

# Восстановление нелинейно искажённого тока короткого замыкания по малому числу отсчётов

- **Лямец Ю. Я.**, доктор техн. наук, ООО “Релематика”; Чувашский государственный университет, Республика Чувашия, Чебоксары
- **Никонов И. Ю.**, ООО “Релематика”; Чувашский государственный университет, Республика Чувашия, Чебоксары
- **Петряшин И. Е.<sup>1</sup>**, ООО “Релематика”; Чувашский государственный университет, Республика Чувашия, Чебоксары

Рассматриваются критерии, лежащие в основе процедуры коррекции наблюдаемого тока короткого замыкания, искажённого вследствие глубокого насыщения трансформатора тока. Общая процедура состоит из двух частных. Первая – сегментация наблюдаемого процесса, т.е. разделение его на интервалы неискажённой и искажённой трансформации. Вторая – объединение информации с разных интервалов. Проще всего, с двух интервалов неискажённой трансформации, что требует достаточно продолжительного наблюдения тока. Особое внимание обращается на возможность привлечения информации с интервала искажённой трансформации. Приведены примеры восстановления смоделированных токов, когда неискажённый ток в первичной цепи трансформатора тока известен, и реальных токов, цифровые осциллограммы которых записаны терминалами релейной защиты.

**Ключевые слова:** насыщение трансформатора тока, восстановление искажённого тока, сегментация.

Преодоление последствий насыщения магнитопровода трансформатора тока стало проблемой, всё более обостряющейся в связи с повышением уровня токов короткого замыкания в электрических системах [1 – 6]. В цифровой релейной защите нашли применение алгоритмы восстановления нелинейно искажённого тока, основу которых составляет процедура сегментации наблюдаемого процесса, т.е. разделения его на интервалы неискажённой трансформации и интервалы насыщения. Далее встаёт вопрос, как быть, если первый интервал неискажённой трансформации недостаточен ввиду своей непродолжительности для полноценного восстановления тока. Возникает необходимость в объединении информации, полученной на этом интервале, с информацией, доставляемой последующими интервалами, будь это ещё один интервал неискажённой трансформации или же, что лучше для быстрого действия, соседний интервал насыщения. В статье рассматриваются различные аспекты и варианты решения общей задачи восстановления тока.

**Принимаемые допущения.** Первое допущение касается модели тока. Она полагается аддитивной с гармонической слагающей частоты сети и с аperiodической слагающей

$$i_{\text{сети}}(t) = i_{\text{гарм}}(t) + i_{\text{апер}}(t); \quad (1)$$

$$i_{\text{гарм}}(t) = I_{ms} \sin \omega t + I_{mc} \cos \omega t. \quad (2)$$

Второе допущение касается интенсивности затухания аperiodической составляющей. Опасное для релейной защиты длительное насыщение трансформатора тока вызывается медленно затухающей аperiodической составляющей, в связи с чем естественно принять, что изменение тока сети происходит вследствие изменения гармонической составляющей

$$\frac{di_{\text{сети}}(t)}{dt} = \frac{di_{\text{гарм}}(t)}{dt}. \quad (3)$$

Третье допущение относится к интервалам неискажённой трансформации, где предполагается совпадение наблюдаемого тока  $i(t)$  с током сети

$$i(t) = i_{\text{сети}}(t), \quad t \in (t_n, t_k), \quad (4)$$

где  $t_n$  и  $t_k$  – границы интервала данного типа.

**Критерий сегментации.** Условия (1) – (4) создают возможность определения амплитуд  $I_{ms}$ ,  $I_{mc}$  ортогональных составляющих гармоники основной частоты по трём соседним отсчётам  $i(l)$ , где  $l = \text{ent}(t/\tau)$  – дискретное время [1];  $\tau$  – интервал синхронной дискретизации. Так, для тройки отсчётов в моменты времени  $l = k - 1, k, k + 1$  при выборе начала отсчёта времени в центральном моменте тройки  $k = 0$  имеем

