
УДК 621.314.21

РАСПОЗНАВАНИЕ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ ТРАНСФОРМАТОРА ПО ЛОКАЛЬНЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ НАБЛЮДАЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

© 2022 г. И. Д. Кочетов¹, *, Ю. Я. Лямец¹

¹ООО «Релематика», Чувашский госуниверситет, Чебоксары, Россия

*e-mail: kochetov_id@relematika.ru

Поступила в редакцию 02.03.2021 г.

После доработки 07.10.2021 г.

Принята к публикации 15.10.2021 г.

Рассматриваются информационные аспекты распознавания витковых замыканий в обмотке трансформатора. Алгоритм распознавания основан на разделении наблюдаемого процесса на две части – нормальный и локальный процессы. Последний концентрирует в себе информацию о повреждении обмотки, так как инициируется единственным источником – током замыкания. Что же касается нормального процесса, то он создается в модели неповрежденного трансформатора половиной наблюдаемых величин. Применительно к трансформатору обоснована целесообразность активирования нормального процесса токами, наблюдаемыми на поврежденной стороне трансформатора, и напряжениями, наблюдаемыми на неповрежденной стороне. Реакцией модели неповрежденного объекта станут нормальные составляющие напряжений на одной стороне и нормальные составляющие токов на другой. Локальные составляющие соответствующих напряжений и токов представляют собой разности между наблюдаемыми величинами и их нормальными составляющими. В модели локального режима входы поврежденной стороны трансформатора разомкнуты, а неповрежденной – зашунтированы. Модель нормального режима востребована в реальном времени, а модель локального режима – в отложенном времени для априорного определения области отображения замера при витковых замыканиях. В качестве замера используется двухкоординатная функция магнитодвижущей силы поврежденной части обмотки.

Ключевые слова: трансформатор, витковое замыкание, компоненты тока замыкания

DOI: 10.31857/S0002331022010058

В состав токов и напряжений, наблюдаемых на разных сторонах энергообъекта, входят компоненты, несущие информацию о его повреждении [1]. Первыми по хронологии появления в теории и практике стали составляющие обратной и нулевой последовательности. Намного позже вошли в обиход аварийные составляющие, более ценные в информационном отношении, так как в отличие от симметричных составляющих на них не сказывается несимметрия объекта [2]. В случае короткого замыкания (КЗ) источником аварийных составляющих токов и напряжений становится ток, возникший в месте КЗ и изменившийся предшествующий режим энергообъекта на текущий режим КЗ. В текущую электрическую величину наряду с аварийной составляющей входит еще одна, представляющая собой экстраполированную на время после КЗ ту же величину, взятую из предшествующего режима.

Относительно недавно обнаружилось, что в аварийной составляющей, а, следовательно, и в текущей величине, присутствует примечательный компонент, названный локаль-

ной составляющей [3]. Он концентрирует в себе информацию о повреждении. Пару с ним образует нормальная составляющая, дополняющая его до текущей величины, или, как модификация, до ее аварийной составляющей. Хотя локальная составляющая создается тем же током КЗ, что и аварийная, у нее имеется существенное преимущество. В локальном режиме каждое место наблюдения энергообъекта либо зашунтировано, либо отключено от внешних связей; в разных местах может быть сделано одинаково или по-разному. Будем исходить из того, что в каждом месте наблюдения регистрируются и ток, и напряжение. Наблюдаемые величины подразделяются на две равные части, по одному представителю от каждого места наблюдения. Нормальные и локальные составляющие определяются для величин второй группы: нормальные составляющие – как реакции модели наблюдаемого объекта на воздействие всех величин первой группы, а локальные составляющие – как разности между величинами второй группы и их нормальными составляющими.

Принцип разделения наблюдаемых величин на группу воздействия и группу реакции исходит из учета свойств объекта и характера задачи распознавания повреждений. Витковые замыкания в трансформаторе обусловлены износом изоляции, причиной которого являются электродинамические воздействия токов КЗ, или же непосредственно старение изоляции. Износ изоляции происходит постепенно. Сначала замыкается относительно малое число витков трансформатора, при котором чувствительности дифференциальной защиты трансформатора будет не хватать, а газовая защита не сработает ввиду незначительного газообразования в масле. Со временем число замкнувшихся витков трансформатора будет увеличиваться из-за электродинамического воздействия тока КЗ на изоляцию, после чего данные защиты смогут сработать. Рассматриваемый далее алгоритм выявления витковых замыканий по локальным составляющим токов и напряжений имеет целью распознавание повреждения еще на ранней стадии его возникновения.

