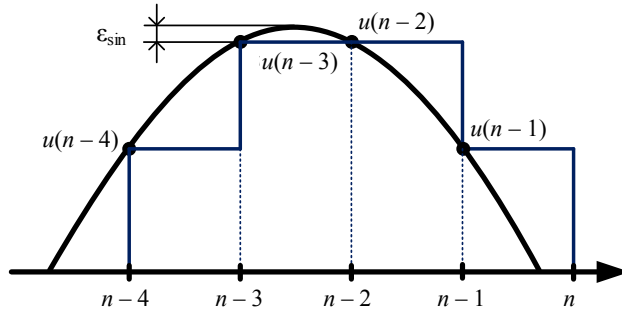


Рис. 3. Погрешность определения пикового значения:

n – номер отсчета; $u(n)$ – значение сигнала для выборки n , эквивалент $u(t)$

Fig. 3. Error of determining peak value:

n – sample number; $u(n)$ – signal value for n sample, the equivalent $u(t)$

В соответствии с (6) погрешность $\varepsilon_{\sin} = 1,23 \%$ для $\Delta t = 0,001$ мс и $\varepsilon_{\sin} = 0,86 \%$ для $\Delta t = 0,0008(3)$ мс. Чтобы минимизировать погрешность, необходимо определять пиковое значение входного сигнала. Данная задача решается применением кусочно-квадратической интерполяции [8]

$$u_i(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2, \quad (7)$$

где $u_i(t)$ – интерполированное значение; t – момент времени; a_0, a_1, a_2 – коэффициент интерполяции.

Коэффициенты интерполяции рассчитываются на основании трех последовательных выборок мгновенного сигнала и выражаются системой уравнений:

$$\begin{cases} u(t) = a_0 + a_1 t_2 + a_2 t_2^2; \\ u(t - \Delta t) = a_0 + a_1 t_1 + a_2 t_1^2; \\ u(t - 2\Delta t) = a_0 + a_1 t_0 + a_2 t_0^2, \end{cases} \quad (8)$$

где $t_2 > t_1 > t_0$ – время соответствующих выборок $u(t); u(t - \Delta t); u(t - 2\Delta t)$.

Приняв за начало отсчета $t_0 = 0$, на основании (8) получим:

$$\begin{cases} u(t) = a_0 + 2a_1 \Delta t + 4a_2 \Delta t^2; \\ u(t - \Delta t) = a_0 + a_1 \Delta t + a_2 \Delta t^2; \\ u(t - 2\Delta t) = a_0. \end{cases} \quad (9)$$

Из (9) можно выразить значения коэффициентов интерполяции:

$$\begin{cases} a_2 = \frac{0,5u(t) - u(t - \Delta t) - 0,5u(t - 2\Delta t)}{\Delta t^2}; \\ a_1 = \frac{-0,5u(t) + 2u(t - \Delta t) - 1,5u(t - 2\Delta t)}{\Delta t}; \\ a_0 = u(t). \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, для определения пиковой величины необходимы три последовательные выборки на перегибе функции. Это значение рассчитывается для точки экстремума функции (7). Время экстремума находится при дискриминанте (7), равной нулю:

$$t_{ext} = -\frac{a_1}{2a_2}, \quad (11)$$

где t_{ext} – момент времени пикового значения.

Полученное значение может не лежать в интерполируемом диапазоне, поэтому для корректного определения пиковой величины необходимо, чтобы время экстремума лежало в интерполируемом диапазоне:

$$2\Delta t > t_{ext} > \Delta t. \quad (12)$$

При выполнении неравенства (12) по (7) находится пиковое значение u_{ext} . Когда u_{ext} является точкой перегиба, будет истинным следующее условие:

$$\begin{aligned} \max(u(t), u(t - \Delta t), u(t - 2\Delta t)) \leq u_{ext} \quad \& \\ 1,1 \max(u(t), u(t - \Delta t), u(t - 2\Delta t)) \geq u_{ext}. \end{aligned} \quad (13)$$

В случае выполнения (12) и (13) значение u_{ext} принимается вместо $u(t - \Delta t)$.

Ниже представлен пример реализации описанной операции на языке MatLab [9] для $\Delta t = 0,001$ с:

```
function u = peak_value_fixing_fun(y1, y2, y3)
u = y2;
dt = 0.001;
t2 = dt;
t3 = 2 * dt;
a = (0.5 * y3 - y2 + 0.5 * y1) * 10.^6;
b = (-0.5 * y3 + 2 * y2 - 1.5 * y1) * 10^3;
c = y1;
x = -b / (2*a);
u_interpolation = 0;
u_max = max([y1 y2 y3]);
if t2 < x && x < t3
    u_interpolation = a * x * x + b * x + c;
else
    return;
end
if (u_interpolation > u_max && u_interpolation < u_max * 1.1)
    u = u_interpolation;
end
```

Реализация алгоритма фиксации пиковых значений для дискретизированного сигнала приведена на рис. 4.

