

Адаптивные измерительные органы аварийных составляющих резервных защит электрических распределительных сетей

В.И. НАГАЙ, В.В. НАГАЙ, И.В. НАГАЙ

Южно-Российский государственный технический университет
(Новочеркасский политехнический институт) (ЮРГТУ(НПИ),
филиал «Южный инженерный центр Энергетики»

«Южэнергосетьпроект»

Россия

nvi53@mail.ru, nagay@novoch.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Резервные защиты, дальнейе и ближнее резервирование, электрические распределительные сети, адаптивные измерительные органы аварийных составляющих, переходное сопротивление, чувствительность, селективность, алгоритмы функционирования.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время в России ответвительные и промежуточные подстанции электрических распределительных сетей напряжением 35-110 кВ являются одним из основных источников питания городских, сельских и промышленных потребителей, что предполагает их высокую надежность и требует применения системы резервирования с высоким техническим совершенством (рис. 1).

Распознавание аварийных режимов, особенно защитами дальнего резервирования, затруднено из-за наличия ряда влияющих факторов: сопоставимость токов короткого замыкания за резервируемыми трансформаторами с токами нагрузки, наличие переходных сопротивлений в месте повреждения, малые уровни напряжений симметричных составляющих на шинах в месте установки защит при удаленных повреждениях, наличие двигательной нагрузки, батарей конденсаторов и т.д. [1-4].

2. ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Эффективными путями повышения чувствительности релейной защиты дальнего резервирования является ее реализация на основе адаптивных измерительных органов аварийных составляющих то-

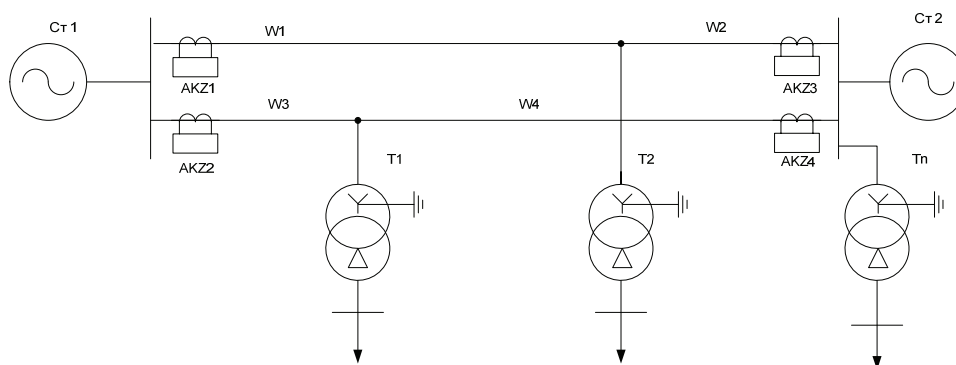


Рис. 1: Поясняющая схема электрической распределительной сети с ответвительными подстанциями

ков и сопротивлений, расширение информационной базы защиты, оптимальное сочетание систем ближнего и дальнего резервирования.

3. ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Исследованию функционирования адаптивных измерительных органов аварийных составляющих в работе предшествует анализ влияющих факторов в аварийных режимах (однофазные и междуфазные короткие замыкания, повреждения с множественной продольно-поперечной несимметрией) на чувствительность резервных защит радиальных и транзитных воздушных линий с трансформаторами, устанавливаемых на ответвительных и промежуточных подстанциях, определение диапазонов изменения их параметров.