На рис. 1а иллюстрируется текущий режим виткового КЗ, в котором наблюдаются напряжения и токи, представленные в комплексном базисе как $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ и $\underline{U}_2, \underline{I}_2$. В той же модели показан неизвестный ток КЗ \underline{I}_f в замкнувшейся части обмотки, число витков w_f и сопротивление \underline{Z}_f которой также неизвестны. Будем считать, что известны параметры неповрежденных обмоток w_1, \underline{Z}_1 и w_2, \underline{Z}_2 , а также сопротивление ветви намагничивания, обозначенное на рис. 1в, 1д как $\underline{Z}_\mu^{(2)}$, что указывает на приведение к вторичной обмотке. Это сопротивление может быть определено по напряжению и токам предшествующего режима

$$\underline{Z}_\mu^{(2)} = \frac{\underline{U}_{1\text{пд}}^{(2)} - \underline{Z}_1 \underline{I}_{1\text{пд}}^{(2)}}{\underline{I}_{1\text{пд}}^{(2)} - \underline{I}_{2\text{пд}}^{(2)}}.$$

Из двух пар наблюдаемых напряжений и токов для создания нормального режима контролируемого объекта должны быть отобраны две величины, по одной от каждой пары. На первый взгляд, самый простой вариант – токи \underline{I}_1 и \underline{I}_2 , но тогда придется столкнуться с чрезмерно высокой чувствительностью нормального режима к характеристике магнитопровода. Менее чувствителен комбинированный вариант – ток \underline{I}_1 со стороны предположительно поврежденной обмотки и напряжение \underline{U}_2 со стороны неповрежденной (рис. 1б). Нормальные составляющие $\underline{U}_{1\text{нм}}$ и $\underline{I}_{2\text{нм}}$ двух оставшихся величин \underline{U}_1 и \underline{I}_2 из числа наблюдаемых определяются как реакции на воздействие двух источников – \underline{I}_1 и \underline{U}_2 . Из схемной модели нормального режима (рис. 1в), где величины и параметры первичной обмотки приведены к вторичной обмотке, следуют соотношения

$$\underline{U}_{1\text{нм}} = \frac{1}{1 + \underline{Z}_2 / \underline{Z}_\mu^{(2)}} \left(\left(\underline{Z}_1^{(2)} + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_\mu^{(2)}} \right) \underline{I}_1^{(2)} + \underline{U}_2 \right), \quad (1)$$