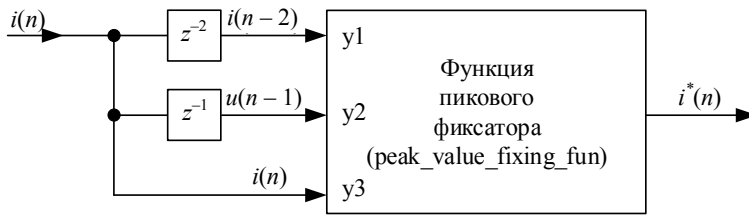


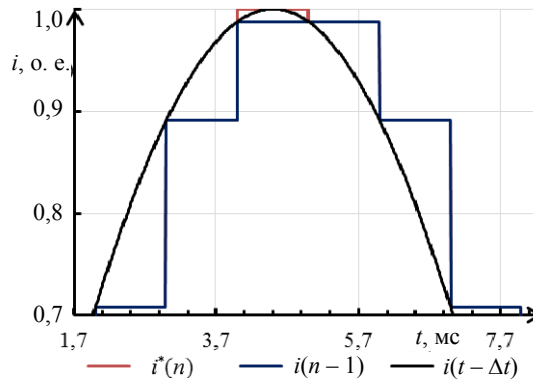
Рис. 4. Алгоритм фиксации пиковых значений: $n, n - 1, n - 2$ – номера выборок, соответствующих $t, t - \Delta t, t - 2\Delta t$; $i(n)$ – выборка n входного сигнала; $i^*(n)$ – выборка n сигнала с фиксацией пиковых значений

Fig. 4. Peak value holding algorithm: $n, n - 1, n - 2$ – sample numbers that correspond to $t, t - \Delta t, t - 2\Delta t$; $i(n)$ – n sample of input signal; $i^*(n)$ – n sample of signal with holding of peak values

На рис. 5 приведены входные непрерывный и дискретизированный сигналы, сигнал с выхода пикового фиксатора.

Рис. 5. Сравнение сигналов: $i(t - \Delta t)$ – входной непрерывный сигнал с задержкой на Δt ; $i(n - 1)$ – входной дискретизированный сигнал; $i^*(n)$ – сигнал с пикового фиксатора

Fig. 5. Signal comparison: $i(t - \Delta t)$ – input analog signal with Δt delay; $i(n - 1)$ – input sampled signal; $i^*(n)$ – signal from the peak value hold element



Как видно из рис. 5, при возрастании или убывании входной величины дискретизированный сигнал и значения пикового фиксатора совпадают, а при достижении момента перегиба пиковый фиксатор определяет максимальную величину.

Проведенные исследования алгоритма фиксации пиковых значений показали, что:

- погрешность вычисления пикового значения модуля синусоидального сигнала составляет не более 0,02 %;
- применение алгоритма не увеличивает погрешность определения пика несинусоидального сигнала, возникающего в режимах насыщения ТТ.

Предлагаемый алгоритм должен применяться к токам $i_T(n)$ и $i_D(n)$, в результате чего будут получены тормозной $i_T^*(n)$ и дифференциальный $i_D^*(n)$ токи с фиксацией пиковых значений.

Экспоненциальное сглаживание тормозного тока

Наихудшими условиями работы ДЗШ являются режимы внешних КЗ с глубоким насыщением ТТ одного из плеч. В этих режимах погрешность трансформации может достигать 90 %, что приводит к значительному увеличению дифференциального тока [10].

На рис. 6 показаны перемещения рабочих точек по характеристике срабатывания для ДЗШ по мгновенным и действующим значениям при внешнем КЗ и периодическом насыщении ТТ.