Наличие на подстанциях мощной двигательной нагрузки приводит не только к увеличению контролируемых токов, но и к изменению их фазовых соотношений. При анализе приняты следующие допущения: сопротивление КЗ трансформатора $Z_{тmax}$ минимальной мощности $S_{тmin}$, работающего в распределительных сетях напряжением 110 кВ и мощностью 2,5–25 МВ·А на порядок выше суммарного сопротивления системы Z_c и сопротивления участков ВЛ, аргументы токов нагрузки $I_{нт}$ находятся в диапазоне $\varphi_n = -(10^\circ \div 30^\circ)$, аргументы токов пуска I_n и короткого замыкания трансформатора I_t соответственно $-\varphi_n = -(50^\circ \div 70^\circ)$ и $\varphi_t = -85^\circ$, напряжение успешного пуска (самозапуска) электродвигателей (ЭД) $U_{дв} \geq k_U U_{ном}$, где $k_U = 0,55 \div 0,7$; $U_{ном}$ – номинальное значение напряжения.

Модуль тока со стороны питающей подстанции в базисе тока металлического короткого замыкания равен:

$$I_{*1} = \sqrt{m^2 + 1 + 2m \cos(\varphi_n - \varphi_t)},$$

где $m = I_n/I_{ти} = -k_U \cos(\varphi_n - \varphi_t) + \sqrt{k_U^2 \cos^2(\varphi_n - \varphi_t) - (k_U^2 - 1)}$.

Переходное сопротивление при междуфазных КЗ определяется параметрами электрической дуги, горящей между токоведущими частями на открытом распределительном устройстве (ОРУ), где возможно ее раздувание, так и величиной тока короткого замыкания. Как правило, напряжение на ней не превышает значения $U_d = (0,3 - 0,4)U_{ном}$, где $U_{ном}$ – номинальное линейное междуфазное напряжение. Процессы горения дуги в электроустановках корпусной конструкции – комплектных распределительных устройствах (КРУ) отличаются от аналогичных процессов на ОРУ, что обусловлено как отсутствием влияния ветра на процесс горения дуги, так и повышенным давлением внутри отсеков КРУ, представляющих закрытый объем. Это приводит к увеличению напряженности электрического поля. При этом напряжение на столбе дуги может достигать 1500–2000 В, но, как правило, для существующих комплектных распределительных устройств не превышает 750–1000 В.

Сопротивление короткозамкнутой цепи $Z_{тп}$ с трансформатором с учетом переходного сопротивления электрической дуги [1]

$$R_d = -6U_{*д}^2 R_t + \sqrt{(6U_{*д}^2 R_t)^2 - 12A_d U_{*д}^2 (X_t^2 + R_t^2)} / 2A_d,$$

будет равно:

$$z_{тп} = z_t \left[j2A_d \sin\varphi_t + \cos\varphi_t (2A_d - 6U_{*д}^2) + \sqrt{(6U_{*д}^2 \cos\varphi_t)^2 - 12A_d U_{*д}^2} \right] / 2A_d,$$

где z_t , R_t , X_t – полное, активное и реактивное сопротивления трансформатора; $A_d = 3U_{*д}^2 - 1$; $U_{*д} = U_d / U_{ном}$ – напряжение на столбе дуги отнесенное к номинальному напряжению $U_{ном}$ стороны низшего (среднего) напряжения трансформатора.

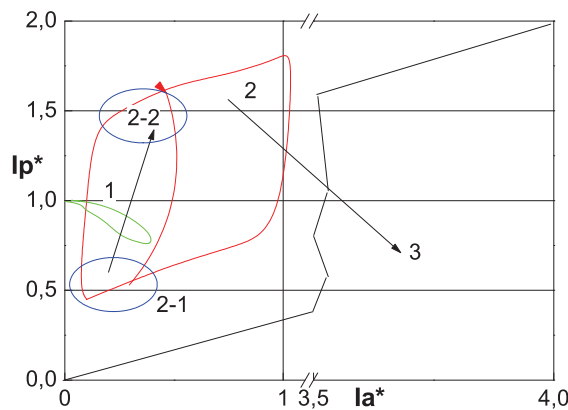


Рис. 2: Область режимов защищаемой сети

Области режимов рассматриваемой сети (рис. 1) показаны на рис. 2. Область 1 — трехфазное короткое замыкание за трансформатором минимальной мощности (S_{min}) при наличии переходного сопротивления; область 2 — пусковые режимы высоковольтных электродвигателей за трансформаторами различной мощности на фоне нагрузочных режимов; область 3 — нагрузочные режимы; область 2-1 — пусковые режимы за защищаемым трансформатором минимальной мощности (данный трансформатор принят за базовый при определении токов и сопротивлений короткозамкнутой цепи), которая трансформируется в область пусковых режимов 2-2 за трансформатором большей мощности или группы трансформаторов, например при самозапуске электродвигателей при успешном АПВ линии.