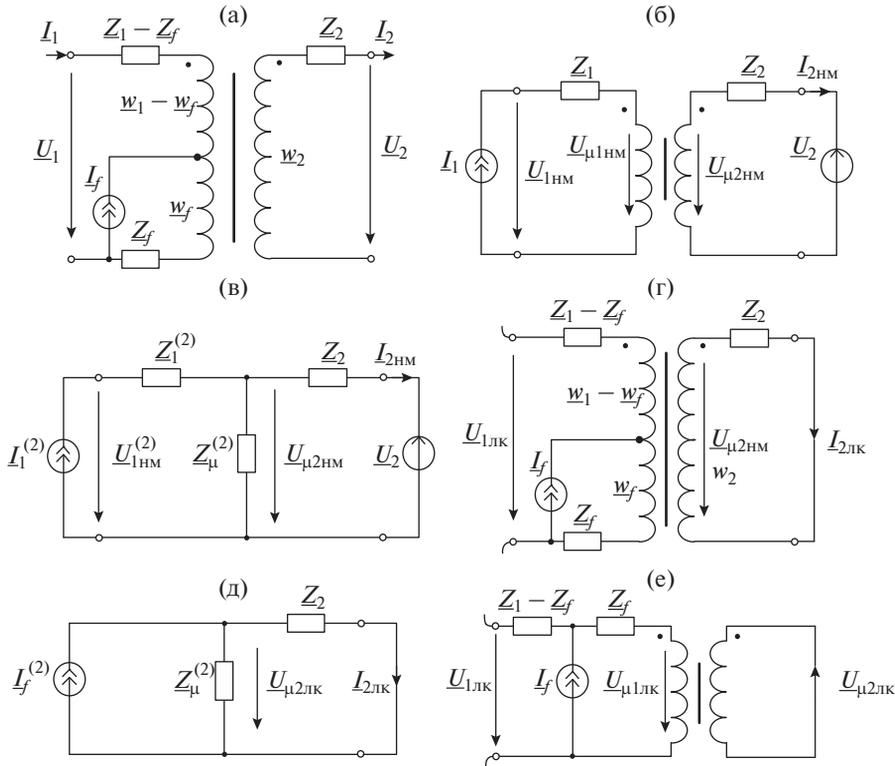


Рис. 1. Наблюдаемый режим виткового КЗ в однофазном трансформаторе и его составляющие: (а) текущий режим; (б) нормальный режим; (в) модель нормального режима с приведением к числу витков вторичной обмотки; (г) локальный режим; (д) локальный режим во вторичной обмотке; (е) локальный режим в первичной обмотке.

$$\underline{I}_{2\text{HM}} = \frac{1}{1 + \underline{Z}_2 / \underline{Z}_\mu^{(2)}} \left(\underline{I}_1^{(2)} - \frac{1}{\underline{Z}_\mu^{(2)}} \underline{U}_2 \right), \quad (2)$$

$$\underline{I}_1^{(2)} = (1/k) \underline{I}_1, \quad \underline{U}_1^{(2)} = k \underline{U}_1, \quad \underline{Z}_1^{(2)} = k^2 \underline{Z}_1, \quad k = w_2 / w_1. \quad (3)$$

Без учета ветви намагничивания ($\underline{Z}_\mu \rightarrow \infty$) выражения (1)–(3) сводятся к простым зависимостям

$$\underline{U}_{1\text{HM}} = \left(\underline{Z}_1 + (1/k)^2 \underline{Z}_2 \right) \underline{I}_1 + (1/k) \underline{U}_2, \quad (4)$$

$$\underline{I}_{2\text{HM}} = (1/k) \underline{I}_1. \quad (5)$$

Режим нормальных составляющих создается моделью неповрежденного объекта инвариантной по отношению ко всему множеству возможных повреждений. Что же касается локальных составляющих наблюдаемых величин, то они определяются в установленном порядке, инвариантном относительно модели неповрежденного объекта

$$\underline{U}_{1\text{LK}} = \underline{U}_1 - \underline{U}_{1\text{HM}}, \quad (6)$$

$$\underline{I}_{2\text{LK}} = \underline{I}_2 - \underline{I}_{2\text{HM}}. \quad (7)$$

В неповрежденном трансформаторе, где $\underline{U}_{1\text{нм}} \approx \underline{U}_1$ и $\underline{I}_{2\text{нм}} \approx \underline{I}_2$, локальные составляющие находятся на уровне, определяемом погрешностями именно этой структуры, моделирующей неповрежденный объект. Операции (1)–(7) приводят к величинам локального режима в результате обработки величин \underline{I}_1 , \underline{U}_2 и \underline{U}_1 , \underline{I}_2 конкретного режима наблюдаемого трансформатора. Иначе говоря, это операции алгоритма распознавания реальной ситуации на защищаемом объекте. Между тем локальный режим обладает собственной моделью (рис. 1г), которая не принимает участия в преобразовании реально наблюдаемых величин, но зато раскрывает взаимосвязи локального режима. Эта модель с разомкнутым входом и закороченным выходом активируется единственным источником – неизвестным источником тока КЗ \underline{I}_f , создающим магнитодвижущую силу (МДС) $\underline{F}_f = w_f \underline{I}_f$ и реакции модели локального режима в виде тока короткозамкнутой вторичной обмотки (рис. 1д)

$$\underline{I}_{2\text{лк}} = \underline{M} \underline{F}_f, \quad (8)$$

$$\underline{M} = \frac{(1/w_2)}{1 + (\underline{Z}_2 / \underline{Z}_{\mu}^{(2)})} \quad (9)$$