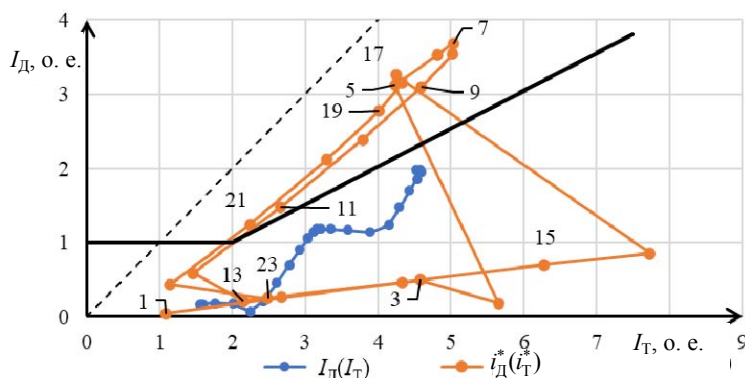


Рис. 6. Перемещение рабочих точек по характеристике срабатывания при внешнем коротком замыкании и периодическом насыщении трансформатора тока:

$I_{д}(I_{Т}), i_{д}^{*}(i_{Т}^{*})$ – рабочие точки дифференциальной защиты шин по действующим и мгновенным значениям

Fig. 6. Moving of operating points by response characteristic during external fault with periodic saturation of the current transformer:

$I_{д}(I_{Т}), i_{д}^{*}(i_{Т}^{*})$ – operating points of busbar differential protection according to the effective and instantaneous values

В соответствии с рис. 6 траектория движения рабочей точки для действующих токов имеет более равномерный характер и не пересекает характеристику срабатывания. Траектория движения рабочей точки для мгновенных значений имеет циклический характер и периодически попадает в зону срабатывания.

В начале переходного процесса (точки 1–3) ТТ трансформирует токи без искажения с нормальной погрешностью. Для точек 4–12 ТТ находится в режиме насыщения, и в точках 5–11 траектория лежит в зоне срабатывания. На втором полупериоде (точки 13–23) ситуация повторяется (для 13–16 токи трансформируются без искажения, а для 17–22 наступает насыщение).

Когда ТТ переходит в режим насыщения, происходит уменьшение тормозного и увеличение дифференциальных токов (точки 5 и 17), затем в зависимости от степени насыщения тормозной и дифференциальные токи растут дальше (6–7) или снижаются (18–21).

На рис. 7 показаны перемещения рабочих точек по характеристике срабатывания для ДЗШ по мгновенным и действующим значениям при внешнем КЗ и аperiodическом насыщении ТТ одного из плеч.

Как видно из рис. 7, процесс на первом полупериоде (точки 1–12) развивается подобно режиму периодического насыщения, и в точках 8–12 траектория попадает в зону срабатывания. На втором полупериоде насыщения не происходит, и точки 14–23 располагаются на линии нормальной погрешности ТТ.

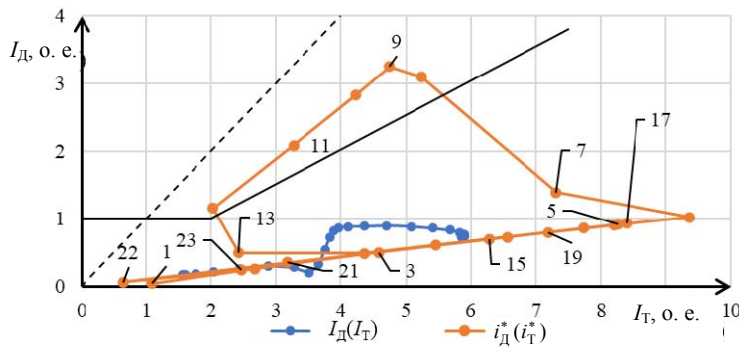


Рис. 7. Перемещение рабочих точек по характеристике срабатывания при внешнем коротком замыкании и апериодическом насыщении трансформатора тока:

$I_d(I_T), I_d^*(i_T^*)$ – то же, что на рис. 6

Fig. 7. Moving of operating points by response characteristic during external fault with aperiodic saturation of the current transformer:

$I_d(I_T), I_d^*(i_T^*)$ – same as in Fig. 6

Из рис. 6 и 7 можно сделать следующие выводы:

- ДЗШ по мгновенным значениям более чувствительна к насыщению ТТ, чем по действующим;
- до того момента, как ТТ насытится, рабочая точка ДЗШ по мгновенным значениям перемещается вдоль зоны нормальной погрешности;
- при периодическом насыщении ТТ рабочая точка ДЗШ по мгновенным значениям пересекает характеристику срабатывания на каждом полупериоде;
- при апериодическом насыщении ТТ рабочая точка ДЗШ по мгновенным значениям пересекает характеристику срабатывания раз в период;
- в случае перехода ТТ в режим насыщения происходит уменьшение тормозного и увеличение дифференциального токов.

Для повышения селективности ДЗШ по мгновенным значениям следует применять экспоненциальное сглаживание тормозного тока. В соответствии с [9] период затухания экспоненты T_e рекомендуется принимать 64 мс. Реализация алгоритма экспоненциального сглаживания тормозного тока представлена на рис. 8.