Необходимо отметить, что область 2-1 пусковых режимов за защищаемым трансформатором располагается ниже области коротких замыканий с учетом влияния переходного сопротивления электрической дуги. Однако при пусках высоковольтных ЭД за более мощными трансформаторами область 2-1 расширяется и трансформируется в область 2, где возможно совмещение областей 1 и 2, что затрудняет распознавание КЗ за маломощными трансформаторами. Область 3 определяется нагрузочными режимами за трансформаторами ответвительных подстанций, перетоком мощности между двумя системами.

В рассматриваемых сетях также не исключены режимы продольно-поперечной несимметрии (ППН), обусловленные разрывом фазных проводов воздушных линий (ВЛ) и одновременным КЗ в сети высшего или низшего напряжения, которые в большинстве случаев не сопровождаются повышением токов до уровней сопоставимых с токами КЗ. При этом в большинстве случаев релейные защиты ВЛ с ответвительными или проходными подстанциями не обладают достаточной чувствительностью к рассматриваемым режимам [1-4], несмотря на то, что это может привести не только к потерям энергии в распределительных сетях, но и вызвать повреждения силовых трансформаторов из-за длительного протекания токов, превышающих их номинальные токи в 2-4 раза [1-6], электродвигателей, перенапряжения в незаземленных нейтралях силовых трансформаторов, повреждения измерительных трансформаторов напряжения, возможное излишнее действие РЗ на смежной параллельной линии [2,3]. Разрыв фазы и даже ее КЗ со стороны питаемой подстанции, в которой установлен короткозамыкатель, может повлечь невозможность отключения поврежденной подстанции со стороны питающей подстанции. Это обусловлено с одной стороны, как правило, недостаточной чувствительностью РЗ питающей подстанции и малым изменением тока короткого замыкания при включении короткозамыкателя, т.к. в этом случае его уровень изменяется не более чем на 5-10 % [1,6].

Рассмотрены следующие виды ППН: обрыв и замыкание на землю фазы *A* первого участка ответвления с КЗ со стороны трансформатора *T1* (режим *AY*), обрыв фазы *A* и КЗ фаз *AB* (*ABY*), *CA* (*CAU*), обрыв фазы *A* и короткое замыкание на стороне низшего напряжения трансформатора *T1* с группой соединения обмоток «звезда-треугольник» фаз *AB* (*ABΔ*), *BC* (*BCΔ*), *CA* (*CAΔ*), *ABC* (*ABCΔ*). Первые три вида сложных повреждений являются развитием одного простого повреждения: падение оборвавшегося провода на землю, схлестывание (или пробой воздушной изоляции) оборвавшегося