$$i_k - i_{k-1} = I_{ms}^{(k)} \sin \alpha + (1 - \cos \alpha) I_{mc}^{(k)};$$

$$i_{k+1} - i_k = I_{ms}^{(k)} \sin \alpha - (1 - \cos \alpha) I_{mc}^{(k)},$$

откуда

<sup>1</sup> Петряшин Илья Евгеньевич: petry1405@mail.ru

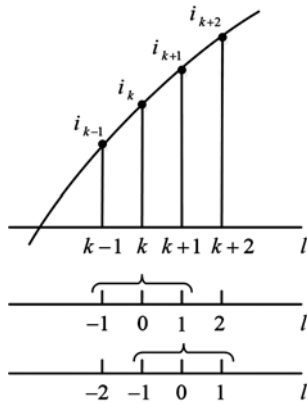


Рис. 1. Две подгруппы из трёх отсчётов тока в группе из четырёх отсчётов

$$I_{ms}^{(k)} = (1/2 \sin \alpha)(i_{k+1} - i_{k-1}); \quad (5)$$

$$I_{mc}^{(k)} = (1/4 \sin^2 \alpha/2)(i_{k+1} - 2i_k + i_{k-1}), \quad (6)$$

где  $\alpha = \omega t$ , а верхний индекс указывает центральный момент тройки отсчётов. Соответствующий комплекс  $\underline{I}_m^{(k)} = I_{ms}^{(k)} + jI_{mc}^{(k)}$ . Вторая тройка отсчётов в моменты  $l = k, k+1, k+2$  (рис. 1) определит следующий комплекс  $\underline{I}_m^{(k+1)}$ . Начало отсчёта времени для второй тройки перенесено в её центральный момент  $k+1 = 0$ .

Отношение комплексов, получаемых на соседних тройках отсчётов,

$$\underline{K} = \frac{I_m^{(k+1)}}{I_m^{(k)}} = \frac{a(i_{k+2} - i_k) + j(i_{k+2} - 2i_{k+1} + i_k)}{a(i_{k+1} - i_{k-1}) + j(i_{k+1} - 2i_k + i_{k-1})}, \quad (7)$$

где  $a = \text{tg}(\alpha/2)$ , может быть положено в основу критерия принадлежности четвёрки отсчётов интервалу неискажённой трансформации

$$\underline{K} \in S, \quad (8a)$$

где  $S$  – область отображения параметра  $\underline{K}$  на его комплексной плоскости. Идеальное выполнение условий (1) – (4) приводит к значению  $\underline{K} = 1 \angle \alpha$ . В реальных условиях область  $S$  располагается в окрестности этого значения. Область, показанная на рис. 2, получена путём обучения сегментатора на осциллограммах реальных токов, записанных тер-

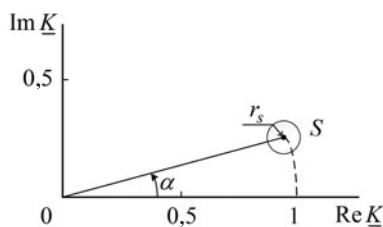


Рис. 2. Область  $S$ , полученная путём обучения сегментатора на осциллограммах реальных токов

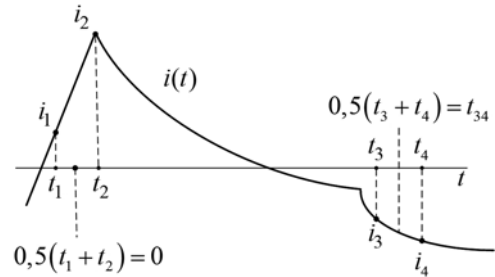


Рис. 3. Группа из двух пар отсчётов на разных интервалах неискажённой трансформации

миналами релейной защиты, и представляет собой круг радиуса  $r_s = 0,07$ . В свою очередь, условие, инверсное (8a)

$$\underline{K} \notin S, \quad (8б)$$

становится критерием окончания интервала неискажённой трансформации, свидетельствующем о том, что интервал завершается моментом  $k+1$ , а четвёртый отсчёт  $i_{k+2}$  относится к соседнему интервалу насыщения.