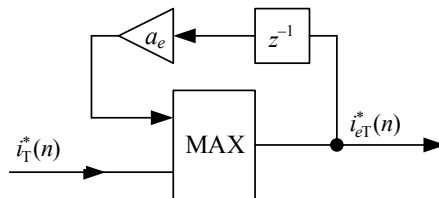


Рис. 8. Алгоритм экспоненциального сглаживания тормозного тока:

a_e – коэффициент затухания экспоненты;

$i_{eT}^*(n)$ – экспоненциально сглаженный тормозной ток

Fig. 8. The algorithm of exponential smoothing of restraining current:

a_e – damping coefficient exponents;

$i_{eT}^*(n)$ – exponentially smoothed restraining current

Коэффициент a_e зависит от шага дискретизации и периода затухания экспоненты

$$a_e = e^{-\Delta t / T_e}$$

Сравнение входного и выходного сигналов алгоритма для $\Delta t = 0,001$ с и $T_e = 0,064$ с ($a_e \approx 0,985$) представлено на рис. 9. Из рисунка видно, что нарастание выходного сигнала происходит одновременно с входным, а спад – по экспоненте, чем обеспечивается большая надежность несрабатывания при внешних КЗ.

На рис. 10 и 11 показаны перемещения рабочих точек для ДЗШ по действующим и мгновенным значениям со сглаживанием тормозного тока для периодического и аperiodического насыщения ТТ соответственно.

При сравнении рис. 6, 7 с рис. 10, 11 можно сделать выводы, что применение экспоненциального сглаживания снижает вероятность ложного срабатывания ДЗШ в режимах внешнего КЗ, но не исключает его.

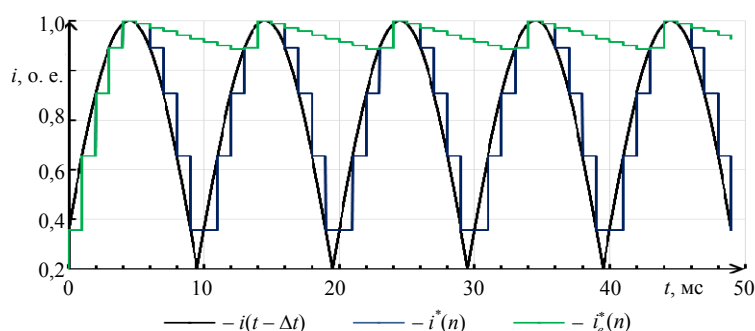


Рис. 9. Экспоненциальное сглаживание тормозного тока:

$i(t - \Delta t)$, $i^*(n)$ – то же, что на рис. 5; $i_e^*(n)$ – экспоненциально сглаженный ток

Fig. 9. The exponential smoothing of restraining current:

$i(t - \Delta t)$, $i^*(n)$ – same as in Fig. 5; $i_e^*(n)$ – exponentially smoothed current

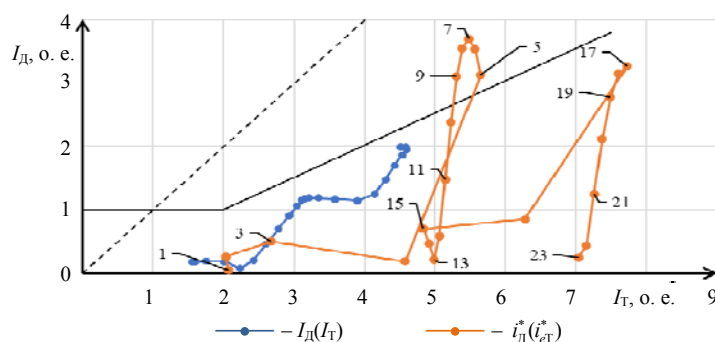


Рис. 10. Перемещение рабочих точек по характеристике срабатывания при внешнем коротком замыкании и периодическом насыщении трансформатора тока:

$I_d(I_T)$ – то же, что на рис. 6; $i_d^*(i_{eT}^*)$ – рабочие точки дифференциальной защиты шин по мгновенным значениям при экспоненциально сглаженном тормозном токе

Fig. 10. Moving of operating points by response characteristic during external fault with periodic saturation of the current transformer:

$I_d(I_T)$ – same as in Fig. 6; $i_d^*(i_{eT}^*)$ – operating points of busbar differential protection by the instantaneous values, using exponential smoothed restraining current