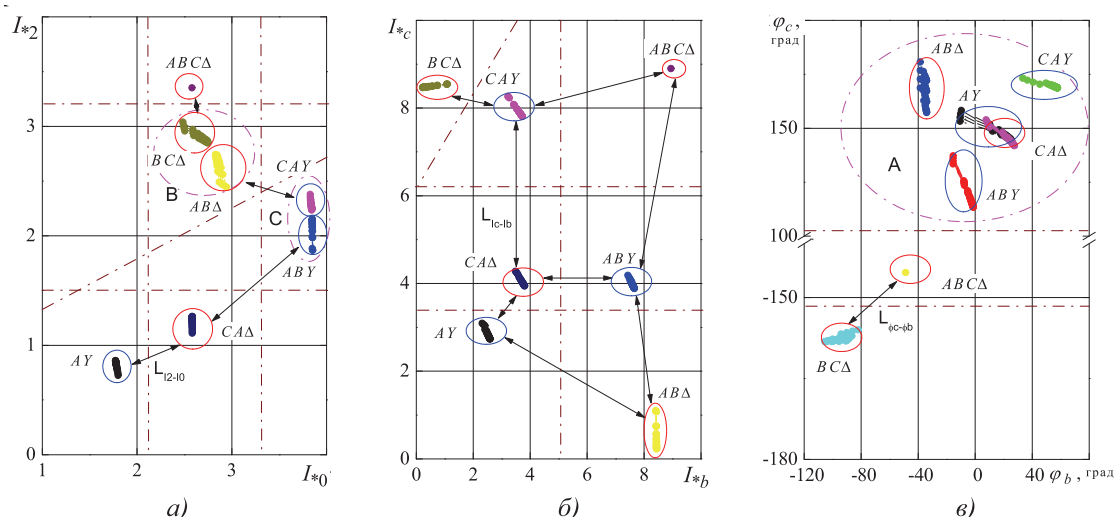


Рис. 3: Области режимов продольно-поперечной несимметрии защищаемых трансформаторов

фазного провода с другим фазным проводом. Последние четыре режима могут возникать при работе ВЛ в неполнофазном режиме, недовключении одного из полюсов коммутационного аппарата питающей, ответвительной или проходной подстанций, обрыве фазного провода, например шлейфа на анкерной опоре и т.д. Короткие замыкания фаз *B* и *C* с одновременным разрывом фазы *A*, а также междуфазное КЗ исключены из этого списка ввиду значительных уровней токов и чувствительности РЗ питающей подстанции.

Возникновение несимметричного повреждения в сети вызывает появление симметричных составляющих и изменение фазных токов, их аргументов, что получило отражение на рис. 3. При этом за базовый ток принят номинальный ток $I_{ном}$ трансформатора *T1*. Фазные токи во всех случаях превышают номинальный ток защищаемого трансформатора, что еще раз подчеркивает недопустимость его длительной работы в режиме ППН не только при наличии повреждения на стороне низшего напряжения, но и при ППН в сети высшего напряжения.

4. ОЦЕНКА РАСПОЗНАВАЕМОСТИ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Для построения селективной и высокочувствительной защиты важным является возможность распознавания режимов ППН с селекцией вида повреждения. При этом необходимо формирование информационных признаков, позволяющих получить непересекающиеся области рассмотренных выше режимов, как это показано на рис. 3. Для оценки меры близости между режимами в *N*-мерном пространстве признаков возможно использование метрики $d^2(\omega_{pk}, \omega_{ql}) = \sum_{j=1}^N (I\varphi_{pk}^j - I\varphi_{ql}^j)^2$, $p, q = 1, 2, \dots, m$; $k = 1, 2, \dots, k_p$; $l = 1, 2, \dots, l_q$, где $I\varphi_{pk}^j$ – значения *j*-го признака *k*-го подрежима *p*-го класса, т.е. режима ω_{pk} ; $I\varphi_{ql}^j$ – значения *j*-го признака *l*-го подрежима *q*-го класса, т.е. режима ω_{ql} . Распознавание режимов на стороне высшего ω_{pk} и низшего ω_{ql} напряжения может быть обеспечено, если

$$L(\Omega_p, \Omega_q) = \sqrt{\frac{1}{k_p k_q} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_q} d^2(\omega_{pk}, \omega_{ql})} \rightarrow \max,$$

где области режимов распознаваемых классов Ω_p и Ω_q .