и напряжения разомкнутой первичной обмотки (рис. 1е)

$$\underline{U}_{1\text{лк}} = (1/k) \underline{Z}_2 \underline{I}_{2\text{лк}} + \underline{\Delta Z}_1 \underline{F}_f = \underline{N} \underline{F}_f, \quad (10)$$

$$\underline{N} = \frac{w_1}{w_2^2} \frac{\underline{Z}_2}{1 + (\underline{Z}_2 / \underline{Z}_{\mu}^{(2)})} + \underline{\Delta Z}_1, \quad (11)$$

где $\underline{\Delta Z}_1 = \underline{Z}_f / w_f = \underline{Z}_1 / w_1$ – сопротивление одного витка поврежденной части обмотки, что соответствует сопротивлению одного витка первичной обмотки.

Величина \underline{F}_f является тем параметром, который несет информацию о витковом замыкании. Каждый из двух локальных компонентов $\underline{I}_{2\text{лк}}$ и $\underline{U}_{1\text{лк}}$ дает ему свою оценку. Из (8) и (10) следует

$$\hat{F}_{fI} = \underline{M}^{-1} \underline{I}_{2\text{лк}}, \quad (12)$$

$$\hat{F}_{fU} = \underline{N}^{-1} \underline{U}_{1\text{лк}}. \quad (13)$$

В идеальном случае оценки (12), (13) должны совпадать. В реальных ситуациях будет иметь место расхождение $\underline{\Delta \hat{F}}_f = \hat{F}_{fI} - \hat{F}_{fU}$. Сформируем замер в виде двумерного вещественного вектора

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \hat{F}_f \\ \underline{\Delta \hat{F}}_f \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где $\hat{F}_f = 0.5(\hat{F}_{fI} + \hat{F}_{fU})$, \hat{F} и $\underline{\Delta F}$ – модули комплексов \hat{F} и $\underline{\Delta \hat{F}}$. Условие распознавания витковых замыканий имеет вид

$$\mathbf{s} \in S, \quad (15)$$

где S – заданная область отображения вектора \mathbf{s} на плоскости $(\hat{F}_f, \underline{\Delta \hat{F}}_f)$. Процедура априорного построения области S с помощью модели локального режима заключается в применении преобразований (8) и (10), с одной стороны, и (12), (13), с другой стороны, по разным схемам. Параметры (9) и (11) \underline{M} и \underline{N} задаются в виде функций $\underline{M}(\underline{Z})$ и $\underline{N}(\underline{Z})$ возможных значений вектора \underline{Z} параметров модели: $\underline{Z} \in W$, где W – область его определения. В то же время коэффициенты \underline{M}^{-1} и \underline{N}^{-1} в (12), (13) являются уста-

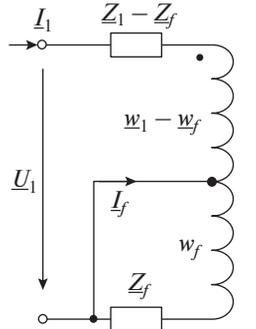


Рис. 2. Модель для оценивания числа замкнувшихся витков по известной МДС \underline{F}_f .

вочными константами $\underline{M}_{уст}^{-1}$ и $\underline{N}_{уст}^{-1}$, предназначенными для преобразования реальных величин $\underline{I}_{2\text{лк}}$ и $\underline{U}_{2\text{лк}}$.