Заметим, что критерий (8a) можно принять и в качестве условия автономной обработки тока на первом интервале неискажённой трансформации, когда не представляется возможным привлечь информацию о токе на последующих интервалах.

**Объединение информации с двух интервалов неискажённой трансформации.** Если взять на каждом интервале по паре отсчётов (рис. 3), то условия (1) – (4) приведут к двум уравнениям относительно амплитуд  $I_{ms}, I_{mc}$  ортогональных составляющих

$$i_{\text{гарм}}(t_2) - i_{\text{гарм}}(t_1) = i_2 - i_1; \quad (9)$$

$$i_{\text{гарм}}(t_4) - i_{\text{гарм}}(t_3) = i_4 - i_3. \quad (10)$$

Введём отсчёт времени от центра отрезка времени между моментами  $t_1$  и  $t_2$  первого интервала. Тогда первое неизвестное определится непосредственно из равенства (9)

$$I_{ms} = \frac{i_2 - i_1}{2b}, \quad (11)$$

где  $b = \sin(\alpha/2)$ , а второе, как следствие, – из равенства (10)

$$I_{mc} = \frac{bI_{ms} \cos \theta_{34} - 0,5(i_4 - i_3)}{b \sin \theta_{34}}, \quad (12)$$

где  $\theta = \omega t$ .

Релейная защита, вообще говоря, не нуждается в восстановлении апериодической составляющей. Иное дело, коррекция осциллограммы наблюдаемого процесса. Допустим, что на отрезке времени от  $t=0$  до  $t_{34}$  апериодическую составляющую можно представить в виде экспоненты

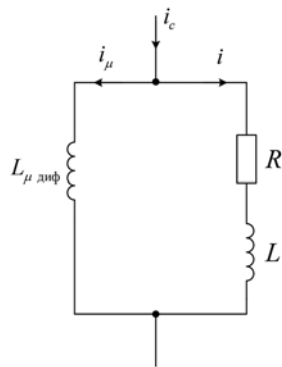


Рис. 4. Модель трансформатора тока на интервале насыщения магнитопровода

$i_e(t) = I_e \exp(-\beta t)$  с неизвестными коэффициентами  $I_e$  и  $\beta$ . Экспонента определена в начальной и конечной точках

$$i_e(0) = I_e = 0,5(i_1 + i_2) - I_{mc}; \quad (13)$$

$$i_e(t_{34}) = I_e e^{-\beta t_{34}} = 0,5(i_3 + i_4) - I_{ms} \sin \theta_{34} - I_{mc} \cos \theta_{34}, \quad (14)$$

откуда

$$\beta = \frac{1}{t_{34}} \ln \frac{i_e(0)}{i_e(t_{34})}. \quad (15)$$

**Объединение информации с интервалов неискажённой и искажённой информации.** В дополнение к трём ранее принятым допущениям, отражаемым выражениями (1) – (4), на интервале насыщения необходимо принять ещё одно допущение о применимости линейной модели трансформатора тока с тремя неизвестными параметрами – дифференциальной индуктивностью ветви намагничивания  $L_{\mu \text{ диф}}$  и параметрами вторичной обмотки  $R$  и  $L$  (рис. 4).

Модель описывается двумя уравнениями:

$$L_{\mu \text{ диф}} \frac{di_{\mu}(t)}{dt} = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}; \quad (16)$$

$$\frac{di_{\mu}(t)}{dt} = \frac{di_c(t)}{dt} - \frac{di(t)}{dt}, \quad (17)$$

которые приводятся с учётом выражений (1) – (4) к одному уравнению с тремя неизвестными величинами и четырьмя известными функциями. Возможны два варианта с неизвестными  $x_1, x_2, x_3$  или  $y_1, y_2, y_3$ :

$$(\cos \theta)x_1 - (\sin \theta)x_2 - \left(\frac{di(t)}{dt}\right)x_3 = i(t); \quad (18)$$

$$x_1 = \frac{\omega L_{\mu \text{ диф}}}{R} I_{ms}; \quad x_2 = \frac{\omega L_{\mu \text{ диф}}}{R} I_{mc}; \quad x_3 = \frac{L_{\mu \text{ диф}} + L}{R}$$