Если требуется распознавание подрежимов одного класса Ω_p , то в данном случае справедливо последнее соотношение, а в противном случае значение меры близости между ними должно стремиться к минимальному значению

$$LR(\Omega_p) = \sqrt{\frac{2}{k_p k_p - 1} \sum_{k=1}^{k_p} \sum_{l=1}^{k_p} d^2(\omega_{pk}, \omega_{pl})} \rightarrow \min.$$

В качестве информационных признаков режимов ППН можно использовать токи нулевой и обратной последовательностей, и фазные токи (в данном случае токи I_{*b} и I_{*c}), аргументы фазных токов. Рассмотренные выше режимы можно развести на распознаваемые классы Ω_p и Ω_q в пространстве токов обратной и нулевой последовательностей (рис. 3а), а затем разделить на подклассы в пространстве фазных токов (рис. 3б). В пространстве аргументов фазных токов в области A происходит «сжатие» как областей своих классов, так и разных классов (рис. 3в). Это же наблюдается для режимов своих классов (области B и C) в пространстве токов обратной и нулевой последовательностей (рис. 3а).

Достаточно эффективными способами повышения чувствительности релейной защиты дальнего резервирования является построение измерительных органов с контролем аварийных составляющих [1,4,7-9], ортогональных составляющих и применением адаптивного торможения, контролем фазовых соотношений токов прямой и обратной последовательности:

$$\Delta I_M = |I_{K3}| - |I_{нг}|, \quad (1)$$

$$\Delta I_B = |I_{K3} - I_{нг}|, \quad (2)$$

$$\Delta I_K = |\alpha \Delta I_B \pm \beta (\Delta I_B, I_{нг}) \Delta I_B|, \quad (3)$$

$$\Delta Z = U / (I_{K3} - I_{нг}), \quad (4)$$

$$\Delta Z_K = \eta \Delta Z \pm \gamma (\Delta I_B) \Delta Z, \quad (5)$$

$$IXR_T = \text{Im}(I_{K3}) - k_{TM} (I_{K3}, I_{нг}) \text{Re}(I_{K3}), \quad (6)$$

$$\Delta IXR_T = \text{Im}(I_{K3} - I_{нг}) - k_{TM} (\Delta I_B) \text{Re}(I_{K3} - I_{нг}), \quad (7)$$

$$\varphi 1 \leq \arg(I_1 \wedge I_2) \leq \varphi 2, \quad (8)$$

где $I_{K3}, I_{нг}$ – ток короткого замыкания и ток нагрузки; $\Delta I_B, \Delta I_M, \Delta I_K$ – входные сигналы измерительных органов (ИО) тока, контролирующих векторное приращение и приращение модулей тока, ток, сформированный из составляющих векторного приращения; $\Delta Z, \Delta Z_K$ – входные сигналы органов сопротивления, формируемые аналогично сигналам органов тока; α, β, γ – корректирующие коэффициенты; $IXR_T, \Delta IXR_T$ – входные сигналы ИО реактивной составляющей с торможением от активной составляющей, их приращений; I_1, I_2 – токи прямой и обратной последовательности.

Алгоритмы (1,2) обеспечивают выделение приращение модулей и тока и векторного приращения. С позиции стабильности входных сигналов при влиянии переходного сопротивления и токов нагрузки преимущество имеет второй алгоритм выделения аварийных составляющих. Однако и он не свободен от недостатков, особенно при наличии переходного сопротивления, достигающего значений сопротивления $(0,1 \div 0,25)z_{\tau}$. При этом контролируемый ток может снижаться до 25%, что влечет снижение чувствительности резервной защиты. Коррекция его влияния обеспечивается в алгоритме (3) введением составляющей $\beta (\Delta I_B, I_{нг}) \Delta I_B$, зависящей от аварийной составляющей тока и предшествующего нагрузочного режима (рис. 4). Необходимо отметить, что контроль аварийных составляющих сопротивлений практически эквивалентен контролю аварийных составляющих тока, что обусловлено зна-