Хотя в распознавании витковых замыканий главная роль отводится МДС \underline{F}_f , нельзя обойти стороной вопрос о числе замкнувшихся витков w_f . Определим оценку \hat{w}_f для текущего режима модели трансформатора, который находился в режиме холостого хода до того, как произошло замыкание через нулевое переходное сопротивление (рис. 2). Примем, что напряжение в текущем режиме равно номинальному ($U_1 = U_{ном}$). Кроме того, $\underline{Z}_1 = \underline{\Delta Z} w_1$, так что $\underline{Z}_1 / \underline{Z}_f = w_1 / w_f$. Обмотка по рис. 2 описывается уравнением

$$\underline{U}_1 = (\underline{Z}_1 - \underline{Z}_f) \underline{I}_1 - \frac{w_1 - w_f}{w_f} \underline{Z}_f (\underline{I}_1 + \underline{I}_f). \quad (16)$$

Вводя вещественную величину $I_{sup} = U_{ном} / \Delta Z$ и переходя в уравнении (16) к модулям комплексных, получим искомую оценку

$$\frac{w_1}{\hat{w}_f} = 1 + \frac{I_{sup}}{\hat{F}_f}, \quad (17)$$

выражаемую через модуль оценки МДС, получаемый из соотношений (12), (13) по ортогональным составляющим электрических величин. Минимальная МДС определяется из (17) при $\hat{w}_f = 1$

$$\hat{F}_{f,\text{inf}} = \frac{I_{sup}}{w_1 - 1}. \quad (18)$$

Взятый сам по себе изложенный алгоритм распознавания витковых замыканий свободен от методической погрешности. Иное дело те погрешности, которые встречаются на каждом из трех этапов преобразования фиксируемых токов и напряжений: измерительное и аналого-цифровое преобразование; фильтрация ортогональных составляющих; формирование замера – операции (1), (2) и (12), (13), в которых задействованы сопротивления модели трансформатора. Имеются средства минимизации погрешности каждого преобразования. Проблему первого этапа снимают оптоэлектронные измерительные преобразователи [4]. На втором этапе необходимым условием обеспечения адаптивных фильтров ортогональных составляющих [5]. А на третьем помогает корректировка сопротивлений $\underline{Z}_1^{(2)} = R_1^{(2)} + jX_1^{(2)}$, $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ и $\underline{Z}_\mu^{(2)}$ модели нормального режима (рис. 1в) по результатам наблюдения предшествующего режима – токам и напряжениям $\underline{I}_{1\text{нд}}$, $\underline{U}_{1\text{нд}}$; $\underline{I}_{2\text{нд}}$, $\underline{U}_{2\text{нд}}$, что создает условия для оценивания четырех вещественных параметров из шести неизвестных. Скажем, известны

реактивные сопротивления $X_1^{(2)}$ и X_2 , тогда остающиеся параметры получают следующие оценки

$$\hat{R}_2 = (1/K_{Im}) X_{12}, \quad \hat{R}_1 = K_{Re} \hat{R}_2 + R_{12}, \quad \hat{Z}_\mu^{(2)} = \frac{U_{2нд} + (\hat{R}_2 + jX_2) I_{2нд}}{I_{1нд}^{(2)} - I_{2нд}},$$

где

$$K_{Re} + jK_{Im} = I_{2нд}/I_{1нд}^{(2)}, \quad R_{12} + jX_{12} = U_{12нд}/I_{1нд}^{(2)}, \\ U_{12нд} = U_{2нд} - U_{1нд}^{(2)} + j(X_1^{(2)} I_{1нд}^{(2)} + X_2 I_{2нд}).$$

Процедура разделения наблюдаемого режима трехфазного трансформатора на нормальный и локальный режимы не имеет принципиальных особенностей по сравнению с однофазным трансформатором. На рис. 3 иллюстрируются режимы трансформатора с соединением обмоток по схеме $Y/\Delta - 11$. Наблюдаются напряжения и токи на входе и выходе трансформатора: \underline{U}_{v1} , \underline{I}_{v1} и $\underline{U}_{v,v+1,2}$, \underline{I}_{v2} , где $v = A, B, C$, $v \pm 1$ – обозначение опережающей и отстающей фаз. Наблюдение токов в треугольнике $\underline{I}_{v\pm 1, v, 2}$ не предполагается, хотя стоит заметить, что информация о них не была бы излишней.