или

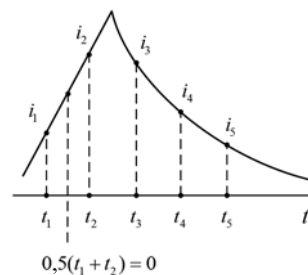


Рис. 5. Группа из пяти отсчётов на двух интервалах разного типа

$$(\cos \theta)y_1 - (\sin \theta)y_2 - i(t)y_3 = \frac{di(t)}{dt}; \quad (19)$$

$$y_1 = \frac{\omega L_{\mu \text{ диф}}}{L_{\mu \text{ диф}} + L} I_{ms}; \quad y_2 = \frac{\omega L_{\mu \text{ диф}}}{L_{\mu \text{ диф}} + L} I_{mc};$$

$$y_3 = \frac{R}{L_{\mu \text{ диф}} + L} = \frac{1}{x_3}.$$

Необходимую информацию несёт отношение двух первых неизвестных

$$\lambda = \frac{x_2}{x_1} = \frac{y_2}{y_1} = \frac{I_{mc}}{I_{ms}}. \quad (20)$$

Для его определения потребуются значения переменных коэффициентов в уравнении (18) или (19) в три момента времени  $t_3, t_4, t_5$ , которые на этот раз располагаются на интервале насыщения (рис. 5).

Так, уравнение (18) даёт следующую систему трёх линейных алгебраических уравнений

$$(\cos \theta_p)x_1 - (\sin \theta_p)x_2 - \left(\frac{di(t)}{dt}\right)_p x_3 = i(t_p) \quad (21)$$

при  $p$  равном 3, 4, 5. После исключения из системы (21) не представляющего интереса неизвестного  $x_3$  остающиеся два уравнения приводятся к однородному уравнению относительно неизвестных  $x_1$  и  $x_2$ , из которого определяется отношение (20). Амплитуду первой ортогональной составляющей определяет формула (11), а второй – соотношение (20):  $I_{mc} = \lambda I_{ms}$ .

**Апробация алгоритма.** Общий алгоритм восстановления искажённого тока составляют отдельные частные алгоритмы (сегментация процесса и коррекция искажённого тока), представленные ранее в трёх разделах. Кроме того, проверялась и возможность восстановления тока только по одному первому интервалу неискажённой трансформации без привлечения дополнительной информации. Рассматривались осциллограммы токов КЗ, полученные путём математического моделирования, физического моделирования на комплексе RTDS, а также реальные процессы, записанные терминалами релейной защиты производства

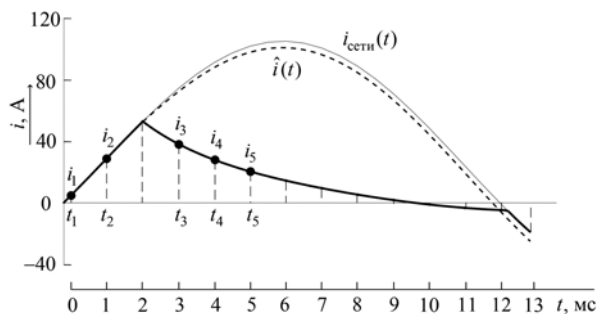


Рис. 6. Пример восстановления тока, полученного с помощью программного комплекса Matlab/Simulink

ООО “Релематика”. Осциллограмма тока сети приводится только в случае его моделирования. Восстановленный ток  $\hat{i}(t)$  во всех случаях на рисунках показан пунктиром.

На рис. 6 приведён результат восстановления осциллограммы, смоделированной с помощью программного комплекса Matlab/Simulink. Восстановленный ток

$$\hat{i}(t) = 70,9 \sin(314t) - 31,3 \cos(314t) + 29,9e^{-14t}$$

близок к току сети

$$i_{\text{сети}}(t) = 70 \sin(314t) - 32 \cos(314t) + 30e^{-12,5t},$$

что говорит об эффективности процедуры восстановления. Имеющееся расхождение обусловлено допущением постоянства апериодической составляющей тока КЗ в пределах интервала дискретизации.