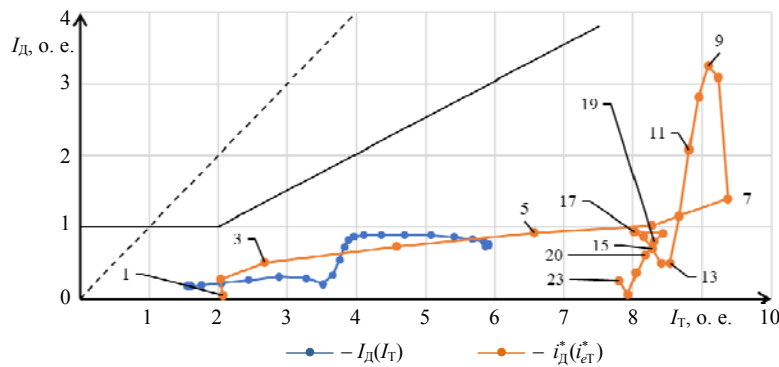


Рис. 11. Перемещение рабочих точек по характеристике срабатывания при внешнем коротком замыкании и аperiodическом насыщении трансформатора тока:

$I_d(I_T)$, $i_d^*(i_{eT}^*)$ – то же, что на рис. 10

Fig. 11. Moving of operating points by response characteristic during external fault with aperiodic saturation of the current transformer:

$I_d(I_T)$, $i_d^*(i_{eT}^*)$ – same as in Fig. 10

ВЫВОДЫ

1. Для повышения точности срабатывания ступеней по мгновенным значениям необходимо определять максимум входного аналогового сигнала.

2. При внешнем коротком замыкании и периодическом глубоком насыщении трансформатора тока рабочая точка дифференциальной защиты шин пересекает характеристику срабатывания на каждом полупериоде, а при аperiodическом – раз в два полупериода.

3. При внешнем коротком замыкании в первые моменты переходного процесса тормозной ток нарастает быстрее дифференциального. В момент насыщения трансформатора тока происходит снижение тормозного и увеличение дифференциального токов.

4. Применение экспоненциального сглаживания для мгновенного тормозного тока повышает надежность дифференциальной защиты шин и увеличивает устойчивость к внешним коротким замыканиям.

5. Применения экспоненциального сглаживания недостаточно для отстройки от глубоких насыщений трансформаторов тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
2. Ломан, М. С. Определение повреждения токовых цепей дифференциальной токовой защиты / М. С. Ломан, В. С. Каченя // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 2. С. 108–117. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-108-117>.
3. Romanyuk, F. A. Digital Filters to Separate the First and Second Harmonics of Signals in Microprocessor-Bases Protection of Electrical Installations Equipped with Transformers / F. A. Romanyuk, V. S. Kachenya, K. Kierczynski // Przegląd Elektrotechniczny. 2018. Vol. 1, No 7. P. 48–51. <https://doi.org/10.15199/48.2018.07.11>.

4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. 9-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1996. 638 с.
5. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
6. Королев, Е. П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. М.: Энергия, 1980. 207 с.
7. 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>.
8. Половко, А. М. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации / А. М. Половко, П. Н. Бутусов. М.: БХВ-Петербург, 2004. 320 с.
9. Дьяконов, В. П. MatLab и Simulink для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. М.: ДМК Пресс, 2011. 975 с.
10. Циглер, Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения / Г. Циглер; перевод с англ. под ред. А. Ф. Дьякова. М.: Знак, 2008. 216 с.

Поступила 11.03.2020 Подписана в печать 26.05.2020 Опубликовано онлайн 30.09.2020

REFERENCES

1. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
2. Loman M. S., Kachenya V. S. (2018) Detection of Current Circuits Fault for Differential Current Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (2), 108–117. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-2-108-117> (in Russian).
3. Romanyuk F. A., Kachenya V. S., Kierczynski K. (2018) Digital Filters to Separate the First and Second Harmonics of Signals in Microprocessor-Bases Protection of Electrical Installations Equipped with Transformers. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (7), 48–51. <https://doi.org/10.15199/48.2018.07.11>.
4. Bessonov L. A. (1996) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering*. 9th ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 638 (in Russian).
5. Sneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
6. Korolev E. P., Liberzon E. M. (1980) *Calculations of Permissible Loads in the Current Circuits of Relay Protection*. Moscow, Energiya Publ. 207 (in Russian).
7. 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 the 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).
8. Polovko A. M., Butusov P. N. (2004) *Interpolation. Methods and Computer Technologies for their Implementation*. Moscow, BKhV-Peterburg Publ. 320 (in Russian).
9. D'yakonov V. P. (2011) *MatLab and Simulink for Radio Engineers*. Moscow, DMK Press. 975 (in Russian).
10. Ziegler G. (2012) *Numerical Differential Protection. Principles and Applications*. John Wiley & Sons. 287.

Received: 11 March 2020

Accepted: 26 May 2020

Published online: 30 September 2020