Как и ранее при разграничении режимов в однофазном трансформаторе, источниками нормального режима будут выбраны наблюдаемые токи первичной обмотки и наблюдаемые напряжения вторичной обмотки. На этот раз три тока \underline{I}_{v1} и три напряжения $\underline{U}_{v,v+1,2}$. Процессы в обмотках, расположенных на одном из стержней четырехстержневого трансформатора, без учета токов намагничивания стержней протекают независимо от обмоток, находящихся на иных стержнях. В таком случае модель нормального режима распадается на три автономные модели пофазной трансформации (рис. 3б). Для каждой из них применимы соотношения (1)–(13). Например, зависимости (4), (5) принимают следующий вид

$$\underline{U}_{v1нм} = (\underline{Z}_1 + (1/k)^2 \underline{Z}_2) \underline{I}_{v1} + (1/k) \underline{U}_{v,v+1,2}, \quad (19)$$

$$\underline{I}_{v+1, v2нм} = (1/k) \underline{I}_{v1}. \quad (20)$$

Локальные напряжения определяются, как и раньше, выражением (6)

$$\underline{U}_{v1лк} = \underline{U}_{v1} - \underline{U}_{v1нм},$$

а с локальными токами дело обстоит несколько сложнее в связи с тем, что токи в треугольнике неизвестны, в то время как соотношение (20) определяет нормальные составляющие именно этих токов. Очевидна необходимость перехода от токов в треугольнике к нормальным токам на его выходе

$$\underline{I}_{v2нм} = \underline{I}_{v+1, v2нм} - \underline{I}_{v, v-1, 2нм}$$

с последующим определением локальных составляющих наблюдаемых токов

$$\underline{I}_{v2лк} = \underline{I}_{v2} - \underline{I}_{v2нм}.$$

Заметим, что закономерность, которой должны подчиняться наблюдаемые вторичные токи

$$\underline{I}_{A2} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{C2} = 0,$$

распространяется на их составляющие, что дает возможность оценить адекватность модели неповрежденного трансформатора реальному объекту.

Витковому замыканию в первичной обмотке фазы A (рис. 3а) отвечает модель локального режима с зашунтированными обмотками трансформатора (рис. 3в). В дан-

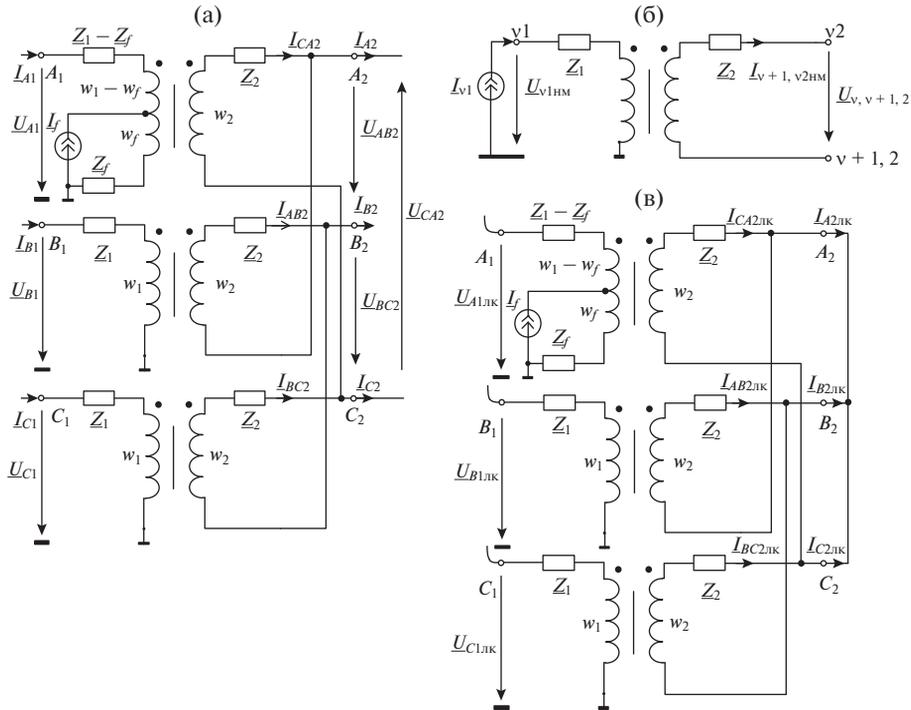


Рис. 3. Наблюдаемый режим трехфазного трансформатора и его составляющие: (а) текущий; (б) нормальный; (в) локальный.