На рис. 7 показан результат восстановления осциллограммы, полученной с помощью моделирующего комплекса RTDS (Real Time Digital Simulator).

На рис. 8 и 9 приведены осциллограммы реальных процессов КЗ, записанных в линиях электропередачи 110 кВ Восточных электрических сетей – филиала компании МОЭСК. Восстановление искажённого тока (рис. 8) выполнялось путём объединения информации на двух участках правильной трансформации и с использованием алгоритма привлечения информации с интервала насыщения

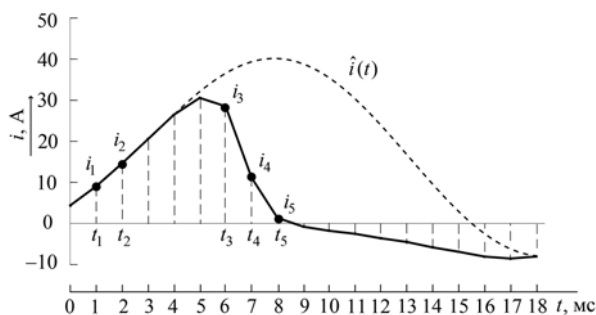


Рис. 7. Пример восстановления тока, полученного путём физического моделирования

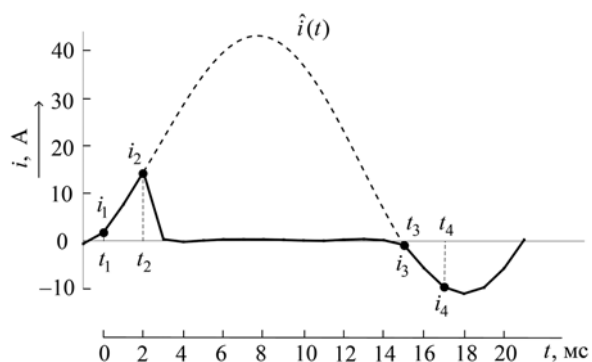


Рис. 8. Пример восстановления тока реального КЗ, записанного на ЛЭП Рошаль – Мишеронь

ния (рис. 9). Что касается определения экспоненциальной составляющей, то в случае осциллограммы на рис. 8 применён алгоритм (13) – (15), а на рис. 9 – родственный алгоритм с привлечением дополнительного отсчёта на интервале неискажённой трансформации.

Обращает на себя внимание различие процессов, показанных на рис. 9. Первый и второй (рис. 9, а и б) характеризуются переходом тока на интервале насыщения через нулевое значение,