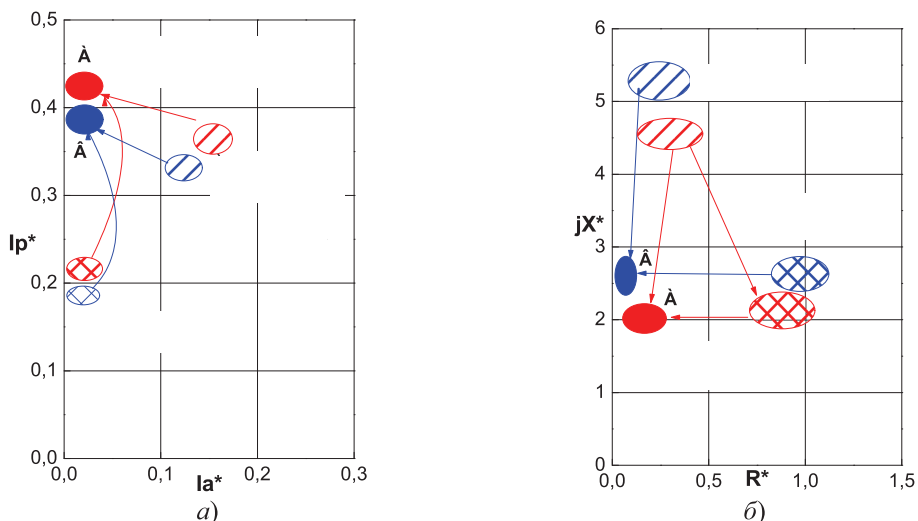


Рис. 4: Области аварийных режимов измерительных органов аварийных составляющих тока (а) и сопротивлений (б)

чительным электрическим сопротивлением защищаемых трансформаторов и малым сопротивлением линий, и как следствие малым снижением напряжения на шинах питающих подстанций.

Наряду с контролем полных аварийных составляющих токов и сопротивлений могут быть использованы ортогональные составляющие (6,7). Чаще всего в качестве рабочего сигнала используется реактивная составляющая тока, а в качестве тормозного сигнала — его активная составляющая. Реактивная составляющая доминирует в аварийных режимах короткого замыкания за трансформаторами ответственных и проходных подстанций, имеющих значительное индуктивное сопротивление и имеет существенное значение в режимах пуска и самозапуска мощных электродвигателей за указанными трансформаторами. Активная составляющая тока в основном проявляется в нормальных режимах, режимах пуска (самозапуска) электродвигателей и при наличии переходного сопротивления в месте повреждения.

Влияние электрической дуги проявляется в снижении модулей и аргументов токов, их приращений (рис. 3а). При этом увеличиваются модули сопротивлений с одновременным снижением их аргументов, что приводит к смещению области контролируемых сопротивлений в сторону режимов пуска и самозапуска ЭД (рис. 2) и (рис. 4б). Поэтому в ИО, контролирующих реактивную и активную составляющую токов, а точнее — их разность, наблюдается снижение выходного сигнала сформированного в соответствии (6,7). Компенсация влияния переходного сопротивления электрической дуги в месте повреждения может быть достигнута адаптивным изменением коэффициента торможения (вплоть до изменения его знака) и коэффициента β , зависящего от аварийной составляющей тока ΔI_b или сопротивления ΔZ . При этом происходит перемещение областей при наличии переходного сопротивления в положение области металлического трехфазного КЗ.

Распознавание несимметричных режимов за трансформаторами с разными группами соединений упрощается при наличии контроля аварийных составляющих токов прямой последовательности и токов обратной последовательности. При этом используется известное соотношение о различном преобразовании токов прямой и обратной последовательностей в трансформаторах с разными группами соединений обмоток. Контроль фазовых соотношений токов прямой и обратной последовательностей (8) позволяет выявить несимметричные КЗ за маломощными трансформаторами (рис. 5).