ном случае при условии автономной трансформации между обмотками, расположенными на одном стержне, ненулевой локальный ток будет протекать только в одной вторичной обмотке, а именно

$$I_{CA2\text{лк}} \neq 0, \quad I_{AB2\text{лк}} = 0, \quad I_{BC2\text{лк}} = 0.$$

Соответственно, на выходе трансформатора будут протекать два локальных тока, находящихся в противофазе

$$I_{A2\text{лк}} = -I_{C2\text{лк}} = I_{CA2\text{лк}}, \quad I_{B2\text{лк}} = 0.$$

В модели по рис. 3в ток $I_{CA2\text{лк}}$ и напряжение $U_{A1\text{лк}}$ определяются формулами (8) и (10).

Построение области S отображения режимов витковых замыканий на плоскости $\Delta \hat{F}_f (\hat{F}_f)$ рассмотрим на примере трехфазного трансформатора 110/10 кВ мощностью 10 МВА. Сопротивления первичной и вторичной обмоток $Z_1 = 3.84 + j69.3 \text{ Ом}$, $Z_2 = 0.04 + j0.63 \text{ Ом}$, числа витков $w_1 = 12650$, $w_2 = 1210$, сопротивление ветви намагничивания, приведенное к числу витков первичной обмотки $Z_{\mu,\text{min}}^{(1)} = 77.79 + j311.18 \text{ кОм}$, сопротивление витка первичной обмотки $\Delta Z_1 = Z_1/w_1 = (3 + j55) \times 10^{-4} \text{ Ом}$. Искомая область определялась вариациями сопротивления ветви намагничивания $Z_{\mu}^{(1)}$ в пределах от $Z_{\mu,\text{min}}^{(1)}$ до ∞ и сопротивлений Z_1, Z_2 в пределах $\pm 5\%$. Результат применения процедуры обучения индикатора витковых замыканий приведен на рис. 4. Область S отображения режимов витковых замыканий на плоскости замера s имеет трапецидаль-

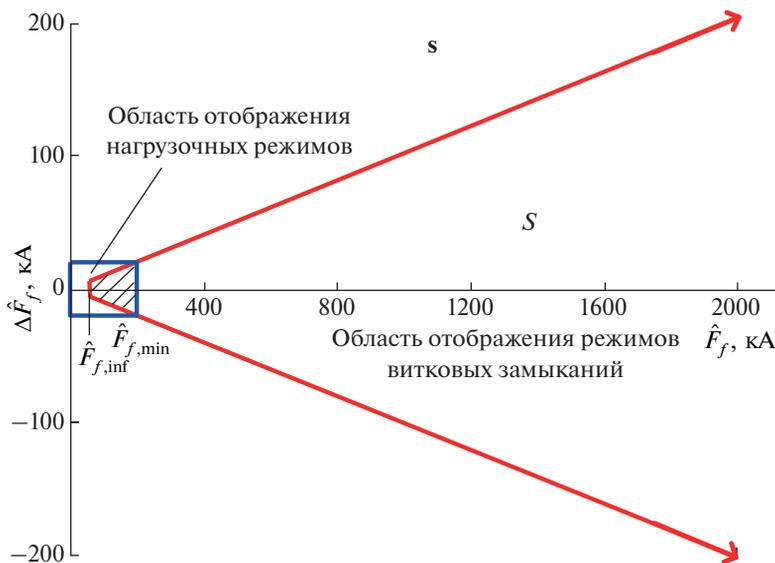


Рис. 4. Области отображения режимов трансформатора на плоскости замера s .

ную форму. Трапеция, ось которой располагается на координатной оси \hat{F}_f , занимает место между предельно низким значением $\hat{F}_{f,\text{inf}}$ при замыкании одного витка (18) и максимальным значением

$$\hat{F}_{f,\text{max}} = \frac{\hat{w}_{f,\text{max}}}{w_1 - \hat{w}_{f,\text{max}}} I_{\text{sup}},$$

определяемым из соотношения (17) для максимально возможного числа замкнувшихся витков.