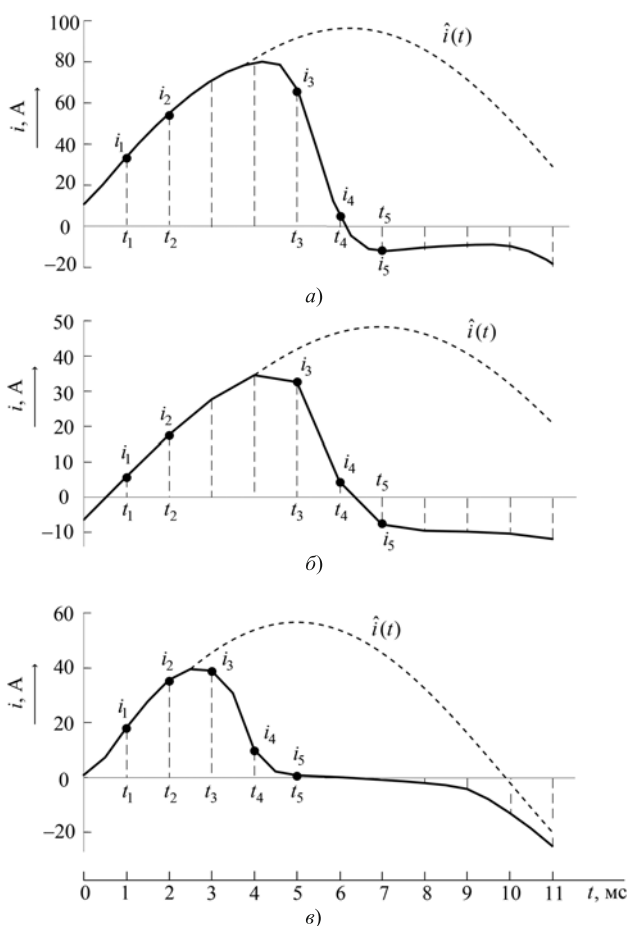


Рис. 9. Пример восстановления токов реальных КЗ: а – ЛЭП Сетовка – Непецино; б – ЛЭП Ловцы – Радовицы; в – ЛЭП Чанки – Пески

второй случай отличается медленным выходом магнитопровода из состояния насыщения. В третьем случае (рис. 9, в) ток  $i(t)$  на интервале насыщения продолжительное время остаётся близким к нулевому значению. Результат восстановления искажённого тока во всех рассмотренных случаях оказался приемлемым для релейной защиты энергообъектов.

## Выводы

1. В основе процедуры восстановления тока короткого замыкания, искажённого вследствие насыщения магнитопровода трансформатора тока, лежит операция сегментации – разделения процесса на интервалы неискажённой и искажённой трансформации – и операции объединения отсчётов разных интервалов в единую выборку, достаточную для оценивания составляющих неискажённого тока. Операцией сегментации востребована выборка из четырёх равноотстоящих один от другого отсчётов. Для восстановления тока возможны два варианта объединения информации. По первому варианту в единственную выборку вводят две пары отсчётов с разных интервалов неискажённой трансформации. По второму варианту к паре отсчётов первого интервала неискажённой трансформации присоединяются три отсчёта соседнего интервала насыщения, которые подвергаются предварительной обработке с привлечением отсчётов производной наблюдаемого тока.

2. Возможность привлечения информации с интервала насыщения открывается благодаря алгоритму учёта общих свойств линеаризованной модели трансформатора тока с произвольными параметрами.

## Список литературы

1. Лямец, Ю. Я. Мониторинг процессов в электрической системе / [Текст] / Ю. Я. Лямец, Ю. В. Романов, Д. В. Зиновьев // Электричество. – 2006. – № 10. – С. 2 – 10; № 11. С. 2 – 10.
2. Wiszniewski, A. Correction of current transformer transient performance [Text] / A. Wiszniewski, W. Rebizant, L. Schiel // IEEE Trans. Power Deliv. – 2008. – Vol. 23. – No. 2. – P. 624 – 632.
3. Hajipour, E. Current transformer saturation compensation for transformer differential relays [Text] / E. Hajipour, M. Vakilian, M. Sanaye-Pasand // IEEE Trans. Power Deliv. – 2015. – Vol. 30. – No. 5. – P. 2293 – 2302.
4. Кужеков, С. Л. Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, Б. Б. Сербиновский // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 3. – С. 43 – 51.
5. Лямец, Ю. Я. Коррекция нелинейно искажённого тока [Текст] / Ю. Я. Лямец, А. Б. Атнишкин, П. И. Воронов, И. Ю. Никонов // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 4. – С. 49 – 53.
6. Кужеков, С. Л. Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, В. С. Воробьев, В. В. Москаленко // Электрические станции. – 2017. – № 1. – С. 42 – 47.

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

С начала 2016 г. редакция журнала «Электрические станции» принимает статьи только через сайт журнала: [www.elst.energy-journals.ru](http://www.elst.energy-journals.ru) (статьи в журнал «Энергохозяйство за рубежом» – через сайт: [www.ehz.energy-journals.ru](http://www.ehz.energy-journals.ru)). Пожалуйста, зарегистрируйтесь как автор на сайте и передайте статью, следуя пошаговой инструкции. Если что-то не будет получаться, обращайтесь в редакцию.

Передав статью через сайт, вы будете наблюдать весь путь прохождения своей статьи – от рецензии до вёрстки! Вы сможете внести правки после редактирования, посмотреть вёрстку и сделать свои замечания, предложения и др.

Редакция