Необходимо отметить влияние токов нагрузки и переходного сопротивления (рис. 5а,б), особенно в области малых токов и со стороны питаемой системы. Области существования аргументов рассматриваемых токов показаны на рис. 5в. В особой фазе (в данном случае фазе А) возможно совмещение областей несимметричных режимов трансформаторов с группами соединений «звезда-звезда» и «звезда-треугольник», что требует контроля аргументов токов I_1 и I_2 в других фазах.

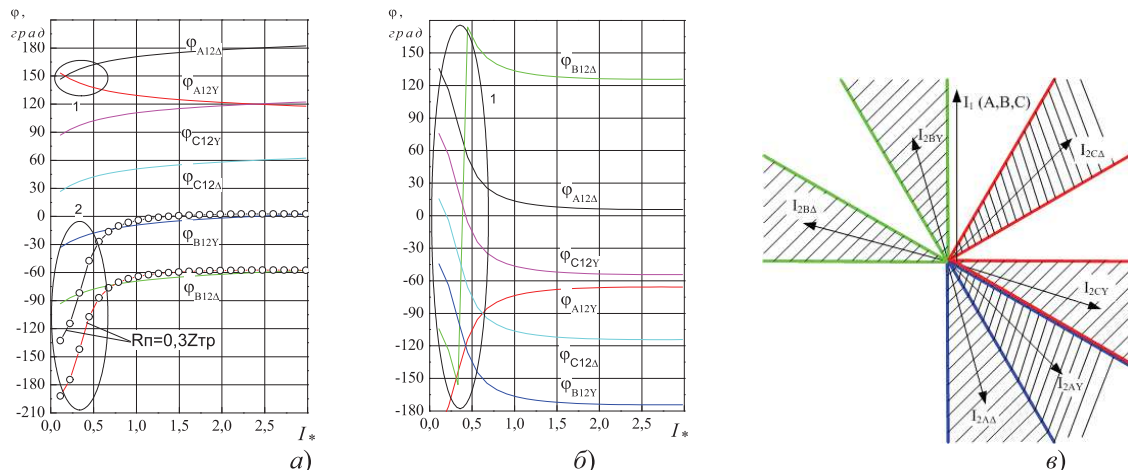


Рис. 5: Области существования аргументов токов прямой и обратной последовательностей при несимметричном КЗ за трансформатором

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования режимов работы электрических сетей с ответвительными и промежуточными подстанциями и алгоритмов функционирования адаптивных измерительных органов на основе математического и физического моделирования и выполненных натурных экспериментов в сети 110 кВ показывают возможность распознавания аварийных режимов за трансформаторами данных подстанций. Обсуждаемые алгоритмы функционирования адаптивных резервных защит апробированы в защитах КЕДР, внедренных в ряде энергосистем России.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Нагай В.И. Релейная защита ответвительных подстанций электрических сетей. – Энергоатомиздат, 2002. – 312 с.
- [2] Маруда И.Ф. Релейная защита понижающих трансформаторов от коротких замыканий на линии при разрывах фаз // Электрические станции. – 2003. – № 2. – С. 44–46.
- [3] Маруда И.Ф. Релейная защита линий 110–220 кВ при разрывах фаз // Электрические станции. – 2002. – № 1. – С. 40–42.
- [4] Нагай В.И., Нагай В.В. Резервирование в распределительных сетях напряжением 6–110 кВ: проблемы и решения // Электро. – 2002. № 6. – С. 29–33.
- [5] Чернин А.Б. Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.
- [6] Авербух А.М. Примеры расчетов неполнофазных режимов и коротких замыканий. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-е, 1979. – 184 с.
- [7] Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Эволюция дистанционной релейной защиты // Электричество, 1999. № 3. С. 8–15.
- [8] Нагай В.В. Анализ распознаваемости несимметричных коротких замыканий за трансформаторами ответвительных и проходных подстанций // Изв. вузов. Технические науки. – 2003. – Спецвыпуск. – С. 46–49.
- [9] Нагай В.В. Критерии выбора измерительных органов резервных защит // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. – 2004. – Прилож. № 2. – С. 49–54.