Погрешности преобразователей наблюдаемых величин и модулей нормального режима приводят к тому, что нагрузочные режимы трансформатора также отображаются на плоскости замера s . Область отображения занимает всю окрестность начала координат, пересекаясь с начальной частью области S . Чувствительность индикатора витковых замыканий определяется правым граничным значением $\hat{F}_{f,\text{min}}$ заштрихованной подобласти пересечения, в которой отображаются как аварийные, так и рабочие режимы. Минимальное поддающееся распознаванию число замкнувшихся витков определяется все тем же соотношением (17)

$$\hat{w}_{f,\text{min}} = \frac{w_1}{1 + I_{\text{sup}} / \hat{F}_{f,\text{min}}},$$

что для рассматриваемого примера составляет 215 витков или 1.7% от общего числа витков.

ВЫВОДЫ

1. Метод распознавания аварийных ситуаций, в основу которого положено разделение наблюдаемого процесса на две части – нормальную и локальную, универсален, но модифицируется в зависимости от типа наблюдаемого объекта. Модель объекта в локальном режиме активируется током в месте КЗ, а ее входы зашунтированы или разо-

мкнуты. В отличие от линий электропередачи, для которой подходит модификация с зашунтированными входами, для распознавания витковых замыканий в обмотке трансформатора предпочтительнее модификация с разомкнутыми входами на стороне повреждения и с короткозамкнутыми на неповрежденных сторонах.

2. Алгоритм распознавания витковых замыканий по локальным составляющим напряжения поврежденной обмотки и токов неповрежденной группы обмоток свободен как таковой от методической погрешности, однако в процедуру распознавания приносятся погрешности преобразования наблюдаемых величин. Предполагается корректировка параметров модели нормального режима по результатам наблюдения трансформатора в предшествующем режиме.

3. Локальная составляющая напряжения и тока как поврежденной, так и неповрежденной обмотки дает свою оценку МДС замкнувшихся витков. В идеальном случае оценки совпадают, а в реальном отображаются в области двухкоординатного замера, определяемой априорно на этапе обучения индикатора витковых замыканий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kang Y.-C., Lee B.-E., Zheng T.-Y., Kim Y.-H., Crossley P.A. Protection, faulted phase and winding identification for the three-winding transformer using the increments of flux linkages // IET Generation, Transmission & Distribution. 2010. Т. 4. № 9. P. 1060–1068.
2. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. Энергоатомиздат, 1986.
3. Кочетов И.Д., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А. Унификация моделей и характеристик поврежденной электропередачи при двухстороннем наблюдении // Изв. РАН. Энергетика. 2020. № 4. С. 55–65.
4. Ураксеев М.А., Левина Т.М. Оптоволоконные трансформаторы как элементы современных электротехнических комплексов и систем // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9. № 2. С. 23–29.
5. Иванов С.В., Лямец Ю.Я., Макашкин Ф.А. Оценка параметров элементарных компонентов электрической величины по малому числу отсчетов // Электротехника. 2020. № 3. С. 59–67.

Recognition of Transformer Winding Faults by Local Components of Observed Voltages and Currents

I. D. Kochetov^{a, *} and Yu. Ya. Lyamets^a

^a“Relematika”, LLC, Chuvash State University, Cheboksary, Russia

*e-mail: kochetov_id@relematika.ru

The article considers the informational aspects of the recognition of winding faults in the transformer. The recognition algorithm is based on dividing the observed process into two components – normal and local. The latter carries information about damage of winding, since it is initiated by a single short-circuit current source. As for the normal process, it is created by the half of the observed values in the model of an intact transformer. With regard to the transformer, the expediency of activating the normal process by the currents observed on the damaged side of the transformer and the voltages observed on the undamaged side is substantiated. The reaction of the intact object model is normal voltage components on the one side and normal current components on the other. The local components of voltages and currents are the differences between the observed values and their normal components. In the local mode model, the inputs of the damaged side of the transformer are opened, and the inputs of the intact side are shunted. The normal mode model is in demand in real time, while the local mode model is in demand in deferred time for a priori determination of the display area of measurement during winding faults. The two-coordinate function of the magnetomotive force of the damaged part of the winding is used as a measurement.

Keywords: transformer, winding fault, circuit current components